

Capítulo 7

Simulación y Verificación Experimental

Resumen – En este capítulo se muestran los resultados experimentales obtenidos al aplicar el controlador propuesto al convertidor NPC, con la finalidad de verificar su aplicabilidad y efectividad.

Para ello, se ha experimentado el funcionamiento del convertidor NPC bajo diferentes sistemas físicos: filtro LC + carga resistiva, filtro LC + puente rectificador, filtro L + red. También se han ensayado distintas exigencias de operación: control de tensión de salida, control de corriente de salida, control del factor de potencia, control de la tensión total del bus de continua. Todo ello sin olvidar que el controlador, en todo momento, debe garantizar que el bus de continua esté equilibrado. En definitiva, se trata de comprobar que el controlador propuesto es capaz de gobernar el sistema, con garantías, en cualquier situación.

En paralelo, se presentan los resultados de simulación correspondientes a las pruebas experimentales realizadas. La comparación de las simulaciones efectuadas con los resultados experimentales permite comprobar el grado de aproximación de los modelos de simulación empleados.

De forma complementaria a los contenidos anteriormente descritos, se muestra el análisis armónico de algunas de las variables más significativas.

Finalmente, es necesario puntualizar que el trabajo presentado en este capítulo se considera una aportación original de esta tesis.

7.1. Compendio de pruebas realizadas

Los objetivos de este capítulo se pueden resumir como sigue:

- Verificar la aplicabilidad y efectividad del control propuesto.
- Confirmar que el control propuesto es útil para diferentes estrategias de control, cargas y/o aplicaciones.
- Comprobar que los resultados de simulación coinciden con los resultados experimentales, con objeto de validar los modelos de simulación.

Para ello, se han simulado y ensayado experimentalmente diferentes controles y sistemas, ya detallados en el Capítulo 5:

- Control de tensión.
- Control de corriente.
- Control con carga no lineal.
- Control con conexión a red.

Obviamente, todos estos controles conllevan, en paralelo, el control del equilibrio de las tensiones de las capacidades del bus de continua, condición indispensable para un correcto funcionamiento del convertidor NPC.

Algunos aspectos importantes a examinar en las pruebas experimentales son:

- Tiempo de respuesta frente a cambios de consigna.
- Error en régimen permanente.
- Robustez del control frente a cambio de parámetros.
- Tiempo de ejecución del control por parte del DSP.
- Mantenimiento del equilibrio del bus de continua.
- Espectro armónico entregado por el convertidor.
- Comparación de los resultados con otros controles.

Se han realizado numerosas y exhaustivas pruebas experimentales, que se detallan en las tablas 7.1-7.4. El volumen de resultados y medidas tomadas hace inapropiada su presentación completa en un espacio razonablemente reducido y, por esta razón, se muestra una selección de aquellos resultados experimentales más significativos. Por otro lado, en este capítulo se muestran informaciones extraídas principalmente de tres fuentes: resultados de simulación, medidas experimentales obtenidas mediante osciloscopio y medidas experimentales obtenidas mediante el programa informático de monitorización en tiempo real que incorpora el DSP (*ControlDesk*). Para un número importante de medidas con osciloscopio ha sido necesario emplear sondas atenuadoras de tensión (1/50) y/o sondas de corriente (con relación 100 mV/A), ambas con su correspondiente aislamiento galvánico. Por ello, en aquellos casos en que sea necesario, se indica en el pie de figura la escala correspondiente del oscilograma (V/div ó A/div).

Sistema	
Inversor NPC con filtro LC pasabajos y carga resistiva a baja potencia ($P_{\text{nominal}} = 100\text{W}$), alimentado desde fuente de tensión constante ($v_{pn} = 100\text{ V}$)	
Tipo de control. Variables a controlar	Pruebas experimentales realizadas
<ul style="list-style-type: none"> • No se aplica ningún controlador (lazo abierto) • Se desea regular la tensión aplicada a la carga y el equilibrio del bus de continua 	<ul style="list-style-type: none"> • Régimen permanente con consigna 20 V y 50 V • Arranque hasta un valor de consigna de 20 V y 50 V • Transitorio de escalón en la consigna de 20 a 50 V y de 50 a 20 V • Transitorio de escalón en la carga, con cambio brusco de 66 a 44 Ω/fase y de 44 a 66 Ω/fase, con consigna de tensión 50 V • Transitorio de escalón en la tensión del bus de continua (v_{pn}), con cambio brusco de 100 a 90 V y de 100 a 110 V, con consigna de tensión 50 V
<ul style="list-style-type: none"> • Control de tensión • Se desea regular la tensión aplicada a la carga y el equilibrio del bus de continua 	

Tabla 7.1. Resultados experimentales para el inversor NPC a bajo nivel con filtro LC y carga resistiva.

Sistema	
Inversor NPC con filtro LC pasabajos y carga resistiva ($P_{\text{nominal}} = 1\text{ kW}$), alimentado desde fuente de tensión constante ($v_{pn} = 250\text{ V}$)	
Tipo de control. Variables a controlar	Pruebas experimentales realizadas
<ul style="list-style-type: none"> • Control de tensión • Se desea regular la tensión aplicada a la carga y equilibrio del bus de continua 	<ul style="list-style-type: none"> • Régimen permanente con consigna 120 V • Arranque hasta un valor de consigna de 120 V • Transitorio de escalón en la consigna de 120 a 60 V y de 60 a 120 V • Transitorio de escalón en la carga, con cambio brusco de 22 a 16.5 Ω/fase y de 16.5 a 22 Ω/fase, con consigna de tensión 120 V • Transitorio de escalón en la tensión del bus de continua (v_{pn}), con cambio brusco de 250 a 275 V y de 250 a 225 V, con consigna de tensión 120 V
<ul style="list-style-type: none"> • Control de tensión y control de corriente • Se desea regular la tensión aplicada a la carga y equilibrio del bus de continua • Se activa el modo corriente como protección contra sobrecorrientes (sobrecargas y cortocircuitos) 	

Tabla 7.2. Resultados experimentales para el inversor NPC con filtro LC y carga resistiva.

Sistema	
Inversor NPC ($P_{\text{nominal}} = 1 \text{ kW}$), alimentado desde fuente de tensión constante ($v_{pn} = 250 \text{ V}$), con filtro LC pasabajos y carga no lineal, constituida por puente rectificador trifásico seguido de filtro LC pasabajos y carga resistiva.	
Tipo de control. Variables a controlar	Pruebas experimentales realizadas
<ul style="list-style-type: none"> • No se aplica ningún controlador (lazo abierto) • Se desea regular la tensión aplicada a la carga y el equilibrio del bus de continua 	<ul style="list-style-type: none"> • Régimen permanente con consigna 80 V
<ul style="list-style-type: none"> • Control de tensión • Se desea regular la tensión aplicada a la carga y equilibrio del bus de continua 	<ul style="list-style-type: none"> • Régimen permanente con consigna 80 V • Arranque hasta un valor de consigna de 80 V
<ul style="list-style-type: none"> • Control de tensión y control de corriente • Se desea regular la tensión aplicada a la carga y equilibrio del bus de continua • Se activa el modo corriente como protección contra sobrecorrientes (sobrecargas y cortocircuitos) 	<ul style="list-style-type: none"> • Arranque hasta un valor de consigna de 80 V

Tabla 7.3. Resultados experimentales para el convertidor NPC con carga no lineal.

Sistema	
Inversor NPC ($P_{\text{nominal}} = 500 \text{ W}$), alimentado desde fuente de corriente que simula un panel solar, con filtro L y conexión a red.	
Tipo de control. Variables a controlar	Pruebas experimentales realizadas
<ul style="list-style-type: none"> • Control de tensión (v_{pn}) y del factor de potencia • Se desea regular la tensión total del bus de continua (v_{pn}), el factor de potencia en la conexión a red y el equilibrio del bus de continua 	<ul style="list-style-type: none"> • Régimen permanente con diferentes corrientes de entrada (i_{DC}) y distinta tensión total del bus de continua (v_{pn}) • Transitorio de escalón en la consigna de tensión 100 a 80 V

Tabla 7.4. Resultados experimentales para el convertidor NPC con conexión a red.

7.2. Control de tensión con el sistema de baja potencia

Sobre el sistema de la figura 7.1, se regula la tensión aplicada a la carga, control descrito detalladamente en el Capítulo 5. En las pruebas experimentales se han considerado dos niveles de potencia diferentes para el convertidor. Este planteamiento viene derivado de la evolución lógica de las pruebas experimentales. En primer lugar, se ha ensayado exhaustivamente el funcionamiento del sistema a baja potencia (100 W), sometiéndolo a muy variadas condiciones de trabajo (arranque, cambio de consigna, cambio de carga, cambio de la tensión del bus de continua, etc). Una vez verificada su correcta operación, el sistema ha quedado validado y se ha incrementado la potencia del convertidor (1 kW). Con este nivel de potencia, se garantiza que el control propuesto va a funcionar sin problemas a niveles de potencia mayores.

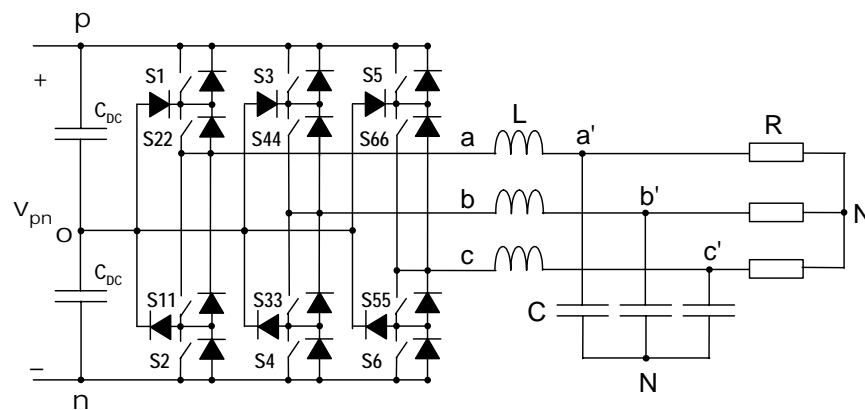


Figura 7.1. Convertidor NPC con filtro LC pasabajos y carga resistiva.

En primer lugar, a baja potencia, se comparan algunos parámetros de funcionamiento. Estos resultados permiten verificar la eficacia del control en comparación con el funcionamiento del sistema en lazo abierto.

7.2.1. Régimen permanente

Para el sistema de la figura 7.1, las primeras pruebas experimentales se han realizado con los siguientes valores:

$$V_{pn} = 100 \text{ V} ; C_{DC} = 470 \text{ } \mu\text{F} ; L = 5 \text{ mH} ; C = 30 \text{ } \mu\text{F} ; R = 66 \text{ } \Omega ; f = 50 \text{ Hz} ; f_s = 10 \text{ kHz}$$

Con los mencionados valores, se consigue una potencia máxima aproximada de 100 W. La estrategia de conmutación empleada es del tipo PWM asimétrico.

El controlador para la operación en lazo cerrado se calcula según el procedimiento descrito en el apartado 5.5. Realizando algunas simulaciones, se hallan los pesos de la función de coste (7.1). Se incorpora un limitador de rampa en la consigna de valor 50 V/ms.

$$KP_{v_{YD}} = 5 ; KP_{v_{YQ}} = 5 ; KP_{v_o} = 10 ; KI_{v_{YD}} = 1e5 ; KI_{v_{YQ}} = 1e5 ; KI_{v_o} = 1e5 ; W = 1 \quad (7.1)$$

Se desea una tensión eficaz compuesta aplicada a la carga de 50 V, valor que determina la consigna del sistema (7.2), ver (B.61) en Apéndice B. No hay componente homopolar, por ser un sistema de neutro aislado.

$$v_{Yd}^* = V_{RMS} = 50 V \quad ; \quad v_{Yq}^* = 0 V \quad (7.2)$$

compuesta

Se ha efectuado una valoración de la efectividad del controlador propuesto, en régimen permanente, comparando los resultados obtenidos en lazo abierto y en lazo cerrado, en base a los siguientes conceptos:

- Error estacionario (*ES*).
- Coeficiente de regulación de carga (*CRC*).
- Coeficiente de regulación de línea (*CRL*).

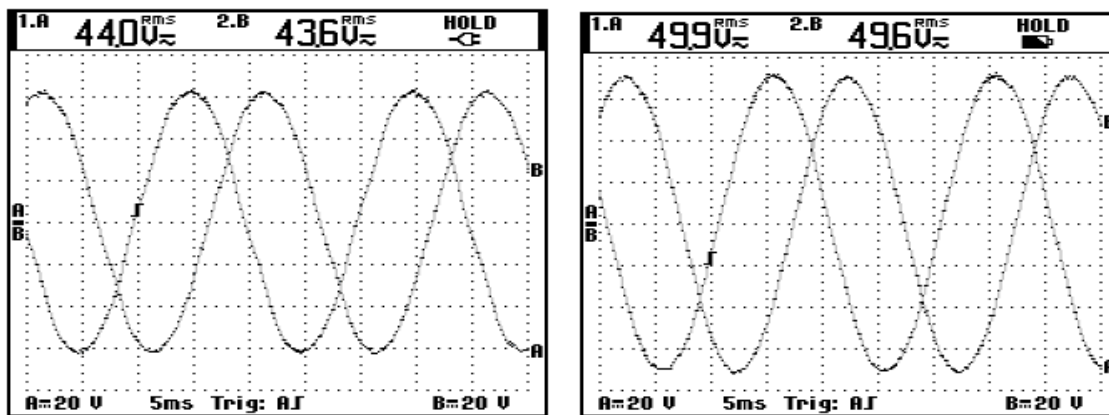
Se define el error de régimen permanente o error estacionario según (7.3). La tabla 7.5 muestra los valores del error estacionario (*ES*) para el sistema, operando en lazo abierto y lazo cerrado, obtenidos según la información de la figura 7.2.

$$ES (\%) = \frac{v_{carga} - v_{carga}^*}{v_{carga}^*} \cdot 100 \quad (7.3)$$

siendo

v_{carga} : Tensión eficaz compuesta aplicada a la carga.

v_{carga}^* : Tensión eficaz compuesta que se desea aplicar a la carga (consigna).



a) Lazo abierto

b) Lazo cerrado

Figura 7.2. Medida experimental de las tensiones compuestas en bornes de la carga.

$v_{ab'}$ (Canal A) y $v_{b'c'}$ (Canal B).

Control	Consigna v_{carga}^* (V)	Tensión v_{carga} (V)	ES (%)
Lazo abierto	50	44	- 12
Lazo cerrado	50	49.9	- 0.2

Tabla 7.5. Error estacionario en lazo abierto y lazo cerrado.

El coeficiente de regulación de carga (*CRC*) es una medida de la desviación que sufre la tensión de salida (Δv_{carga}) frente a variaciones de la corriente que entrega el sistema. Su definición se encuentra en (7.4).

$$CRC (\%) = \frac{\Delta v_{carga}}{(v_{carga})_{nominal}} \cdot 100 \quad (7.4)$$

siendo

Δv_{carga} : Desviación de la tensión eficaz compuesta aplicada a la carga como consecuencia de la variación de la corriente de carga o salida del sistema.

$(v_{carga})_{nominal}$: Valor usual de la tensión eficaz compuesta aplicada a la carga.

Considerando una consigna de 50 V, se ha variado la resistencia de carga entre 66 y 44 Ω . En consecuencia, la corriente de salida del convertidor cambia su valor y se obtienen los resultados de la tabla 7.6.

Control	Tensión v_{carga} (V) (R = 66 Ω)	Tensión v_{carga} (V) (R = 44 Ω)	CRC (%)
Lazo abierto	44	42.6	3.18
Lazo cerrado	50	50	0

Tabla 7.6. Coeficiente de regulación de carga en lazo abierto y lazo cerrado.

El coeficiente de regulación de línea (*CRL*) es una medida de la desviación que sufre la tensión de salida (Δv_{carga}) frente a variaciones de la tensión de entrada (v_{pn}). Su definición se encuentra en (7.5).

$$CRL (\%) = \frac{\Delta v_{carga}}{(v_{carga})_{nominal}} \cdot 100 \quad (7.5)$$

siendo

Δv_{carga} : Desviación de la tensión eficaz compuesta aplicada a la carga como consecuencia de la variación de la tensión de entrada.

$(v_{carga})_{nominal}$: Valor usual de la tensión eficaz compuesta aplicada a la carga.

Considerando una consigna de 50 V, se ha variado la tensión de entrada (v_{pn}) entre 110 V y 90 V, para obtener los resultados de la tabla 7.7.

Control	Tensión v_{carga} (V) ($v_{pn} = 110$ V)	Tensión v_{carga} (V) ($v_{pn} = 90$ V)	CRL (%)
Lazo abierto	40	33	19.44
Lazo cerrado	50	50	0

Tabla 7.7. Coeficiente de regulación de línea en lazo abierto y lazo cerrado.

Los resultados mostrados en las tablas 7.5-7.7 demuestran la efectividad del control propuesto en régimen permanente. En lazo cerrado y régimen permanente, con el control propuesto y desarrollado en esta tesis, el error estacionario es nulo y la tensión de salida permanece al valor de consigna frente a cambios razonables en la carga y en la tensión de entrada.

7.2.2. Arranque

Las figuras 7.3 y 7.4 muestran la evolución temporal de la tensión aplicada a la carga en el dominio D-Q (v_{Yd}) durante el arranque del sistema hasta un valor de consigna 50 V, en lazo abierto y en lazo cerrado. Las gráficas se han obtenido mediante el *software* de monitorización del DSP (*ControlDesk*). Se verá, a lo largo del presente capítulo, que el valor de la componente 'q' de la tensión de carga (v_{Yq}) se mantiene próximo a cero, como resultado de la alineación de la referencia D-Q con el fasor de tensión, tal como se ha detallado en el Capítulo 5. En consecuencia, es una buena aproximación considerar que la componente 'd' (v_{Yd}) representa el valor de la tensión de salida.

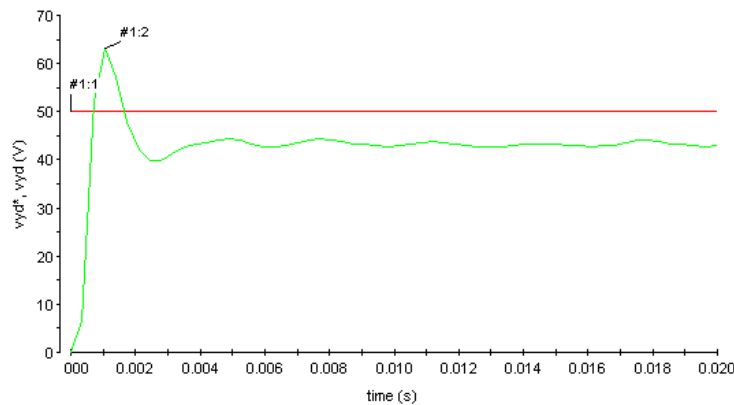


Figura 7.3. Medida experimental desde *ControlDesk* de la consigna de la tensión de carga v_{Yd}^* (#1.1 – rojo) y el valor actual v_{Yd} (#1.2 – verde) en lazo abierto.

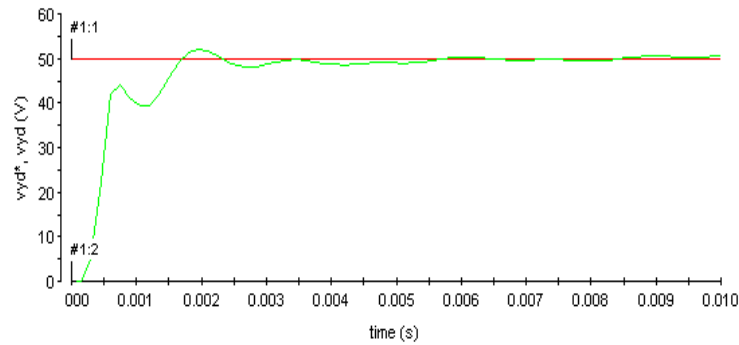
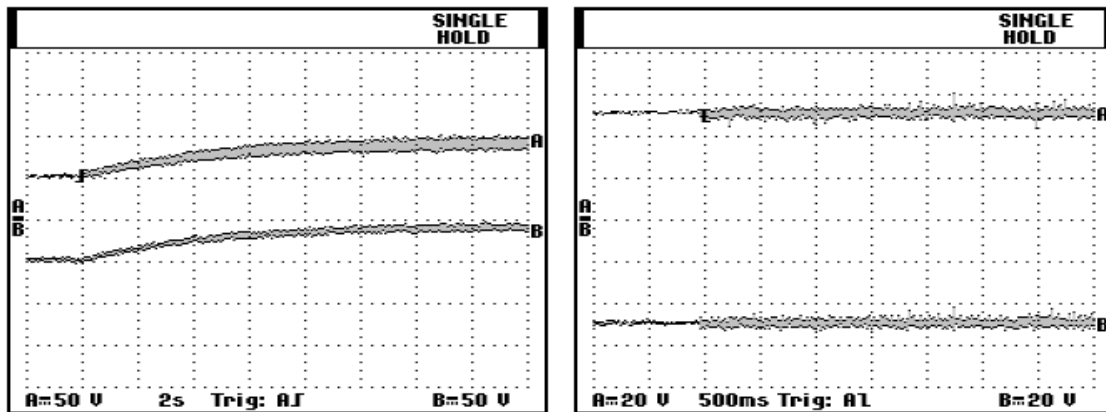


Figura 7.4. Medida experimental desde *ControlDesk* de la consigna de la tensión de carga v_{Yd}^* (#1.1 – rojo) y su valor actual v_{Yd} (#1.2 – verde) en lazo cerrado.

La respuesta de la variable de estado v_{Yd} en lazo abierto, figura 7.3, se muestra estable, presentando rebasamiento y error estacionario. Por contra, en lazo cerrado, figura 7.4, el tiempo de establecimiento y el rebasamiento son menores que en lazo abierto, y además el error estacionario es nulo. Sin duda, la evolución del sistema en lazo cerrado es significativamente mejor que en lazo abierto.

La figura 7.5 presenta la evolución de las tensiones del bus de continua (v_p, v_n) durante el proceso de arranque. El bus de continua está precargado y equilibrado en el instante de arranque del convertidor. En lazo abierto (figura 7.5a) se observa que el bus de continua se ha desequilibrado completamente transcurridos unos 12 s. El control propuesto se muestra plenamente efectivo, puesto que el equilibrio del bus de continua se mantiene, en lazo cerrado (figura 7.5b), gracias a la acción del controlador.



a) Lazo abierto

b) Lazo cerrado

Figura 7.5. Medida experimental de las tensiones del bus de continua durante el arranque, con modulación PWM asimétrica. v_p (Canal A) y v_n (Canal B).

7.3. Control de tensión

Las principales pruebas experimentales se han realizado con mayor potencia (1 kW) que la empleada en los ensayos del anterior apartado (100 W). Para ello, se han empleado los siguientes valores en el sistema de la figura 7.1:

$$V_{pn} = 250 \text{ V} ; C_{DC} = 470 \text{ } \mu\text{F} ; L = 3 \text{ mH} ; C = 40 \text{ } \mu\text{F} ; R = 16.5 \text{ } \Omega ; f = 50 \text{ Hz} ; f_s = 10 \text{ kHz}$$

Los pesos de la función de coste (7.6) son los hallados en el apartado 5.5, ver (5.44). Se incorpora un limitador de rampa en la consigna de valor 80 V/ms.

$$KP_{V_{YD}} = 1e-3 ; KP_{V_{YQ}} = 1e-3 ; KP_{V_o} = 1e-5 ; KI_{V_{YD}} = 1 ; KI_{V_{YQ}} = 1 ; KI_{V_o} = 1e-1 ; W = 1 \quad (7.6)$$

7.3.1. Arranque

Se ha ensayado el arranque del convertidor hasta un valor de consigna 120 V (7.7), lo que supone que se entrega a la carga resistiva trifásica una potencia de 872 W en régimen permanente.

$$v_{Yd}^* = V_{RMS}^{compuesta} = 120 \text{ V} \quad ; \quad v_{Yq}^* = 0 \text{ V} \quad (7.7)$$

Las figuras 7.6-7.8 muestran la evolución de las tensiones de carga en el dominio D-Q durante el arranque. La componente 'd' alcanza el valor de consigna en unos 3 ms. La componente 'q' presenta una desviación menor respecto el valor de consigna ($v_{Yq}^* = 0 \text{ V}$) pero una respuesta más lenta. No obstante, la respuesta de las tensiones simples aplicadas a la carga mostradas en la figura 7.9 permite deducir que el valor de la tensión de carga viene determinada principalmente por la componente 'd', puesto que alcanzan la forma de onda estacionaria en unos 3 ms.

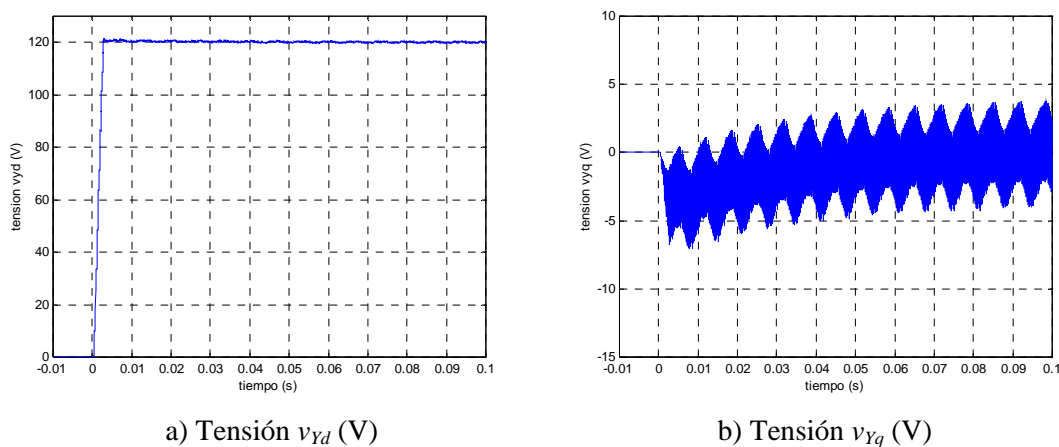


Figura 7.6. Simulación de las tensiones aplicadas a la carga v_{Yd} y v_{Yq} durante el arranque.

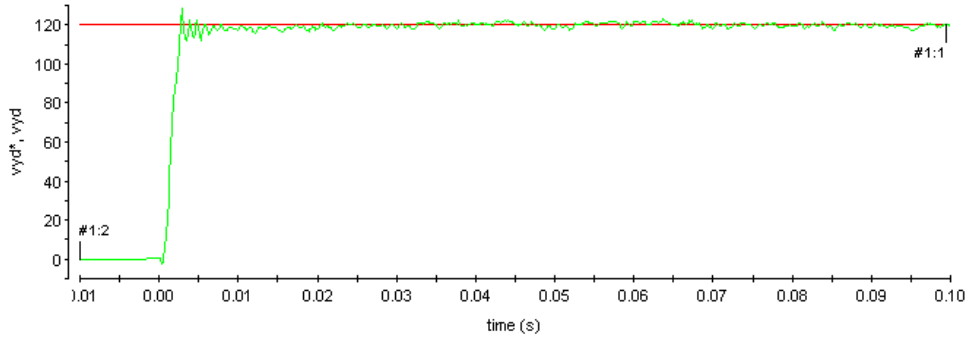


Figura 7.7. Medida experimental de la componente 'd' de la tensión de carga desde *ControlDesk*.
 Consigna v_{Yd}^* (#1.1 – rojo) y valor actual v_{Yd} (#1.2 – verde).

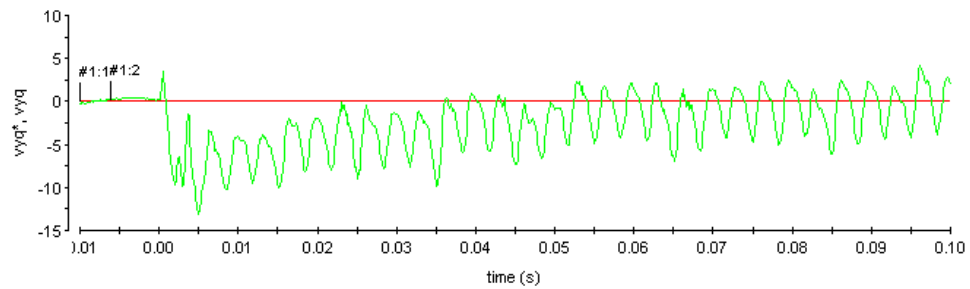


Figura 7.8. Medida experimental de la componente 'q' de la tensión de carga desde *ControlDesk*.
 Consigna v_{Yq}^* (#1.1 – rojo) y valor actual v_{Yq} (#1.2 – verde).

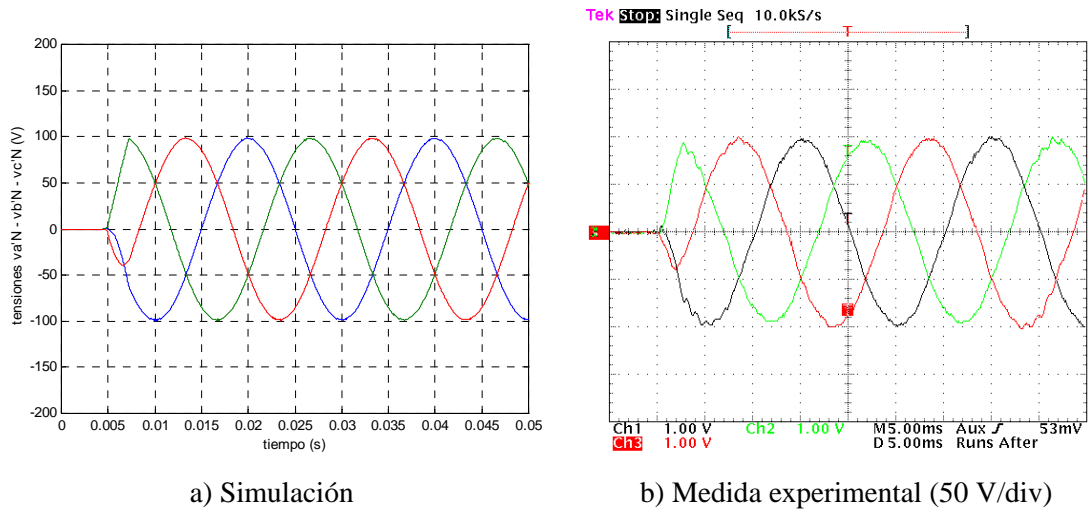
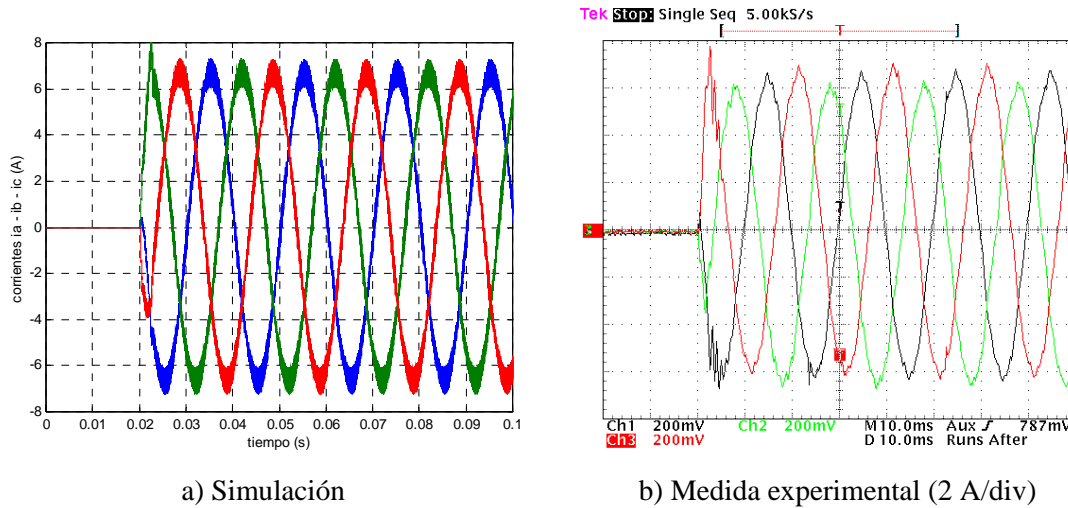


Figura 7.9. Evolución de las tensiones simples aplicadas a las carga ($v_{a'N}$, $v_{b'N}$, $v_{c'N}$).

La figura 7.10 presenta la respuesta de las corrientes que circulan por las bobinas del filtro. El valor máximo de las corrientes no alcanza el valor de saturación de las bobinas (11 A), confirmando así la correcta elección del controlador y del valor del limitador de rampa en la consigna.

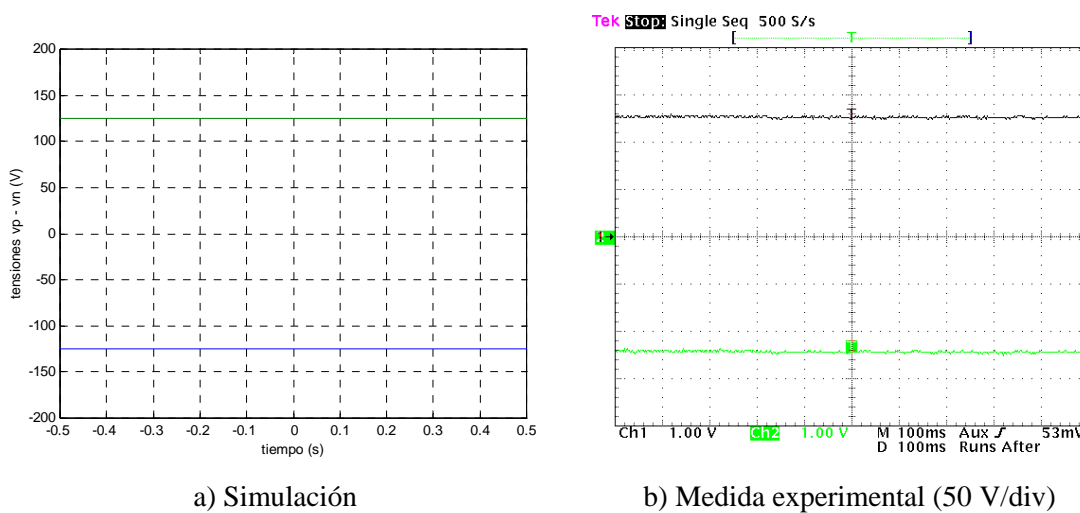


a) Simulación

b) Medida experimental (2 A/div)

Figura 7.10. Evolución de las corrientes que circulan por las bobinas del filtro (i_a , i_b , i_c).

El bus de continua se mantiene equilibrado en todo momento, tal como se deduce de las figuras 7.11 y 7.12, verificando la correcta operación del controlador. Por otro lado, la figura 7.13 muestra la evolución de la corriente del bus de continua (i_{DC}). Obsérvese la congruencia, en todas las variables, entre simulaciones y resultados experimentales.



a) Simulación

b) Medida experimental (50 V/div)

Figura 7.11. Evolución de las tensiones del bus de continua (v_p , v_n).

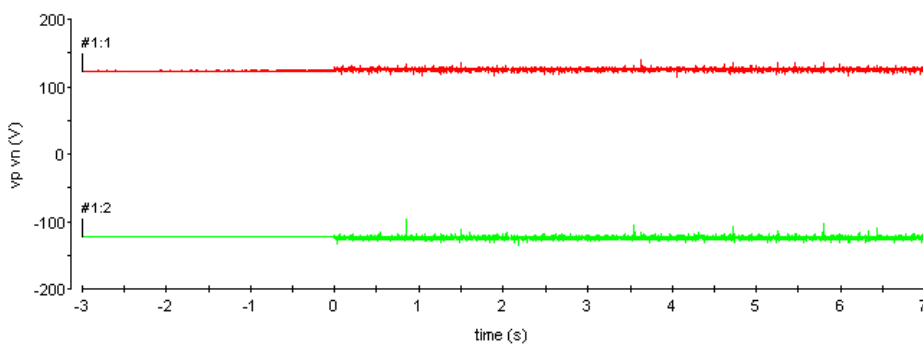


Figura 7.12. Medida experimental de las tensiones del bus de continua desde *ControlDesk*.

v_p (#1.1 – rojo) y v_n (#1.2 – verde).

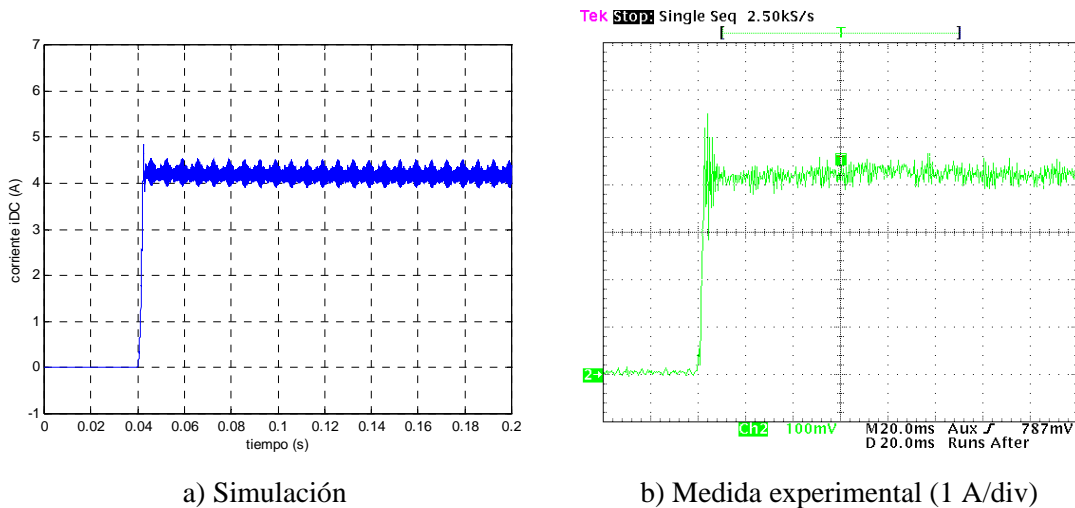
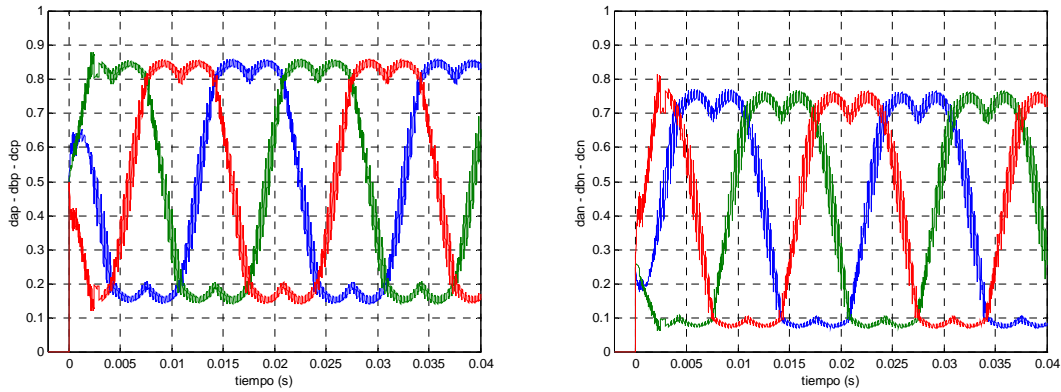


Figura 7.13. Evolución de la corriente del bus de continua (i_{DC}).

La fuente que suministra la tensión del bus de continua (v_{pn}) entrega, en régimen permanente, para la consigna establecida (120 V), una potencia 964 W y una intensidad de salida (i_{DC}) de 3.856 A, valores que proporciona la instrumentación que incorpora la propia fuente. Considerando que la potencia entregada a la carga es 872, se obtiene que el rendimiento del convertidor es de un 90 %.

Las relaciones de conducción 'abc' se muestran en las figuras 7.14-7.16. En todo momento se hallan comprendidas entre 0 y 1, no se produce saturación alguna de las señales de control. Es necesario apuntar que, tal como se generan las señales de los interruptores en el sistema físico, a partir de las relaciones de conducción 'abc' (descrito en el Capítulo 6), no es posible tener todos los interruptores desconectados simultáneamente. Por esta razón, se consigue que el sistema físico esté parado conectando las tres fases de salida al rail 'n'. En consecuencia, se observa en la figura 7.16 que las relaciones de conducción con conexión a 'n' (d_{an} , d_{bn} , d_{cn}) presentan un valor igual a la unidad en el tiempo previo al arranque. Obviamente, esta es una solución aceptable en un prototipo de pruebas, pero no apta para un convertidor comercial.

Resulta significativo observar que el desplazamiento (*offset*) de las relaciones de conducción 'p' es superior al desplazamiento de las relaciones de conducción 'n'. Este es el resultado de la acción del controlador para mantener equilibrado el bus de continua. Si las relaciones de conducción 'p' y 'n' presentan el mismo desplazamiento, sería el caso de la operación en lazo abierto, el bus de continua se desequilibra, tal como se ha mostrado en un apartado precedente para el convertidor a baja potencia. Es necesario observar que se ha empleado la rutina de generación automática de las relaciones de conducción a secuencia homopolar (d_{p0} , d_{n0}) descrita en el Capítulo 4.



a) Relaciones de conducción 'p' (d_{ap}, d_{bp}, d_{cp}) b) Relaciones de conducción 'n' (d_{an}, d_{bn}, d_{cn})

Figura 7.14. Simulación de las relaciones de conducción 'abc' durante el arranque.

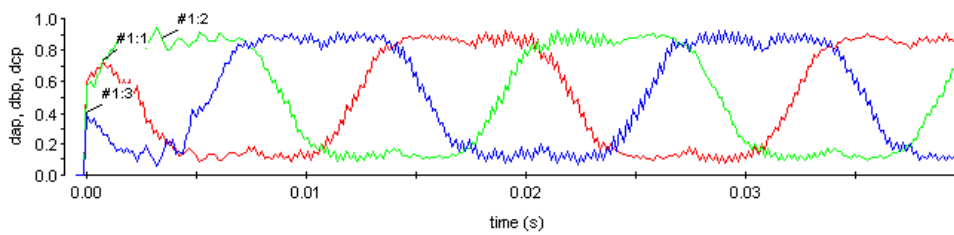


Figura 7.15. Medida experimental de las relaciones de conducción 'p' (d_{ap}, d_{bp}, d_{cp}) desde *ControlDesk*.

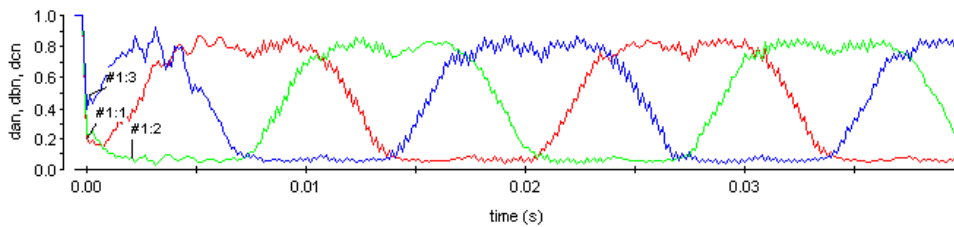


Figura 7.16. Medida experimental de las relaciones de conducción 'n' (d_{an}, d_{bn}, d_{cn}) desde *ControlDesk*.

7.3.2. Cambio de consigna

En este apartado se ilustra el comportamiento del sistema frente a un cambio de consigna en escalón de 120 a 60 V. Las figuras 7.17-7.20 muestran la evolución de la tensión aplicada a la carga, tanto en el dominio D-Q como 'abc'. La respuesta del sistema se muestra rápida, y prácticamente sin rebasamiento ni oscilaciones.

La evolución de las corrientes de las bobinas se presentan en la figura 7.21, mientras que el bus de continua se mantiene equilibrado, ver figura 7.22. Simulaciones y resultados experimentales se muestran coincidentes.

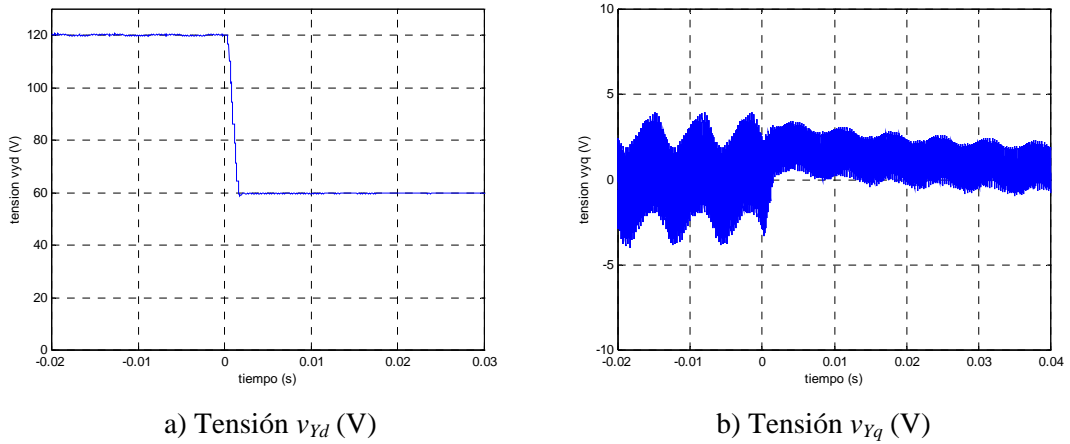


Figura 7.17. Simulación de las tensiones aplicadas a la carga (v_{Yd} , v_{Yq}).

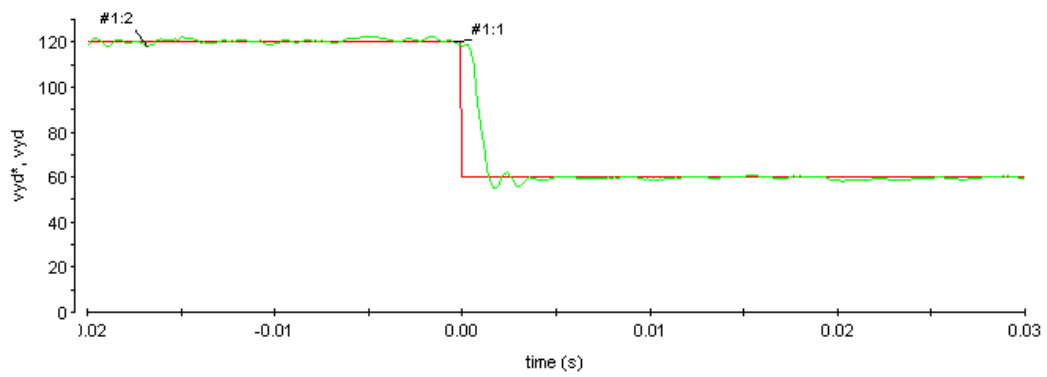


Figura 7.18. Medida experimental de la componente 'd' de la tensión de carga desde *ControlDesk*. Consigna v_{Yd}^* (#1.1 – rojo) y valor actual v_{Yd} (#1.2 – verde).

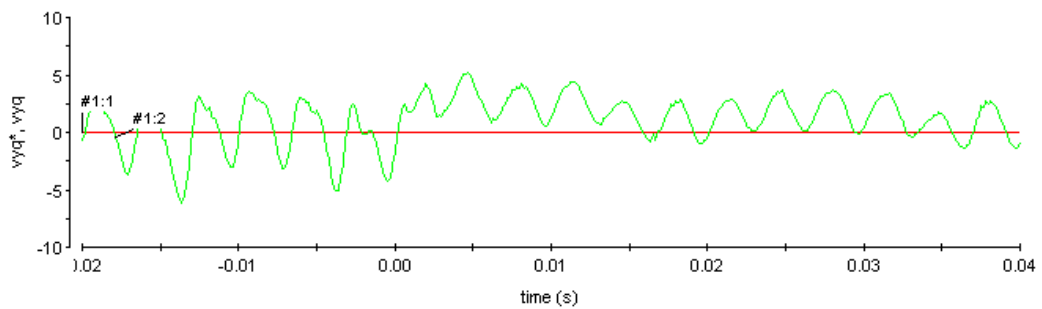
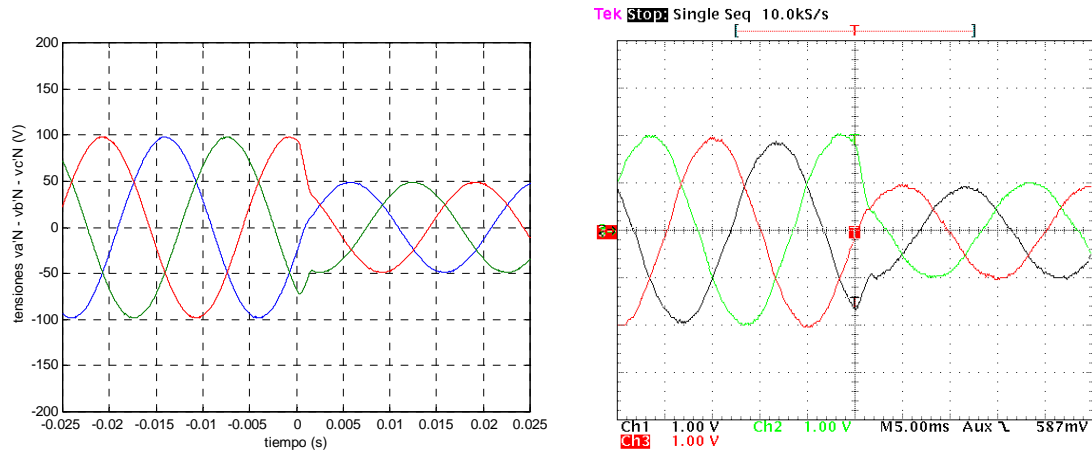


Figura 7.19. Medida experimental de la componente 'q' de la tensión de carga desde *ControlDesk*. Consigna v_{Yq}^* (#1.1 – rojo) y valor actual v_{Yq} (#1.2 – verde).



a) Simulación

b) Medida experimental (50 V/div)

Figura 7.20. Evolución de las tensiones simples aplicadas a las carga (v_{aN} , v_{bN} , v_{cN}).

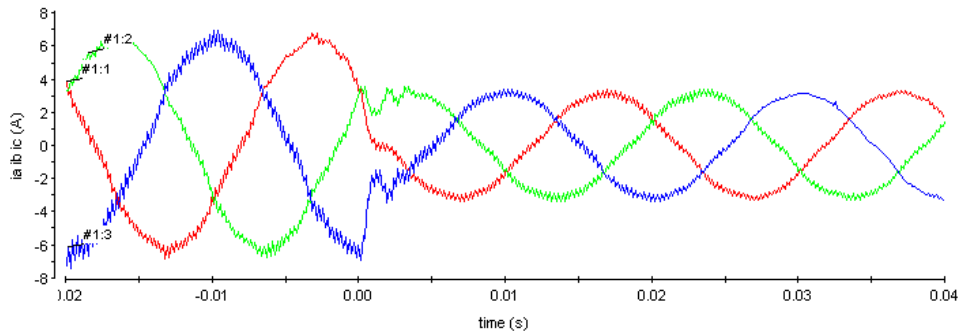


Figura 7.21. Medida experimental de las corrientes de las bobinas (i_a , i_b , i_c) desde *ControlDesk*.

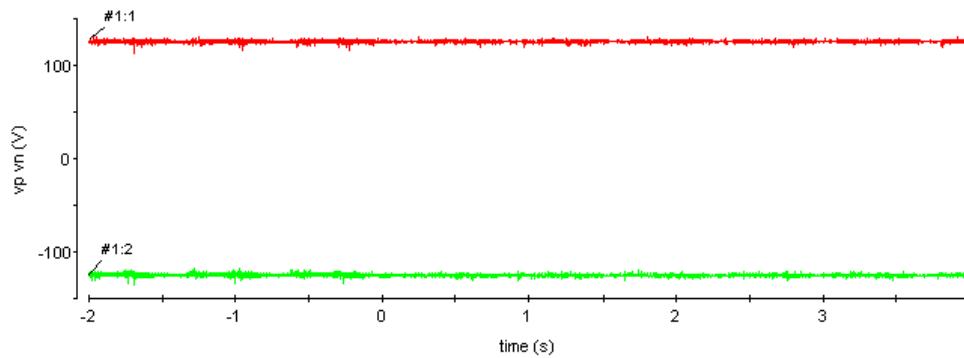


Figura 7.22. Medida experimental de las tensiones del bus de continua desde *ControlDesk*.

v_p (#1.1 – rojo) y v_n (#1.2 – verde).

7.3.3. Cambio de carga

Se ha ensayado el convertidor frente a un cambio de carga de 22Ω /fase a 16.5Ω /fase, considerando una consigna fija igual 120 V.

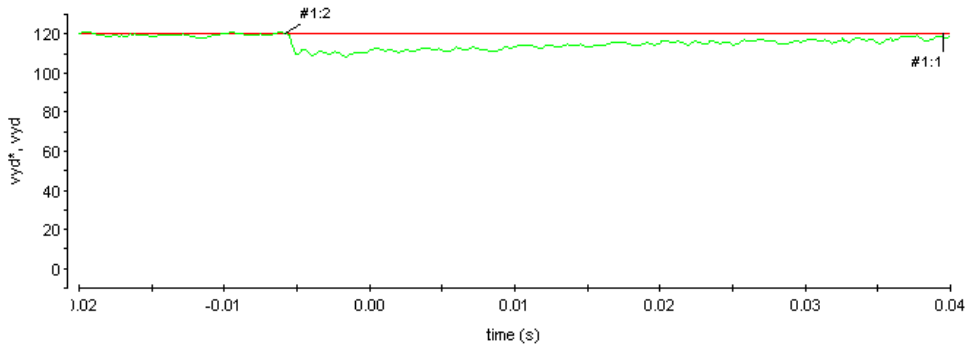


Figura 7.25. Medida experimental de la componente 'd' de la tensión de carga desde *ControlDesk*. Consigna v_{Yd}^* (#1.1 – rojo) y valor actual v_{Yd} (#1.2 – verde).

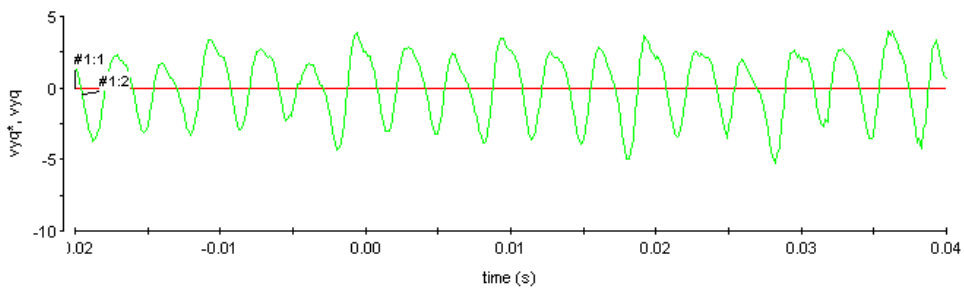
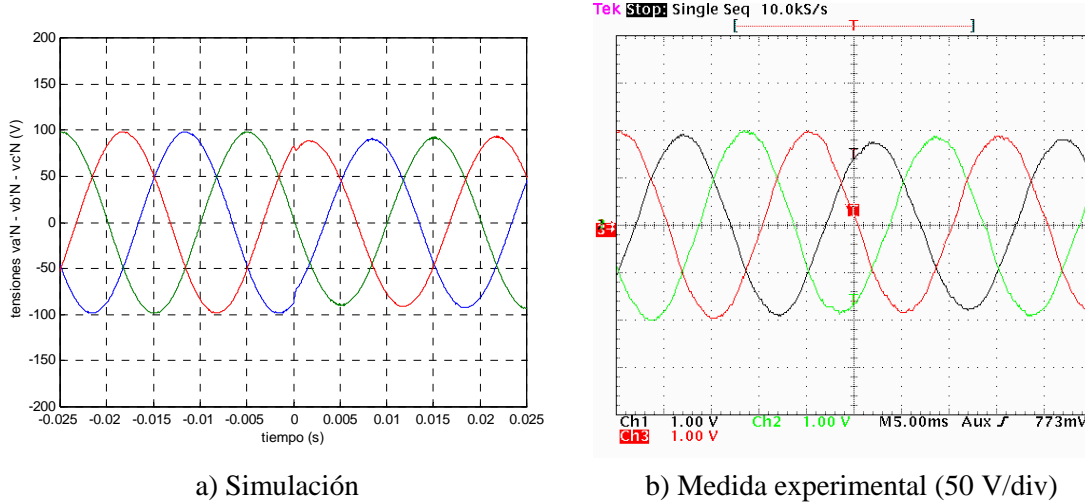


Figura 7.26. Medida experimental de la componente 'q' de la tensión de carga desde *ControlDesk*. Consigna v_{Yq}^* (#1.1 – rojo) y valor actual v_{Yq} (#1.2 – verde).



a) Simulación

b) Medida experimental (50 V/div)

Figura 7.27. Evolución de las tensiones simples aplicadas a las carga (v_{aN} , v_{bN} , v_{cN}).

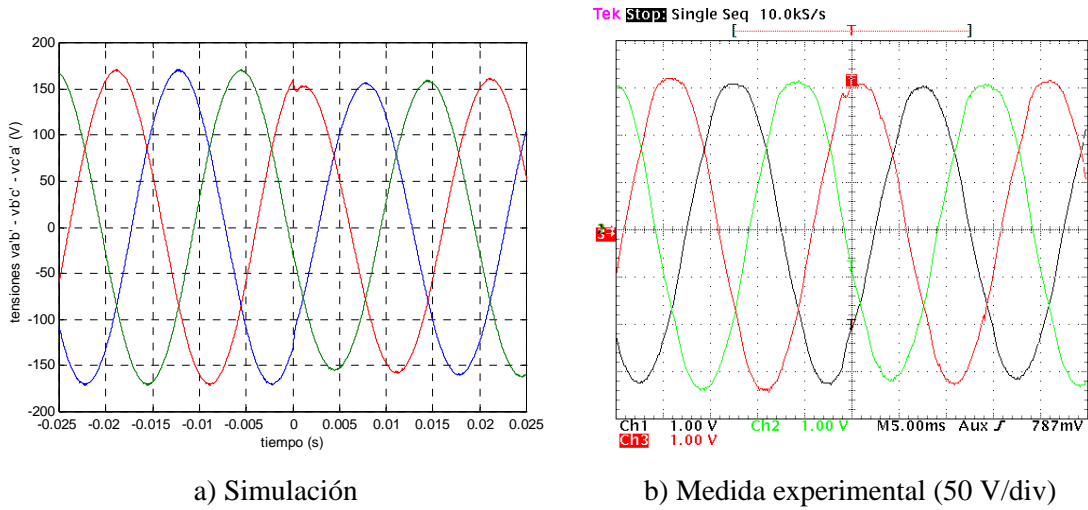


Figura 7.28. Evolución de las tensiones compuestas aplicadas a las carga ($v_{a'b'}$, $v_{b'c'}$, $v_{c'a'}$).

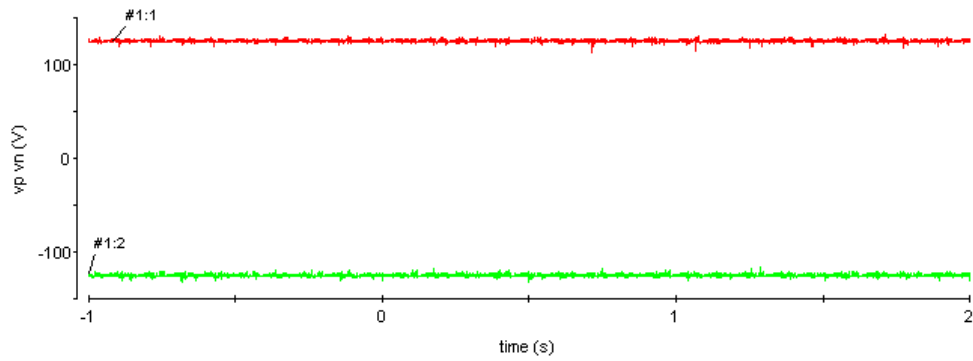


Figura 7.29. Medida experimental de las tensiones del bus de continua desde *ControlDesk*. v_p (#1.1 – rojo) y v_n (#1.2 – verde).

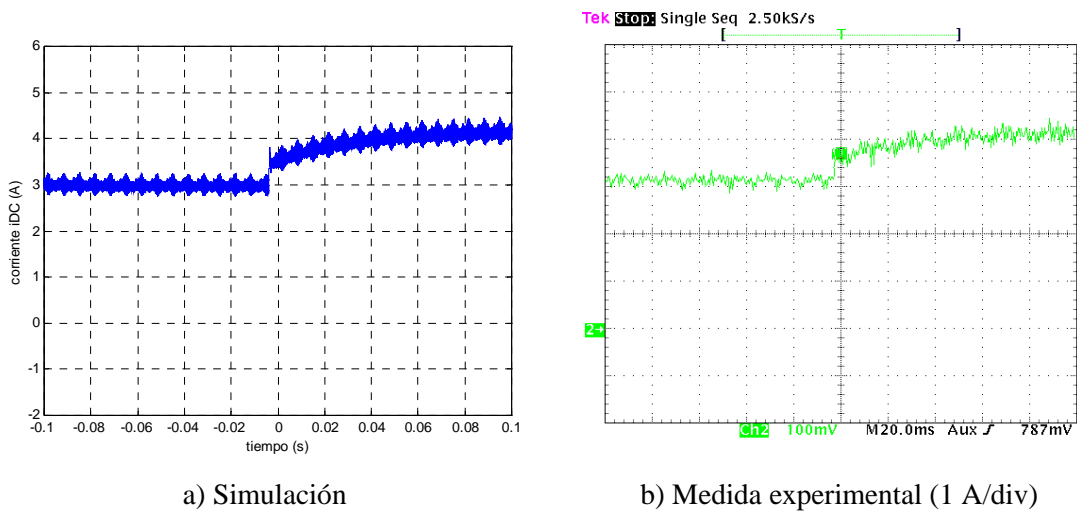


Figura 7.30. Evolución de la corriente del bus de continua (i_{DC}).

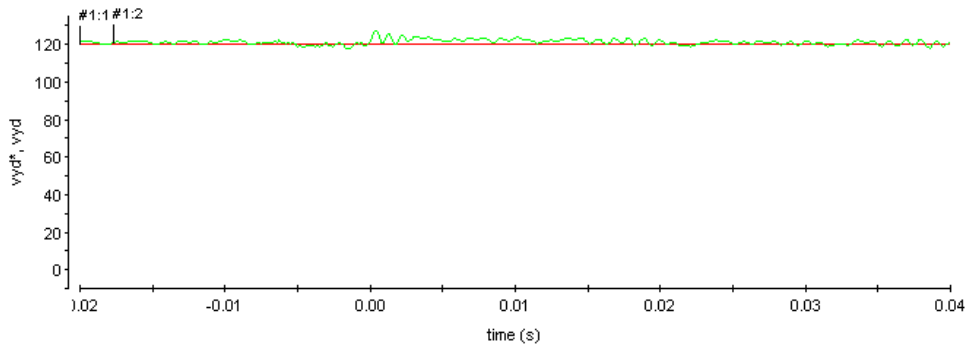


Figura 7.33. Medida experimental de la componente 'd' de la tensión de carga desde *ControlDesk*. Consigna v_{Yd}^* (#1.1 – rojo) y valor actual v_{Yd} (#1.2 – verde).

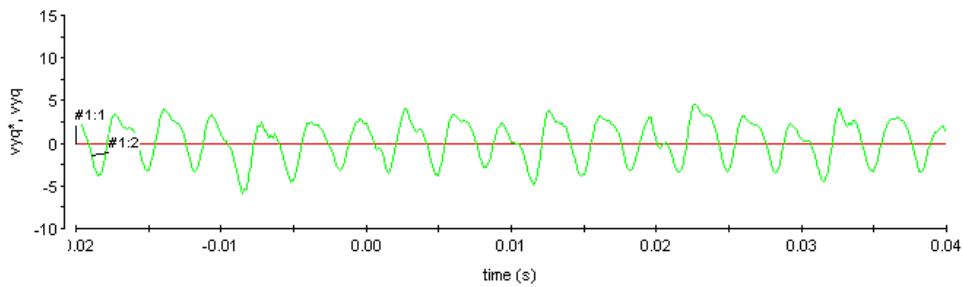


Figura 7.34. Medida experimental de la componente 'q' de la tensión de carga desde *ControlDesk*. Consigna v_{Yq}^* (#1.1 – rojo) y valor actual v_{Yq} (#1.2 – verde).

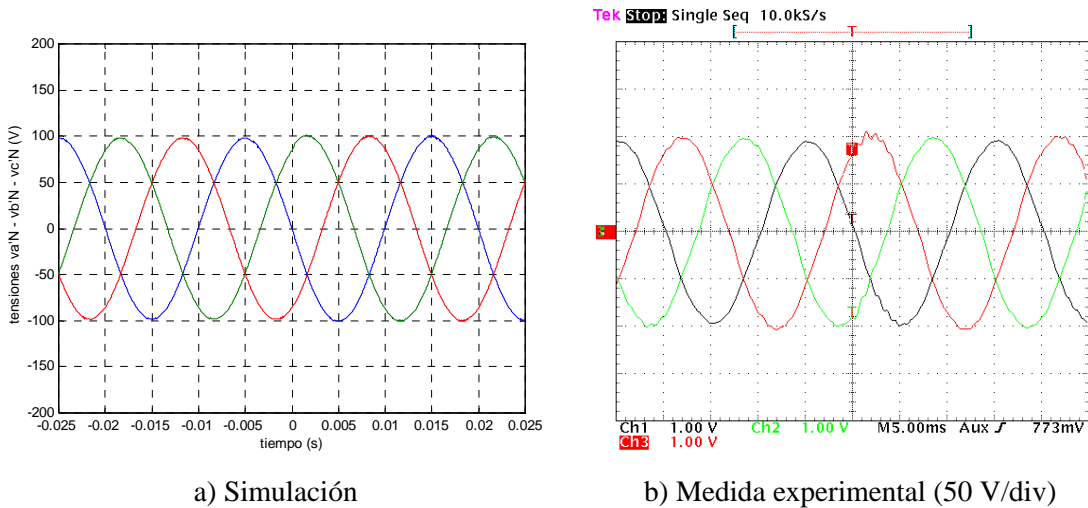


Figura 7.35. Evolución de las tensiones simples aplicadas a las carga (v_{aN} , v_{bN} , v_{cN}).

Las relaciones de conducción 'abc' se mantienen dentro de su margen admisible en todo momento, ver figuras 7.37-7.39. Se observa que reducen su amplitud para compensar el incremento de la tensión del bus de continua. También se aprecia la mayor componente continua de las relaciones de conducción 'p', acción del controlador para mantener equilibrado el bus de continua.

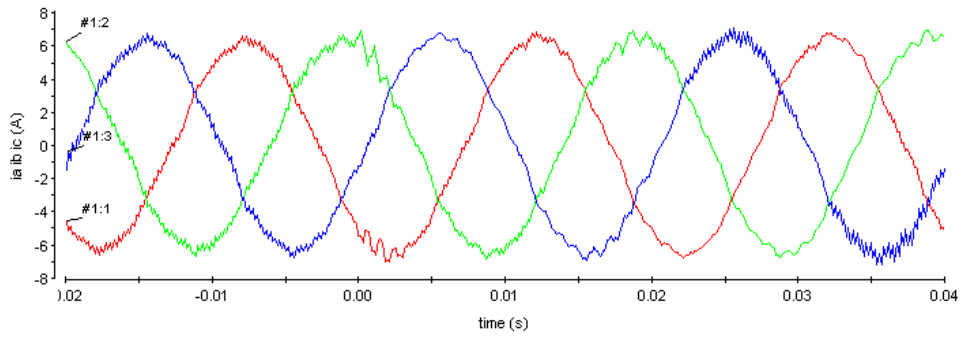
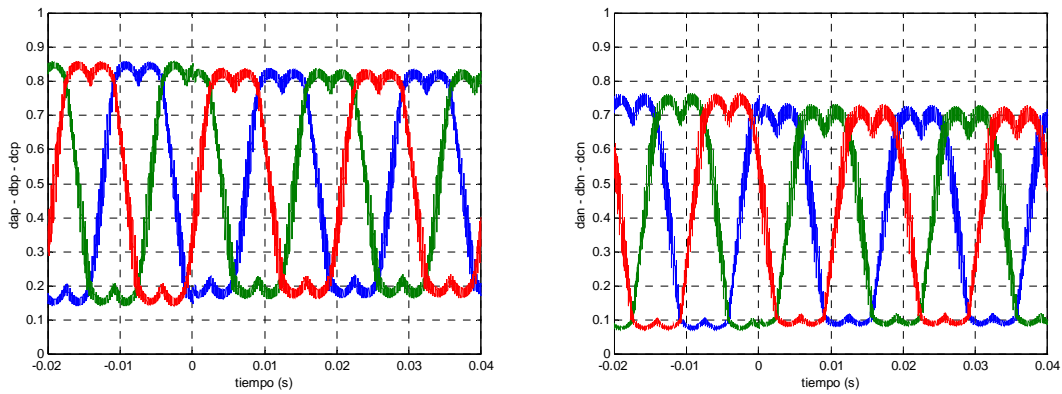


Figura 7.36. Medida experimental de las corrientes de las bobinas (i_a, i_b, i_c) desde *ControlDesk*.



a) Relaciones de conducción 'p' (d_{ap}, d_{bp}, d_{cp}) b) Relaciones de conducción 'n' (d_{an}, d_{bn}, d_{cn})

Figura 7.37. Simulación de las relaciones de conducción 'abc'.

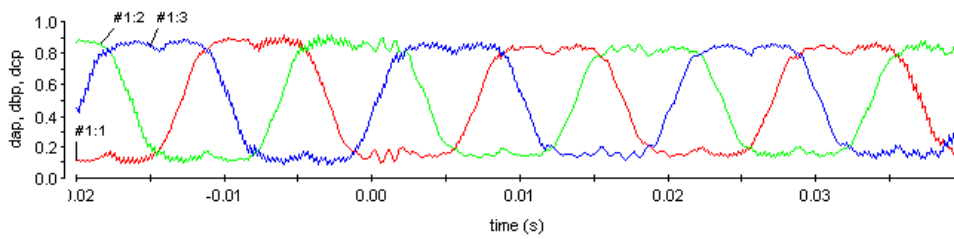


Figura 7.38. Medida experimental de las relaciones de conducción 'p' (d_{ap}, d_{bp}, d_{cp}) desde *ControlDesk*.

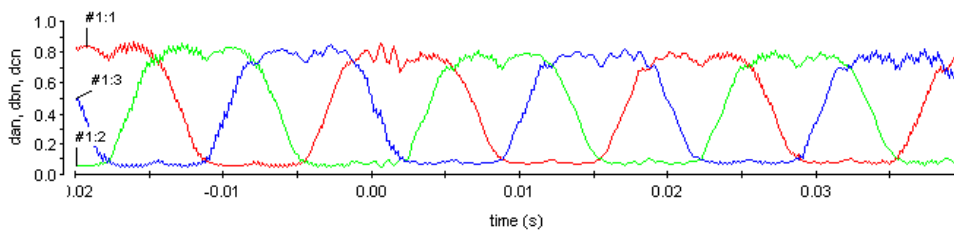


Figura 7.39. Medida experimental de las relaciones de conducción 'n' (d_{an}, d_{bn}, d_{cn}) desde *ControlDesk*.

7.3.5. Observaciones sobre los resultados del control de tensión

Los resultados mostrados en el presente apartado permiten realizar algunas observaciones significativas:

- El controlador multivariable LQR propuesto se muestra efectivo para la regulación de la tensión aplicada a la carga. La respuesta del sistema es rápida, sin rebasamiento ni oscilaciones, además de presentar nulo error estacionario.
- El DSP requiere 150 μ s para ejecutar el controlador propuesto.
- La acción del controlador mantiene equilibrado el bus de continua, en cualquier circunstancia.
- El control propuesto compensa las desviaciones y/o no idealidades de los parámetros del sistema (por ejemplo, cambios en la resistencia de carga o en la tensión del bus de continua), esencialmente gracias a la acción integral del controlador. En consecuencia, la respuesta del sistema frente a cambios en los parámetros es más lenta que frente a cambios en la consigna de tensión.
- Las relaciones de conducción 'abc' (acciones de control) se mantienen en todo instante dentro de su margen admisible.
- Las bobinas del filtro no se saturan en ningún momento.
- Las simulaciones realizadas coinciden con los resultados experimentales obtenidos, en cualquier condición de trabajo. Esta congruencia supone que los modelos de simulación empleados se aproximan apropiadamente al sistema real.

7.4. Control de tensión y corriente

Para el sistema de la figura 7.1, se ha aplicado un controlador donde, en el modo normal de trabajo, se regula la tensión aplicada a la carga. En caso de surgir alguna sobreintensidad en el sistema, el controlador conmuta el control de tensión a control de corriente, donde se regulan las corrientes que circulan por las bobinas del filtro, tal como se ha descrito en el Capítulo 5. La finalidad del control de corriente consiste en proveer al sistema de una protección eficaz frente a sobrecorrientes. Los pesos del controlador de tensión no presentan cambios respecto los descritos en (7.6). Tampoco cambia el limitador de rampa en la consigna de tensión (80 V/ms). Los valores para el sistema de la figura 7.1 son:

$$V_{pn} = 250 \text{ V} ; C_{DC} = 470 \text{ } \mu\text{F} ; L = 3 \text{ mH} ; C = 40 \text{ } \mu\text{F} ; R = 16.5 \text{ } \Omega ; f = 50 \text{ Hz} ; f_s = 10 \text{ kHz}$$

Para el controlador en modo corriente, después de diversas simulaciones, se halla que los valores más apropiados son los mostrados en (7.8). Obsérvese que, en este controlador, ha sido necesario asignar un peso a las variables de control ($W = 1e4$).

$$KP_{IYD} = 1e2 ; KP_{IYQ} = 1e2 ; KP_{Vo} = 1e1 ; KI_{YD} = 1e6 ; KI_{YQ} = 1e6 ; KI_{Vo} = 1e2 ; W = 1e4 \quad (7.8)$$

Sobre el sistema de la figura 7.1, en operación normal, la carga resistiva presenta un valor de $16.5 \Omega/\text{fase}$ y el controlador trabaja en modo tensión. En un instante determinado, se conecta un bloque adicional de resistencias en paralelo con la resistencia de carga (con las cargas resistivas disponibles en el laboratorio, es posible realizar un cambio de carga de 16.5 a $11.6 \Omega/\text{fase}$). En consecuencia, la corriente aumenta y se activa el modo corriente. El control considera que la corriente que circula al conectar el segundo bloque de resistencias es una sobreintensidad y, por tanto, activa el modo corriente. Para ello, es necesario seleccionar convenientemente el umbral de cambio entre modo tensión y modo corriente. Tal como se ha detallado en el Capítulo 5, se incorpora histéresis en la conmutación entre el modo tensión y el modo corriente. Atendiendo a los valores disponibles en las resistencias de carga, se ha seleccionado una histéresis de 6 y 8 A para el módulo de la corriente, con el objetivo de activar el modo corriente al conectar el bloque adicional de resistencias y volver al modo tensión cuando se desconecta dicho bloque. Adicionalmente, se ha escogido un margen de un $\pm 20\%$ alrededor de la referencia para activar de nuevo el control en modo tensión. El valor de consigna de tensión en todo el experimento es constante e igual a 120 V.

7.4.1. Activación del modo corriente

En esta prueba experimental, la resistencia de carga presenta un valor de $16.5 \Omega/\text{fase}$ y el controlador opera en modo tensión, en el estado inicial. En cierto instante, se conecta en paralelo la segunda carga resistiva, tal que la carga total toma un valor de $11.6 \Omega/\text{fase}$ y provoca la entrada del modo corriente.

Para una mejor comprensión de los resultados, se ha sincronizado el instante cero con la conmutación del controlador de modo tensión a modo corriente. Obviamente, la conmutación de la carga resistiva se produce en un instante anterior, transcurriendo un tiempo hasta que se produce la sobrecorriente, se detecta y se activa el modo corriente.

Las figuras 7.40-7.41 muestran las simulaciones y resultados experimentales para el módulo de la corriente de las bobinas y el indicador del modo de control de controlador ("0": tensión – "1": corriente). Obsérvese que el controlador pasa de modo tensión a modo corriente cuando el módulo de la tensión alcanza el umbral alto (8 A) de la banda de histéresis definida. Para relacionar el módulo de la corriente con los valores de i_{Yd} e i_{Yq} , ver figuras 7.42-7.44, es necesario considerar la ecuación (5.50).

A partir del instante en que actúa el modo corriente, el controlador fuerza el valor de la corriente al valor de consigna, ver figuras 7.40-7.44. El valor de la tensión viene entonces determinado por la corriente y la resistencia de carga, ver figuras 7.45-7.47. Puesto que el valor de la carga resistiva es sensiblemente inferior al valor esperado, la tensión (v_{Yd}) disminuye y está fuera de margen. En consecuencia, no se cumple la condición necesaria para el retorno a modo

tensión. Sobre la consigna de 120 V, se considera que la tensión está dentro de margen si presenta un valor comprendido entre 96 V y 144 V ($120\text{ V} \pm 20\%$).

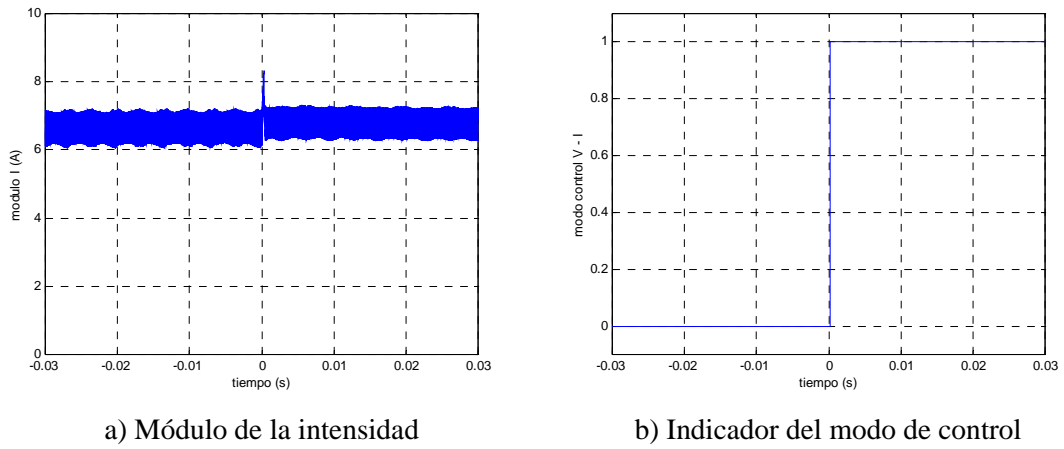


Figura 7.40. Simulación de la activación del modo corriente.

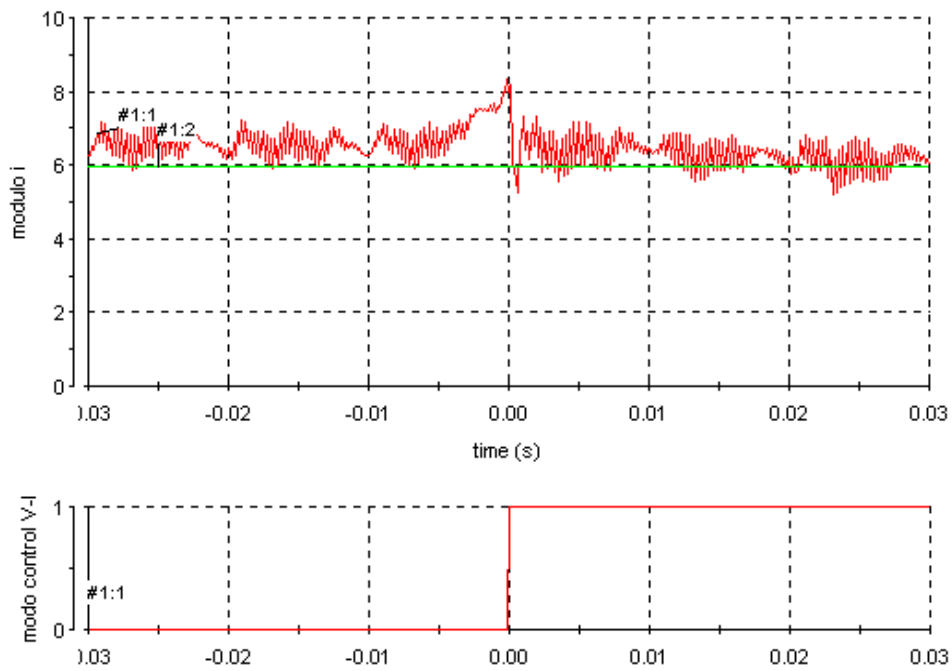


Figura 7.41. Medida experimental del módulo de la corriente y del indicador del modo de control desde *ControlDesk*.

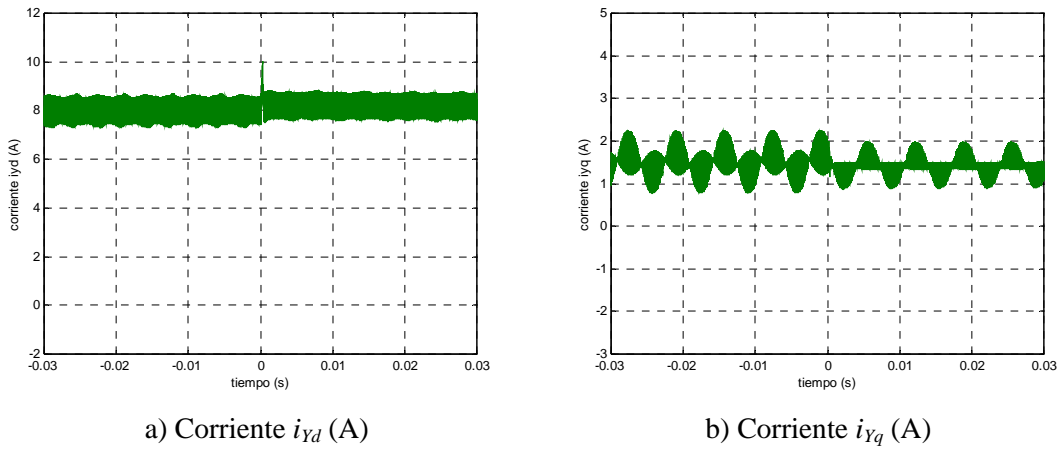


Figura 7.42. Simulación de las corrientes de las bobinas i_{Yd} e i_{Yq} .

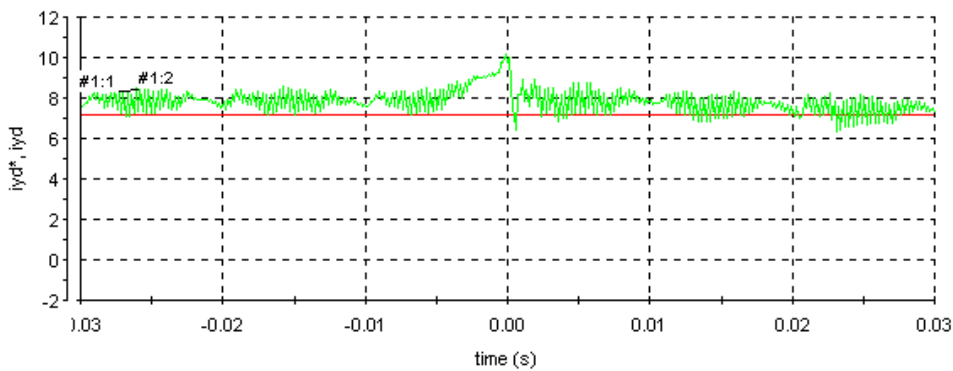


Figura 7.43. Medida experimental de la componente 'd' de la corriente de las bobinas de filtro desde *ControlDesk*. Consigna i_{Yd}^* (#1.1 – rojo) y valor actual i_{Yd} (#1.2 – verde).

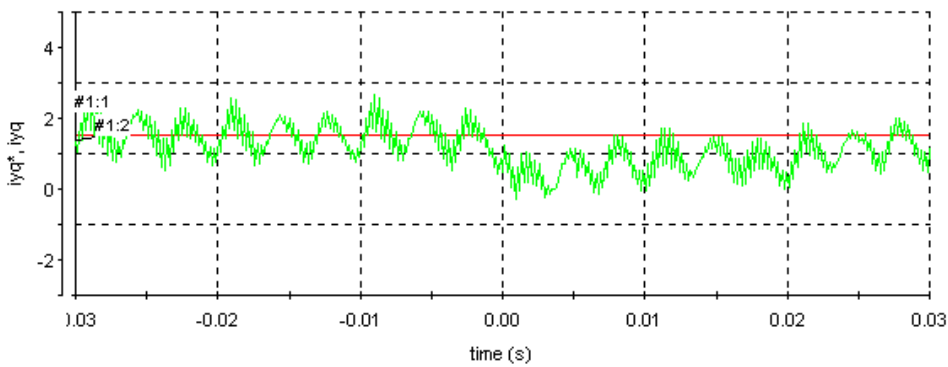


Figura 7.44. Medida experimental de la componente 'q' de la tensión de carga desde *ControlDesk*. Consigna i_{Yq}^* (#1.1 – rojo) y valor actual i_{Yq} (#1.2 – verde).

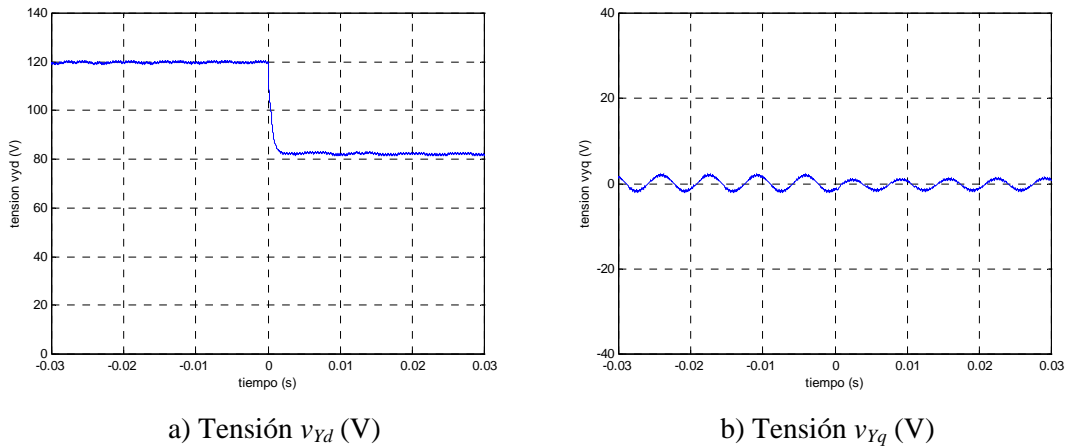


Figura 7.45. Simulación de las tensiones aplicadas a la carga v_{Yd} y v_{Yq} .

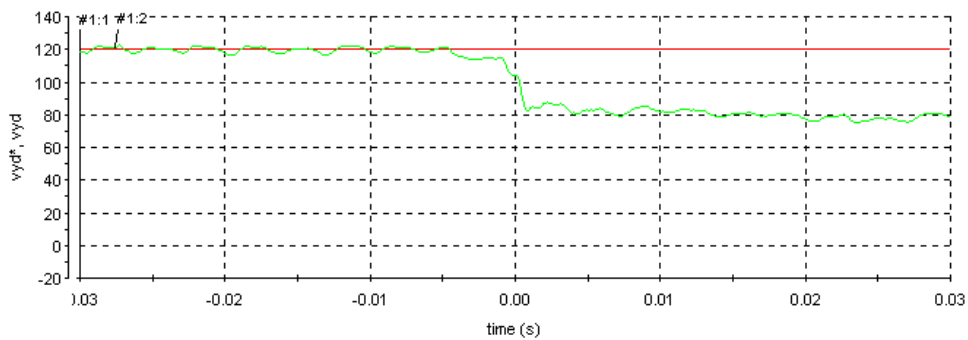


Figura 7.46. Medida experimental de la componente 'd' de la tensión de carga desde *ControlDesk*. Consigna v_{Yd}^* (#1.1 – rojo) y valor actual v_{Yd} (#1.2 – verde).

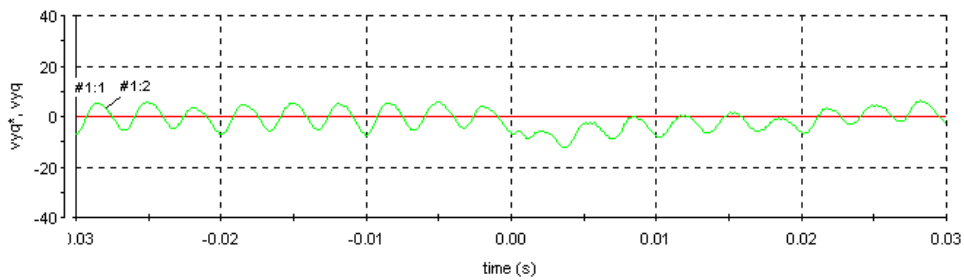


Figura 7.47. Medida experimental de la componente 'q' de la tensión de carga desde *ControlDesk*. Consigna v_{Yq}^* (#1.1 – rojo) y valor actual v_{Yq} (#1.2 – verde).

Se verifica que existe coincidencia entre simulaciones y resultados experimentales en las figuras 7.40-7.47, pero se observa que la respuesta del sistema en las simulaciones es sensiblemente más rápida la obtenida experimentalmente. La causa de esta diferencia debe hallarse en la conexión de la segunda carga resistiva.

Resulta obvio que, en las simulaciones, la conexión de la segunda carga resistiva se realiza de forma brusca. En cambio, en el sistema real, la carga resistiva (ver figura 6.18) está

constituida por diferentes etapas que pueden conectarse o desconectarse mediante relés individuales, además de un interruptor general. Para este ensayo en concreto, el procedimiento ha consistido en accionar el interruptor general, con todas las etapas previamente conectadas, para conseguir la mínima resistencia posible. Sin embargo, la conexión del interruptor general no garantiza que todas las etapas de la carga resistiva se conecten de forma simultánea, probablemente por diferentes retrasos en los relés de cada etapa. En consecuencia, el cambio de resistencia de 16.5 a 11.6 Ω /fase no se realiza de forma brusca, tal como sucede en las simulaciones, sino que se produce de forma progresiva, según se van conectando las diferentes etapas, a lo largo de unos 4 ms.

No obstante, las diferencias entre simulación y resultados experimentales son mínimas, si se observan las tensiones simples de carga (figura 7.48) y corrientes del filtro (figuras 7.49b y 7.51), con respuesta algo más lenta en el ensayo experimental, provocada por la conexión progresiva de la resistencia. Merece la pena resaltar que las corrientes prácticamente no se ven alteradas frente al cambio de carga, a costa de una disminución en las tensiones, lo que confirma que este modo de control puede ser muy efectivo para la protección del convertidor frente a sobrecorrientes.

En cualquier caso, el bus de continua se mantiene equilibrado, tal como muestran las figuras 7.49a y 7.50.

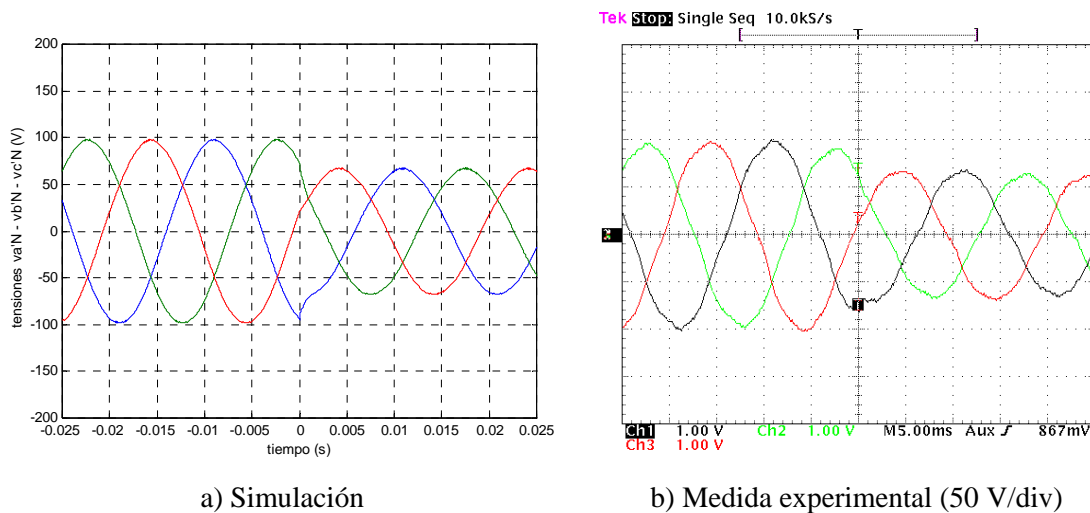


Figura 7.48. Evolución de las tensiones simples aplicadas a la carga (v_{aN} , v_{bN} , v_{cN}).

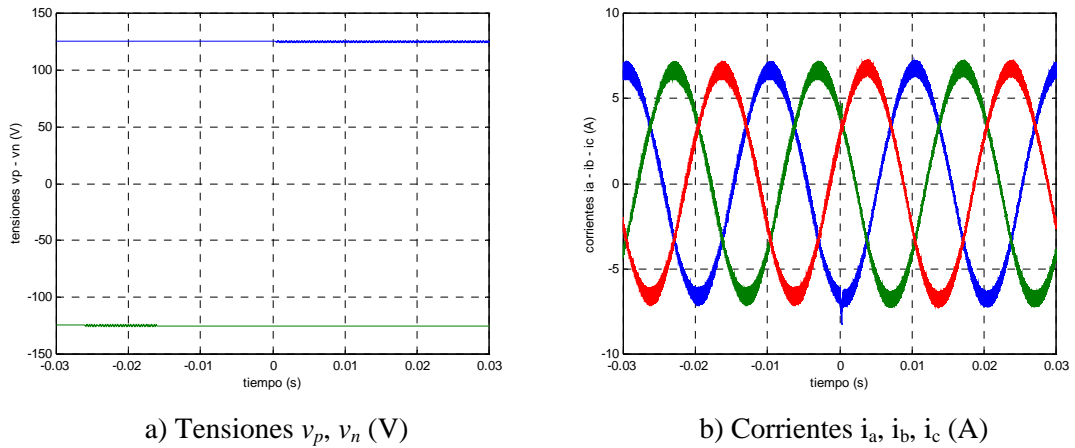


Figura 7.49. Simulación de las tensiones del bus de continua y las corrientes de las bobinas.

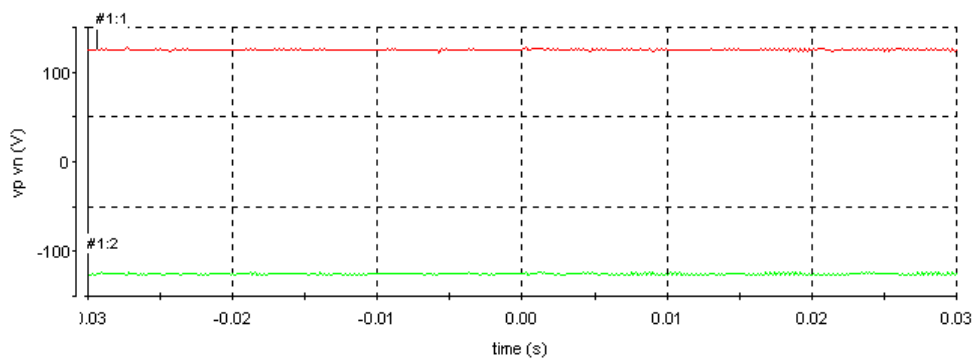


Figura 7.50. Medida experimental de las tensiones del bus de continua desde *ControlDesk*. v_p (#1.1 – rojo) y v_n (#1.2 – verde).

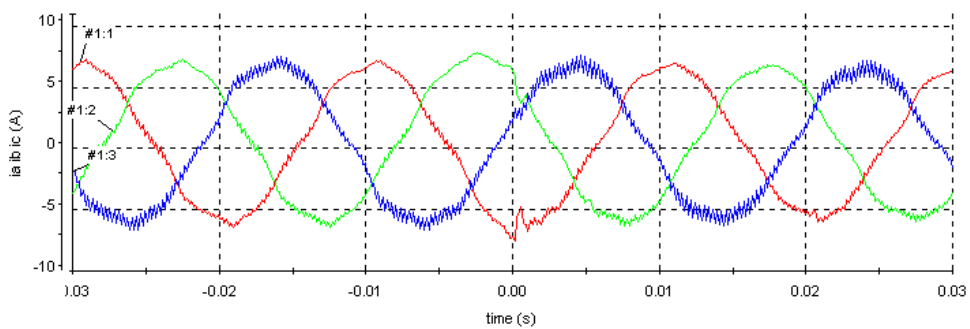
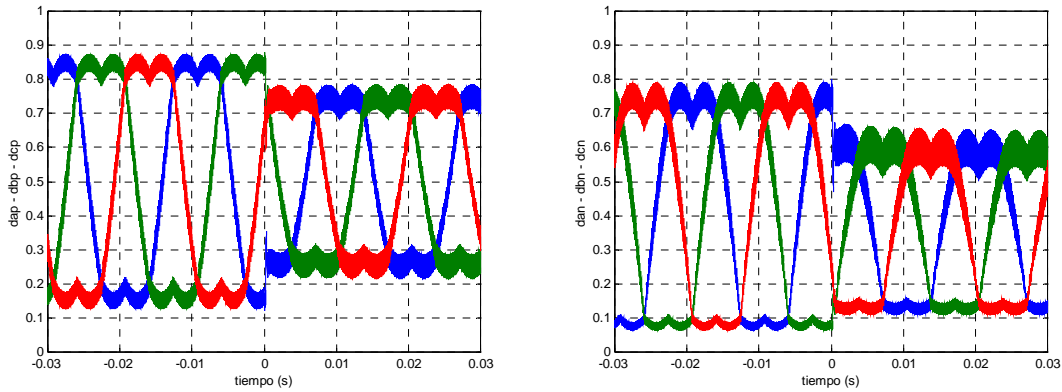


Figura 7.51. Medida experimental de las corrientes de las bobinas (i_a, i_b, i_c) desde *ControlDesk*.

Las relaciones de conducción se mantienen dentro de sus márgenes admisibles, ver figuras 7.52-7.54. La conmutación del controlador de modo tensión a modo corriente no introduce problema alguno en referencia a los límites de las relaciones de conducción. Se observa una buena congruencia entre simulaciones y resultados experimentales.



a) Relaciones de conducción 'p' (d_{ap}, d_{bp}, d_{cp}) b) Relaciones de conducción 'n' (d_{an}, d_{bn}, d_{cn})

Figura 7.52. Simulación de las relaciones de conducción 'abc'.

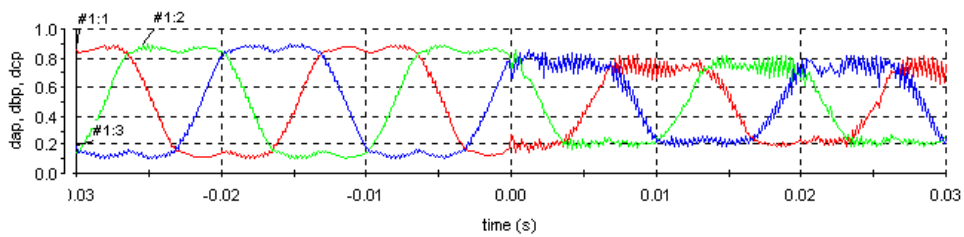


Figura 7.53. Medida experimental de las relaciones de conducción 'p' (d_{ap}, d_{bp}, d_{cp}) desde *ControlDesk*.

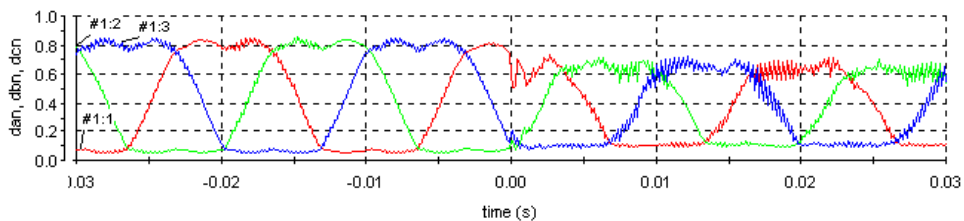


Figura 7.54. Medida experimental de las relaciones de conducción 'n' (d_{an}, d_{bn}, d_{cn}) desde *ControlDesk*.

7.4.2. Desactivación del modo corriente

En este ensayo, el estado inicial coincide con el estado final del estado anterior. La resistencia de carga presenta un valor de $11.6 \Omega/\text{fase}$ y el controlador opera en modo corriente. Se procede a desconectar la segunda carga resistiva, de forma que resistencia de carga pasa de $11.6 \Omega/\text{fase}$ a $16.8 \Omega/\text{fase}$ y el controlador retorna a modo tensión.

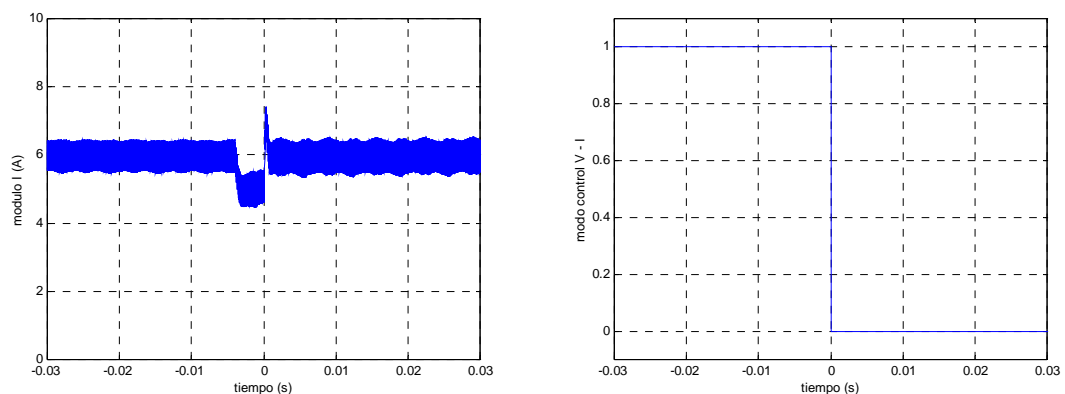
Al igual que en el anterior apartado, las señales representadas están sincronizadas con el cambio del controlador de modo corriente a modo tensión. La desconexión de la carga resistiva se ha producido en un instante previo.

Si se desconecta la carga resistiva empleando el interruptor general, la desconexión se produce de forma gradual, de forma análoga a la conexión y los resultados experimentales obtenidos presentan una respuesta significativamente más lenta que las simulaciones. Se ha preferido, en este apartado, desconectar la carga mediante un interruptor magnetotérmico desconectado manualmente con objeto de conseguir una desconexión más rápida.

Las figuras 7.55-7.56 muestran la evolución del módulo de la intensidad de las corrientes del filtro y del modo de control del controlador. Una vez desconectada la carga, el valor de la resistencia de carga retorna el valor previsto y, con el control aun en modo corriente, la tensión tiende a tomar el valor de consigna, ver 7.57-7.59. Transcurridos aproximadamente 4 ms, el valor de la tensión entra dentro de margen, verificándose las dos condiciones necesarias para la transición a modo tensión (corriente menor que la corriente límite y tensión dentro de margen). El controlador pasa a modo tensión, y la tensión de salida recupera el valor de consigna. Puede observarse que, conmutando la resistencia de forma instantánea, se consigue una buena coincidencia entre simulaciones y resultados experimentales.

Los resultados experimentales presentados obtenidos en las figuras 7.60-7.65 se han obtenido desconectando la segunda resistencia mediante su interruptor general y, por tanto, se ha producido una desconexión gradual de la resistencia. No obstante, se observa una buena coincidencia entre simulaciones y resultados experimentales.

Cabe remarcar que las corrientes prácticamente no alteran su valor, el mantenimiento del equilibrio en el bus de continua, y los valores dentro de sus márgenes admisibles para las relaciones de conducción, incluso con el cambio de controlador.



a) Módulo de la intensidad

b) Indicador del modo de control

Figura 7.55. Simulación de la desactivación del modo corriente.

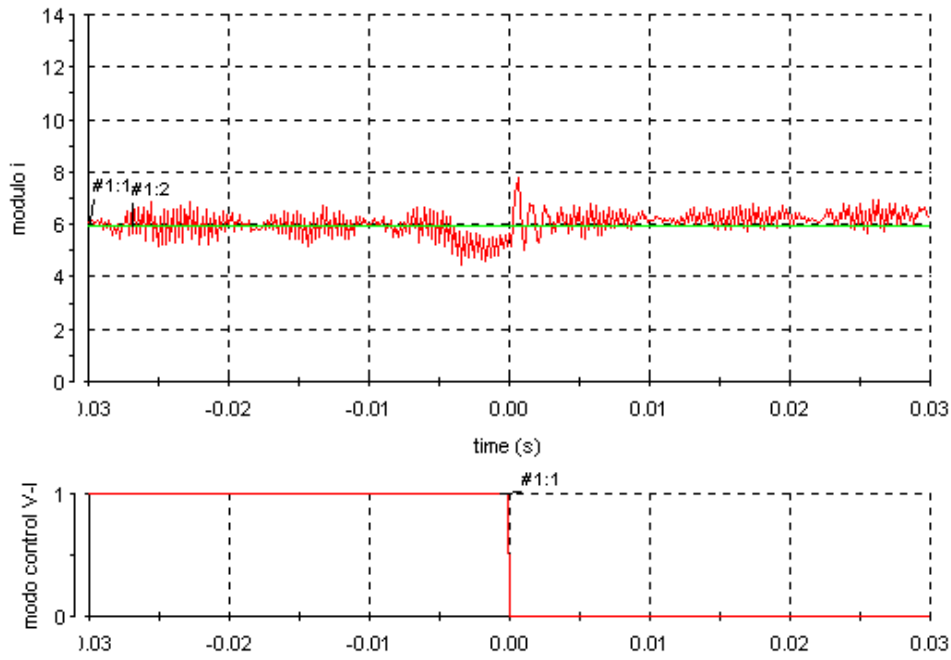
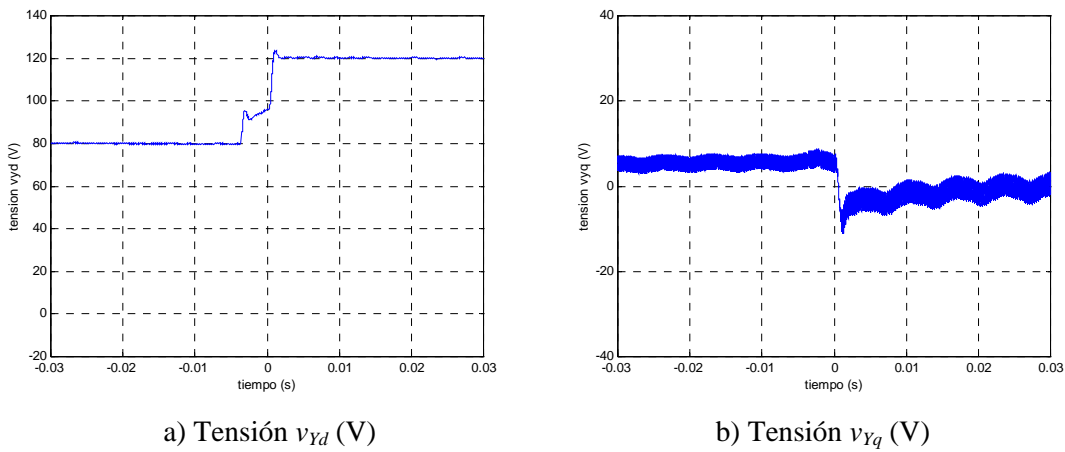


Figura 7.56. Medida experimental del módulo de la corriente y del indicador del modo de control desde *ControlDesk*.



a) Tensión v_{Yd} (V)

b) Tensión v_{Yq} (V)

Figura 7.57. Simulación de las tensiones aplicadas a la carga v_{Yd} y v_{Yq} .

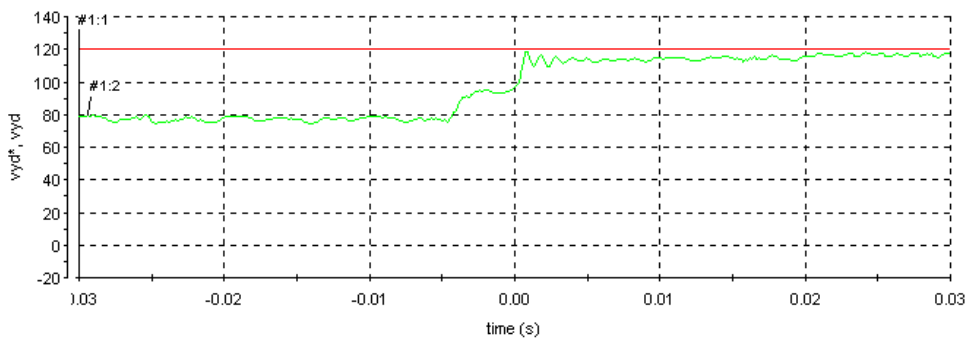


Figura 7.58. Medida experimental de la componente 'd' de la tensión de carga desde *ControlDesk*. Consigna v_{Yd}^* (#1.1 – rojo) y valor actual v_{Yd} (#1.2 – verde).

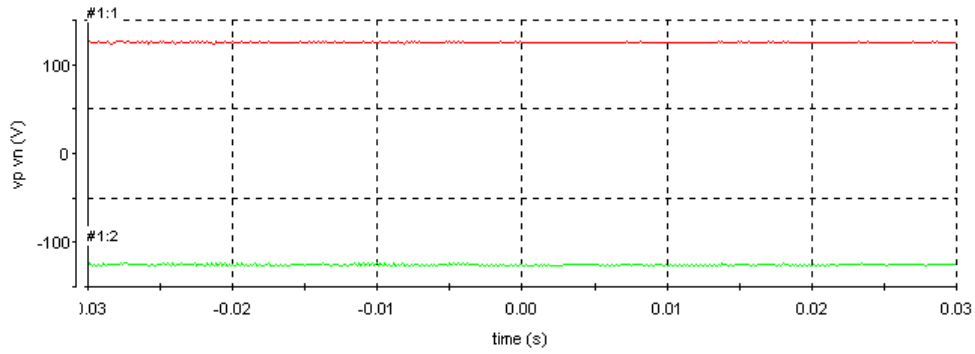
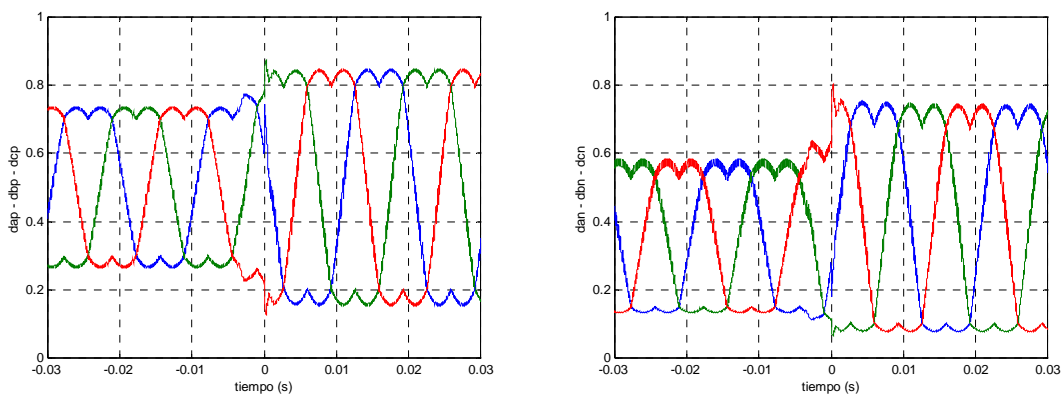


Figura 7.62. Medida experimental de las tensiones del bus de continua desde *ControlDesk*.
 v_p (#1.1 – rojo) y v_n (#1.2 – verde).



a) Relaciones de conducción 'p' (d_{ap} , d_{bp} , d_{cp}) b) Relaciones de conducción 'n' (d_{an} , d_{bn} , d_{cn})

Figura 7.63. Simulación de las relaciones de conducción 'abc'.

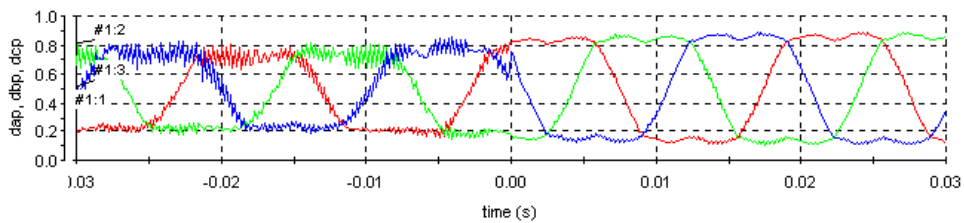


Figura 7.64. Medida experimental de las relaciones de conducción 'p' (d_{ap} , d_{bp} , d_{cp}) desde *ControlDesk*.

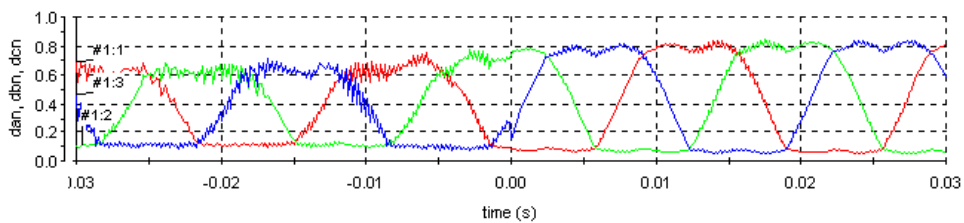


Figura 7.65. Medida experimental de las relaciones de conducción 'n' (d_{an} , d_{bn} , d_{cn}) desde *ControlDesk*.

7.4.3. Observaciones sobre los resultados del control de corriente

Los ensayos efectuados con el control en modo corriente dan lugar a las siguientes observaciones:

- El controlador mantiene equilibrado el bus de continua en todo momento.
- Las relaciones de conducción 'abc' se mantienen dentro de su margen admisible, en todo momento, incluida la transición provocada por la conmutación del controlador.
- Las conmutaciones entre los dos modos del controlador no causan disfunción alguna en el sistema.
- El control en modo corriente se muestra eficaz en la protección contra sobrecorrientes.
- La respuesta del control es rápida y eficaz.
- El DSP requiere 150 μ s para ejecutar el controlador propuesto.
- La conmutación entre controladores puede adaptarse a cada aplicación, si es necesario, y/o pueden incorporarse otros modo de control. Este control es, por tanto, abierto y adaptable.
- Simulaciones y resultados experimentales presentan alguna desviación, causada por la conmutación progresiva de la carga resistiva en el montaje experimental, tal como se ha podido comprobar. Por tanto, se puede afirmar que los modelos de simulación se ajustan apropiadamente al sistema real.

7.5. Inversor NPC con carga no lineal

Uno de los retos más importantes para el funcionamiento de un inversor consiste en mantener la forma de onda senoidal y el valor de la tensión eficaz deseada cuando se alimenta una carga no lineal. Es bien sabido que las corrientes no senoidales absorbidas por este tipo de cargas suponen un obstáculo para un control efectivo del inversor.

Con objeto de comprobar la efectividad del controlador propuesto cuando el inversor alimenta a una carga no lineal, se ha implementado el sistema de la figura 7.66.

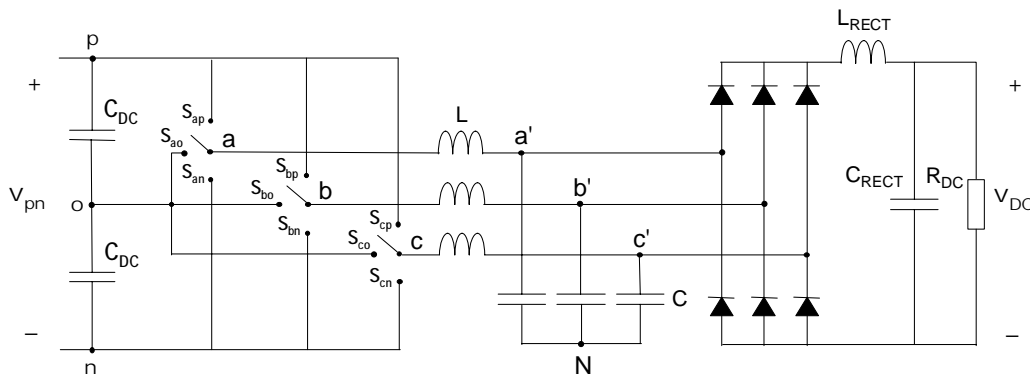


Figura 7.66. Inversor NPC alimentando a un puente rectificador trifásico.

Los valores para el sistema de la figura 7.66 son:

- Inversor: $V_{pn} = 250 \text{ V}$; $C_{DC} = 470 \text{ }\mu\text{F}$; $L = 3 \text{ mH}$; $C = 40 \text{ }\mu\text{F}$; $f = 50 \text{ Hz}$; $f_s = 10 \text{ kHz}$
- Rectificador: $L_{RECT} = 4.4 \text{ mH}$; $C_{RECT} = 33.3 \text{ }\mu\text{F}$; $R_{DC} = 32.5 \text{ }\Omega$ ($R_{AC} = 17.82 \text{ }\Omega$)

Los valores de corriente de saturación son 11 A para la bobina del filtro de alterna (L) y 5 A para la bobina del filtro de continua (L_{RECT}).

Para el cálculo del controlador del inversor NPC, se emplea la aproximación presentada en el apartado 5.7, donde el conjunto constituido por rectificador, filtro de continua y resistencia de carga se considera equivalente a una resistencia trifásica que consume la misma potencia. Aplicando la expresión (5.55), la resistencia trifásica equivalente presenta un valor por fase igual a $17.8 \text{ }\Omega$ (7.9).

$$R_{AC} = \frac{\pi^2}{18} \cdot R_{DC} = \frac{\pi^2}{18} \cdot 32.5 = 17.8 \text{ }\Omega \quad (7.9)$$

Para el cálculo del controlador, se supone que el inversor NPC alimenta la resistencia R_{AC} hallada en (7.9). Se pretende controlar la tensión aplicada al rectificador, en definitiva, la tensión aplicada sobre cualquier carga que se conecte en la salida del inversor NPC. No obstante, es posible plantear otro tipo de regulación. Por ejemplo, realimentando la tensión en bornes de la capacidad de continua (C_{RECT}) sería posible controlar la tensión continua de salida del rectificador.

Resulta imprescindible verificar la efectividad del controlador calculado, simulando el sistema de la figura 7.66. Después de diversas simulaciones, se obtienen los pesos de la función de coste más apropiados (7.10), en combinación con un limitador de rampa en la consigna de valor 50 V/ms.

$$KP_{VVD} = 1e-3 ; KP_{VYQ} = 1e-3 ; KP_{Vo} = 1e-5 ; KI_{VVD} = 1 ; KI_{VYQ} = 1 ; KI_{Vo} = 1e-1 ; W = 1 \quad (7.10)$$

7.5.1. Arranque

Se ha ensayado el arranque del sistema de la figura 7.66 hasta una consigna de 80 V. La elección del valor de consigna se ha visto condicionado por la corriente de saturación de la bobina del filtro de continua (L_{RECT}). La consigna escogida es la máxima para que la bobina del filtro de continua no se sature, con el control propuesto.

La evolución de la tensión mostrada en las figuras 7.67-7.69 muestra que la respuesta del sistema es rápida (alcanza la consigna en 3 ms), sin rebasamientos, sin oscilaciones y que no presenta error estacionario. El rizado de las componentes D-Q de la tensión de carga se ha

incrementado significativamente respecto el caso de carga lineal. Este es un resultado lógico si se tiene en cuenta el contenido armónico de las corrientes absorbidas por el rectificador.

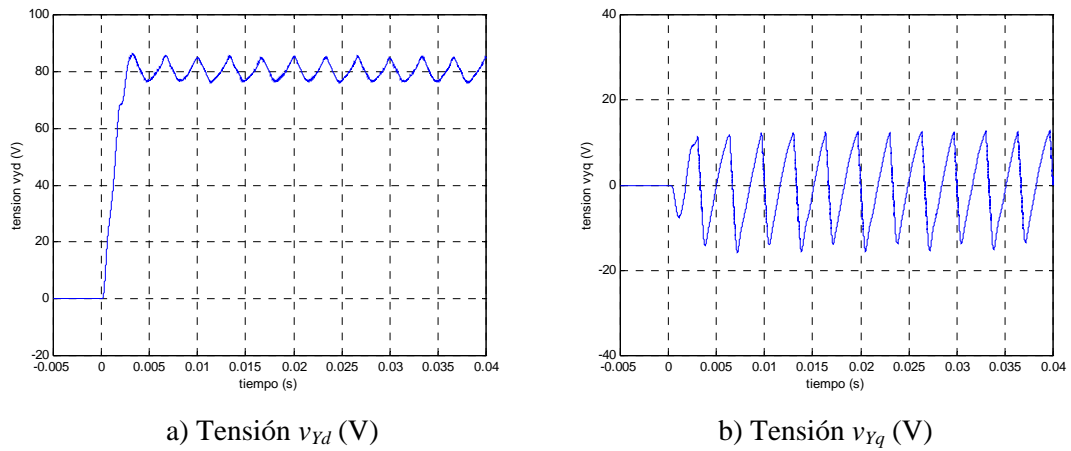


Figura 7.67. Simulación de las tensiones aplicadas a la carga (v_{Yd} , v_{Yq}).

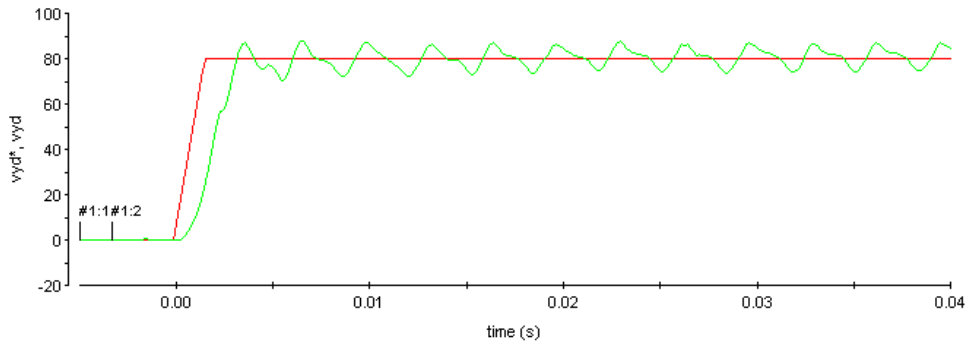


Figura 7.68. Medida experimental de la componente 'd' de la tensión de carga desde *ControlDesk*. Consigna v_{Yd}^* (#1.1 – rojo) y valor actual v_{Yd} (#1.2 – verde).

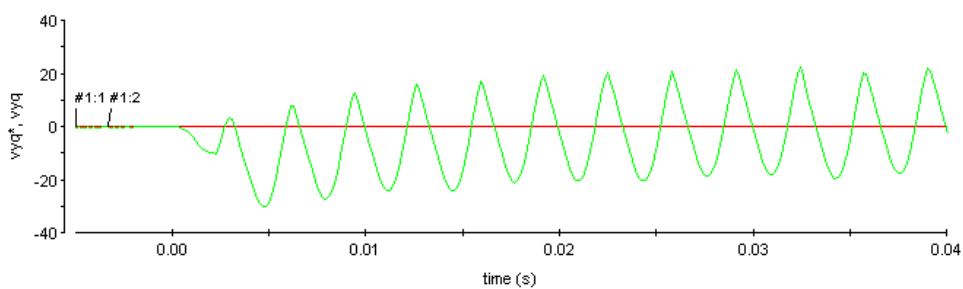
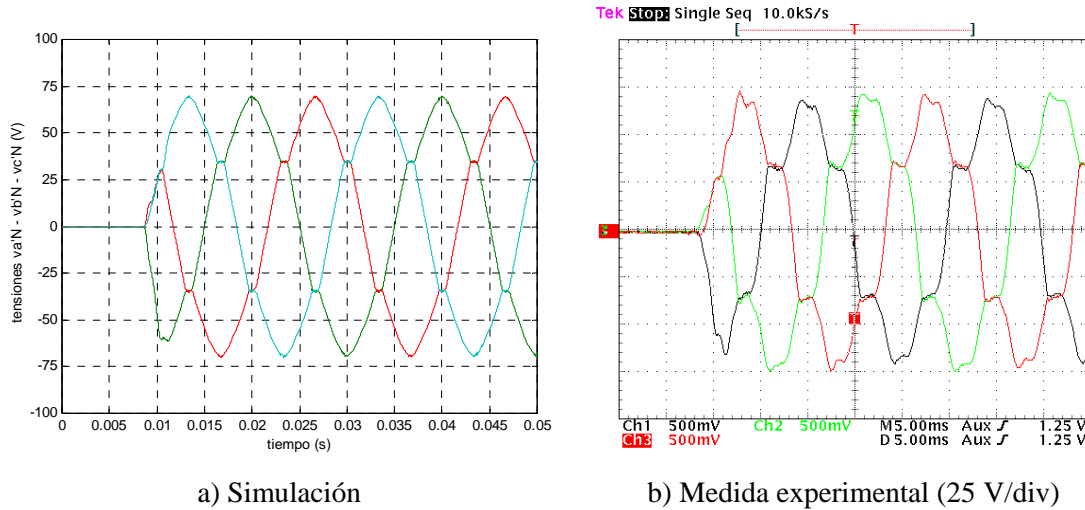


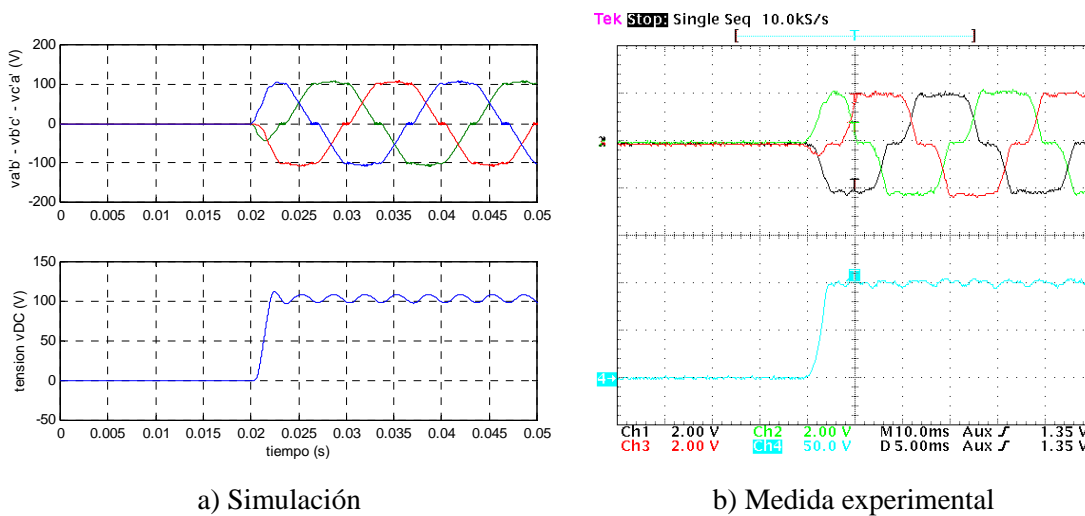
Figura 7.69. Medida experimental de la componente 'q' de la tensión de carga desde *ControlDesk*. Consigna v_{Yq}^* (#1.1 – rojo) y valor actual v_{Yq} (#1.2 – verde).

En las figuras 7.70-7.71 se presentan las tensiones de carga simples y compuestas, sensiblemente deformadas. Se observa que la conmutación entre diodos en el rectificador es una de las principales causas de la deformación de las senoides.

Por otro lado, la figura 7.71 muestra una correcta evolución de la tensión de carga en el rectificador (v_{DC}). Su valor final viene determinado por la tensión trifásica de alimentación. Es importante reiterar que, en el control planteado, se controla la tensión de alterna, no la tensión de carga del rectificador.



a) Simulación
b) Medida experimental (25 V/div)
Figura 7.70. Evolución de las tensiones simples aplicadas a las carga ($v_{a'N}$, $v_{b'N}$, $v_{c'N}$).



a) Simulación
b) Medida experimental
Figura 7.71. Tensiones compuestas en la entrada del rectificador ($v_{a'b'}$, $v_{b'c'}$, $v_{c'a'}$ – 100 V/div –)
y tensión de carga en el rectificador (v_{DC} – 50 V/div –).

En el proceso de arranque, las capacidades presentes en el sistema experimentan un proceso de carga que suele conllevar la absorción de puntas de corriente que pueden saturar las bobinas del circuito. Este fenómeno se muestra claramente en la figura 7.72. Las corrientes del filtro de alterna alcanzan un valor muy inferior a su valor de saturación, pero la corriente del filtro de continua llega justo al valor de corriente de saturación (5 A). Por esta razón, un arranque hasta un valor de consigna mayor de 80 V, con el controlador propuesto, conduce a la saturación de la bobina del filtro de continua.

Frente a este inconveniente, algunas de las diferentes estrategias que pueden implementarse son:

- No cambiar el control, que se muestra efectivo, si el sistema y la bobina admiten su saturación puntual cuando se producen cambios bruscos en la consigna de tensión.
- Ralentizar el arranque limitando apropiadamente la pendiente del limitador de rampa en la consigna de tensión. De esta manera, la carga de las capacidades se realiza más lentamente y absorbe una corriente inferior, pero se reduce la velocidad de respuesta dinámica del sistema.
- Obviamente, instalar bobinas con mayor corriente de saturación o disminuir el valor de las capacidades, si es admisible.
- Incorporar un control en modo corriente que evite la saturación de las bobinas y permita la carga de las capacidades lo más rápidamente que admitan las bobinas.

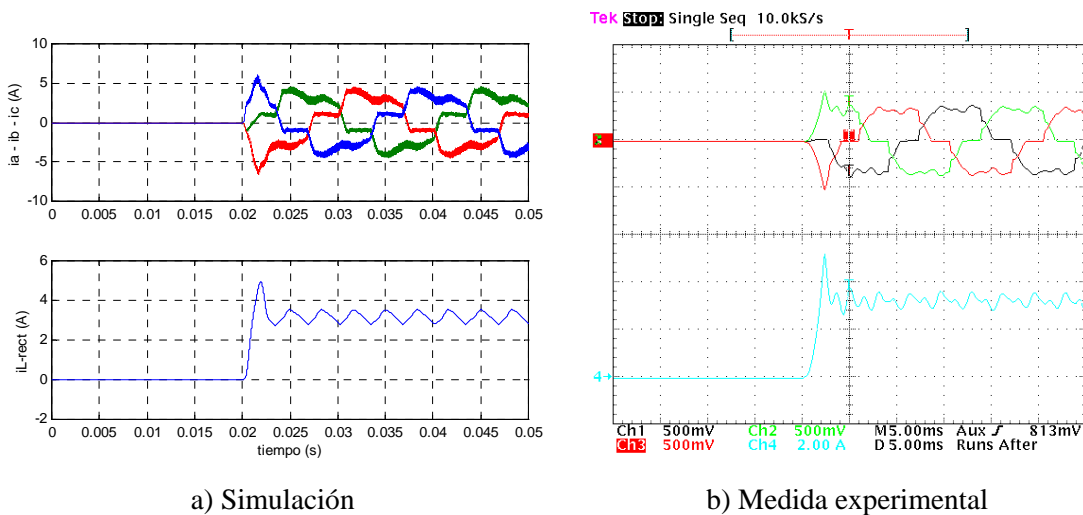
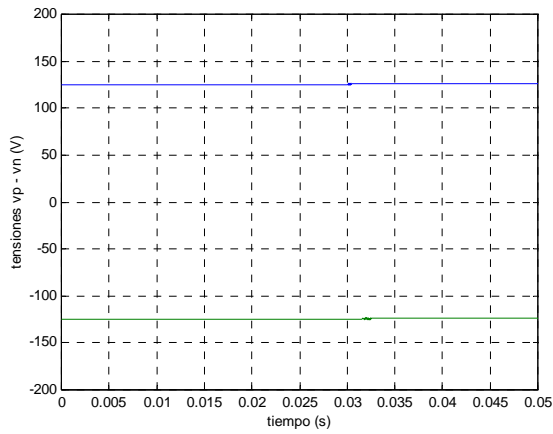


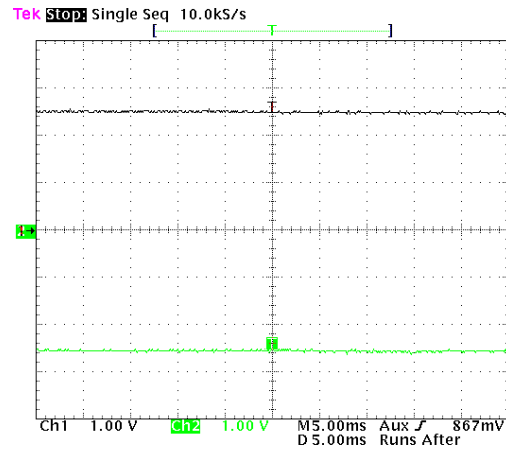
Figura 7.72. Corrientes a través de las bobinas del filtro de alterna (i_a , i_b , $i_c - 5 \text{ A/div} -$) y corriente a través de la bobina de filtro de continua ($i_{LRECT} - 2 \text{ A/div} -$).

El control del equilibrio del bus de continua se muestra efectivo incluso con carga no lineal, ver figura 7.73.

Las relaciones de conducción se hallan comprendidas dentro de sus límites admisibles, tal como se observa en las figuras 7.74-7.77. Se encuentra, además, una buena coincidencia entre simulaciones y resultados experimentales, en todos los casos.

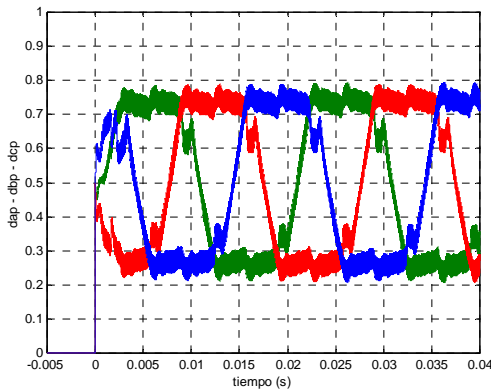


a) Simulación

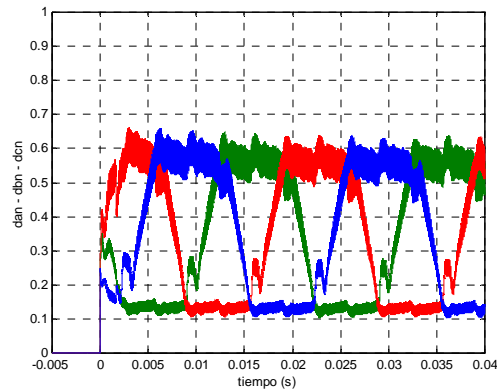


b) Medida experimental (50 V/div)

Figura 7.73. Tensiones del bus de continua (v_p , v_n).



a) Relaciones de conducción 'p' (d_{ap} , d_{bp} , d_{cp})



b) Relaciones de conducción 'n' (d_{an} , d_{bn} , d_{cn})

Figura 7.74. Simulación de las relaciones de conducción 'abc' durante el arranque.

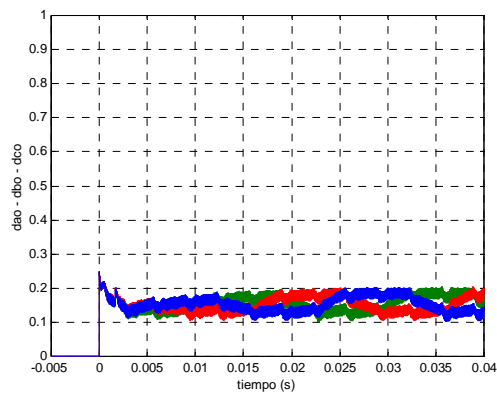


Figura 7.75. Simulación de las relaciones de conducción 'o' (d_{ao} , d_{bo} , d_{co}).

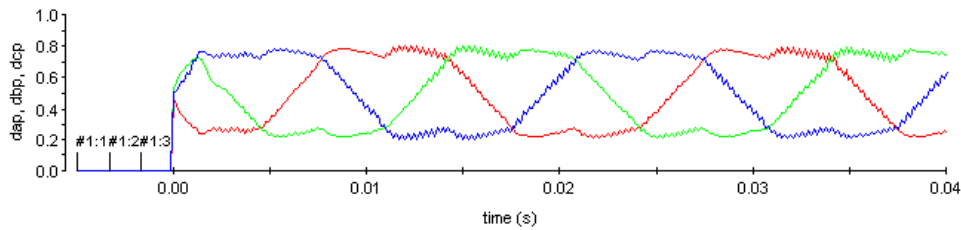


Figura 7.76. Relaciones de conducción 'p' (d_{ap} , d_{bp} , d_{cp}) desde *ControlDesk*.

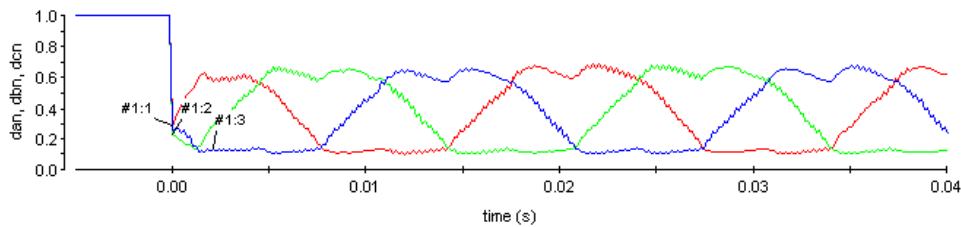


Figura 7.77. Relaciones de conducción 'n' (d_{an} , d_{bn} , d_{cn}) desde *ControlDesk*.

7.5.2. Arranque con activación del modo corriente

Para el sistema de la figura 7.66, en el modo normal de trabajo, se regula la tensión alterna de carga y, en caso de surgir alguna sobreintensidad en el sistema, el controlador conmuta el control de tensión a control de corriente, tal como se ha detallado en el apartado 7.4. Los valores de los pesos para los controladores se hallan en (7.10) para el controlador de tensión y en (7.8) para el controlador de corriente. Se ha seleccionado una banda de histéresis con valores 8 y 9 A para el módulo de la corriente, y un margen de un $\pm 20\%$ para la tensión. El limitador de rampa en la consigna de tensión se ha escogido igual a 80 V/ms.

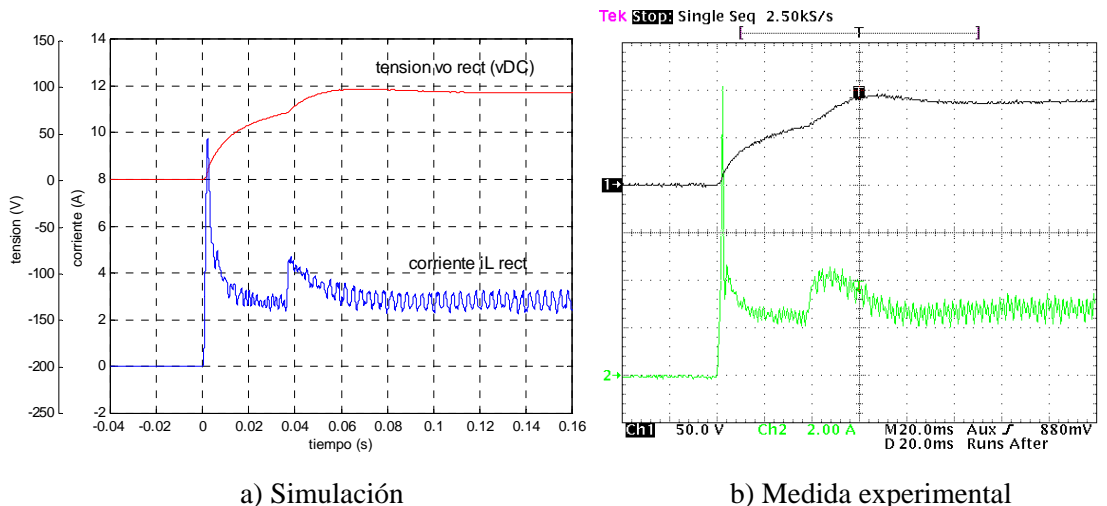
Adicionalmente, se ha sustituido la capacidad del rectificador (C_{DC}) de $33.3 \mu\text{F}$ por otra capacidad de $1000 \mu\text{F}$, con el objetivo de acentuar las puntas de corriente en el arranque.

Se realiza el arranque del sistema hasta una consigna de 70 V. Se observa que la capacidad del rectificador demanda una punta de corriente elevada (figura 7.78), que fuerza puntas de corriente absorbidas por el rectificador (figura 7.79) y que circulan por las bobinas del filtro de alterna (figuras 7.80-7.81). En consecuencia, el módulo de la corriente alcanza el umbral superior de la histéresis definida y el controlador conmuta a modo corriente (figuras 7.82-7.83).

Bajo modo corriente, el controlador fuerza el valor de la corriente a tomar el valor de consigna, evitando las puntas de carga de las capacidades, ver figuras 7.78-7.83. En otros términos, se produce la carga de las capacidades a corriente constante, la tensión crece a la velocidad marcada por la corriente y por el valor capacitivo de los condensadores, tal como se observa en las figuras 7.78 y 7.84-7.87. Cuando el valor de la tensión entre dentro de margen, se produce el retorno a modo tensión. El sistema permanece algo más de 30 ms en modo corriente,

motivado esencialmente por el gran valor de la capacidad del rectificador ($C_{DC} = 1000 \mu\text{F}$). Obviamente, la respuesta dinámica de la tensión es lenta, como consecuencia de limitar la corriente mediante el control en modo corriente. No es posible una respuesta más rápida a menos que se incremente la corriente a través del sistema.

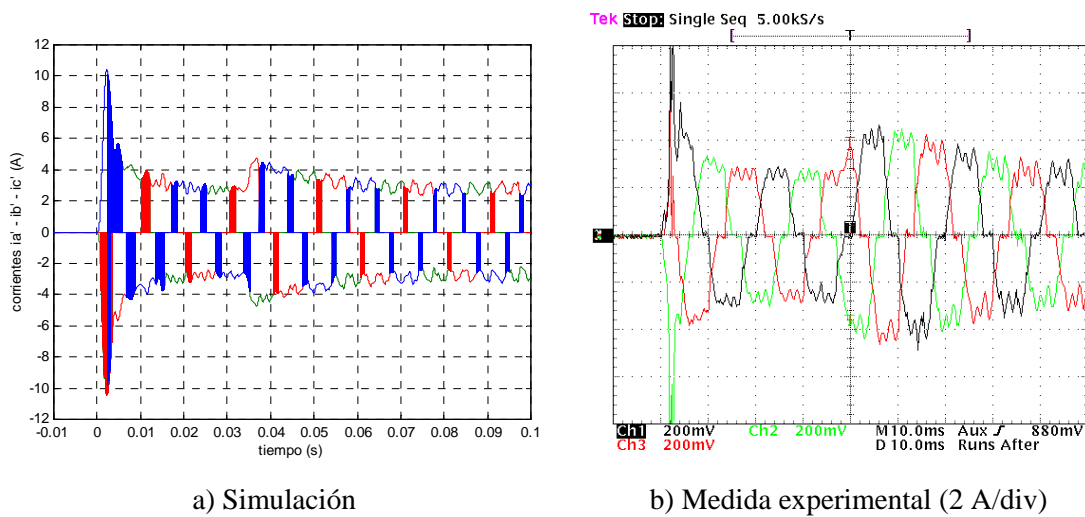
Para finalizar este apartado, se comprueba que el bus de continua se mantiene equilibrado (figura 7.88) y que las relaciones de conducción se hallan dentro de sus márgenes admisibles, ver figuras 7.89-7.91.



a) Simulación

b) Medida experimental

Figura 7.78. Tensión de salida del rectificador (v_{DC}) y corriente a través de la bobina del rectificador ($i_{L_{RECT}}$).



a) Simulación

b) Medida experimental (2 A/div)

Figura 7.79. Corrientes absorbidas por el rectificador (i_a , i_b , i_c).

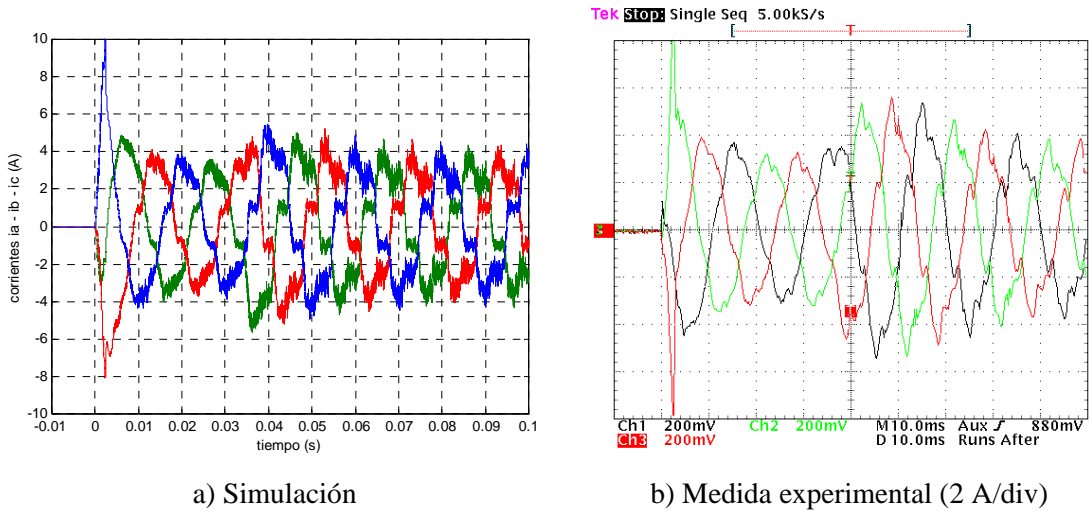


Figura 7.80. Corrientes a través de las bobinas del filtro de alterna (i_a , i_b , i_c).

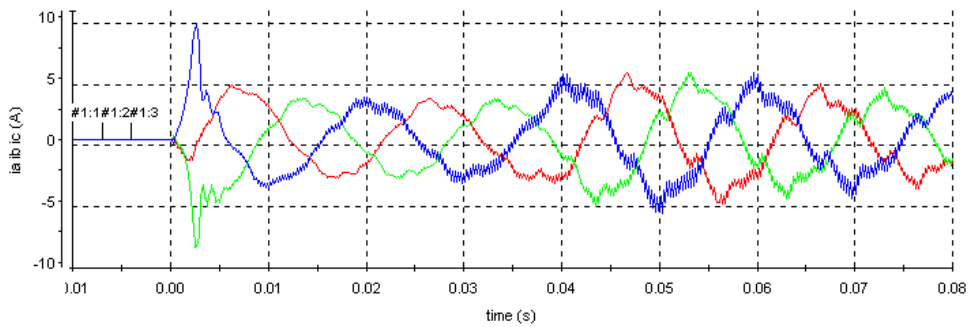


Figura 7.81. Medida experimental de las corrientes de las bobinas (i_a , i_b , i_c) desde *ControlDesk*.

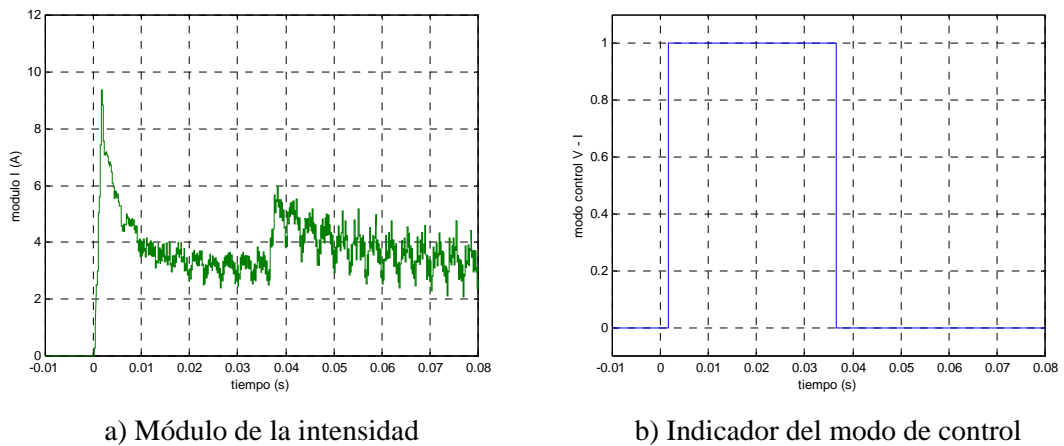


Figura 7.82. Simulación de la conmutación entre modos de control del controlador.

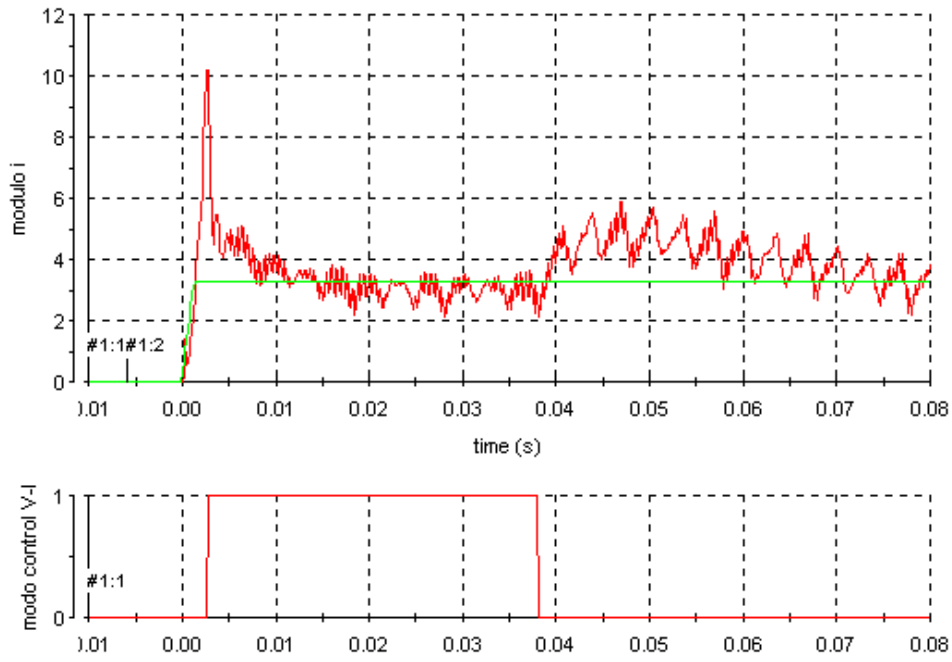
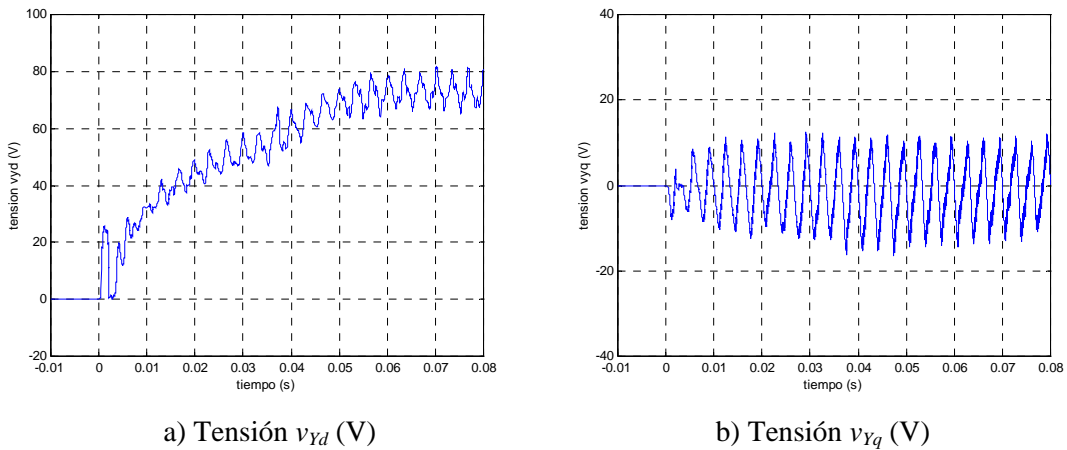


Figura 7.83. Módulo de la corriente y del indicador del modo de control desde *ControlDesk*.



a) Tensión v_{Yd} (V)

b) Tensión v_{Yq} (V)

Figura 7.84. Simulación de las tensiones aplicadas a la carga (v_{Yd} , v_{Yq}).

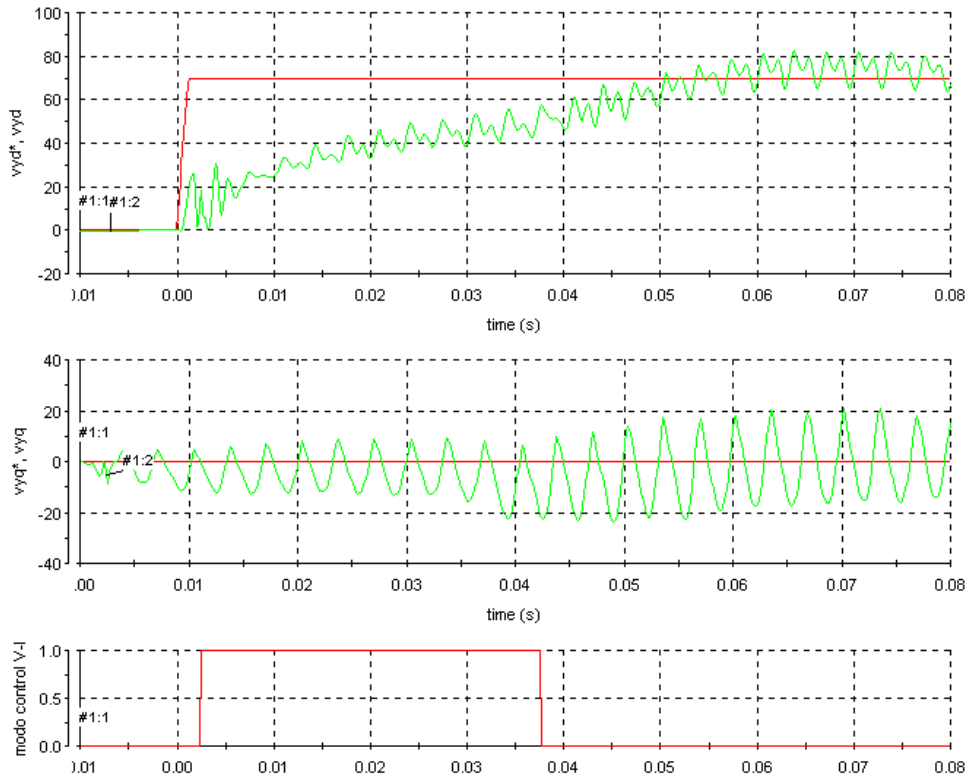


Figura 7.85. Evolución de la tensión alterna de carga en el dominio D-Q desde *ControlDesk*.

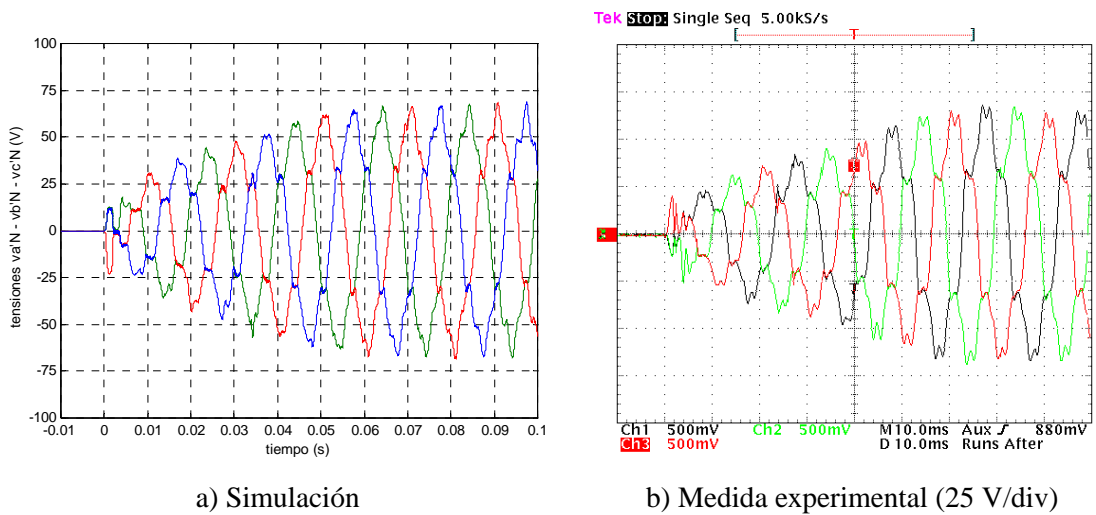


Figura 7.86. Tensiones simples en la entrada del rectificador (v_{aN} , v_{bN} , v_{cN}).

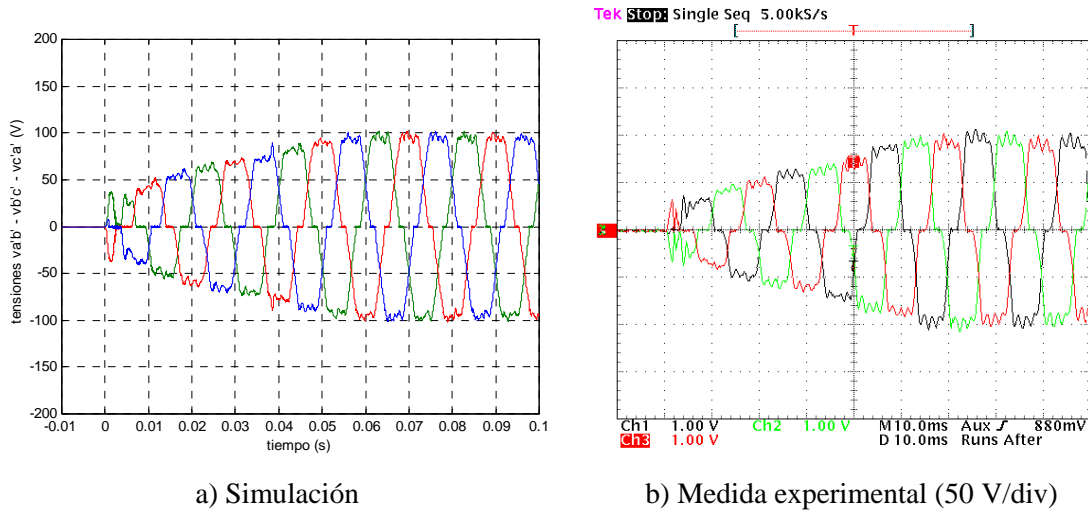


Figura 7.87. Tensiones compuestas en la entrada del rectificador (v_{ab} , v_{bc} , v_{ca}).

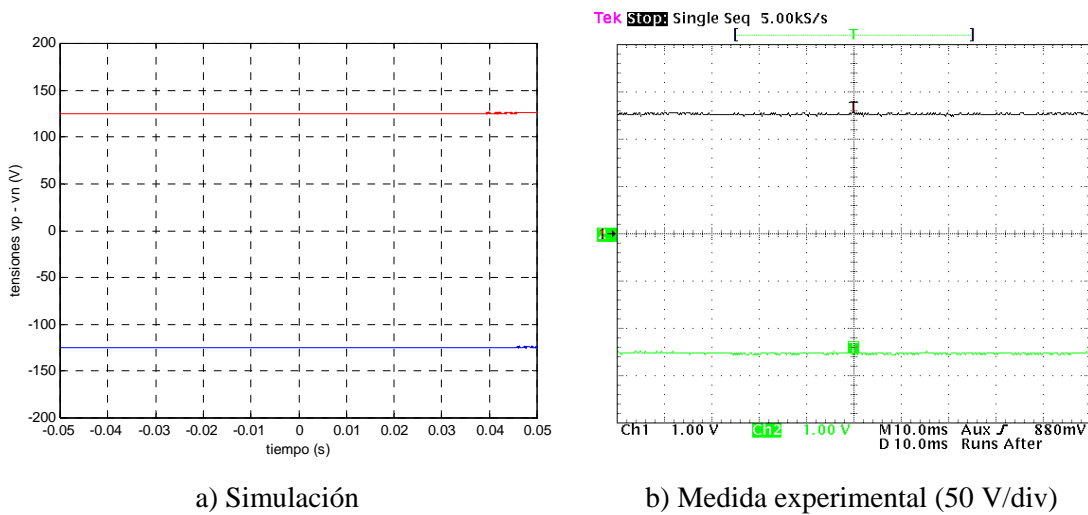


Figura 7.88. Tensiones del bus de continua (v_p , v_n).

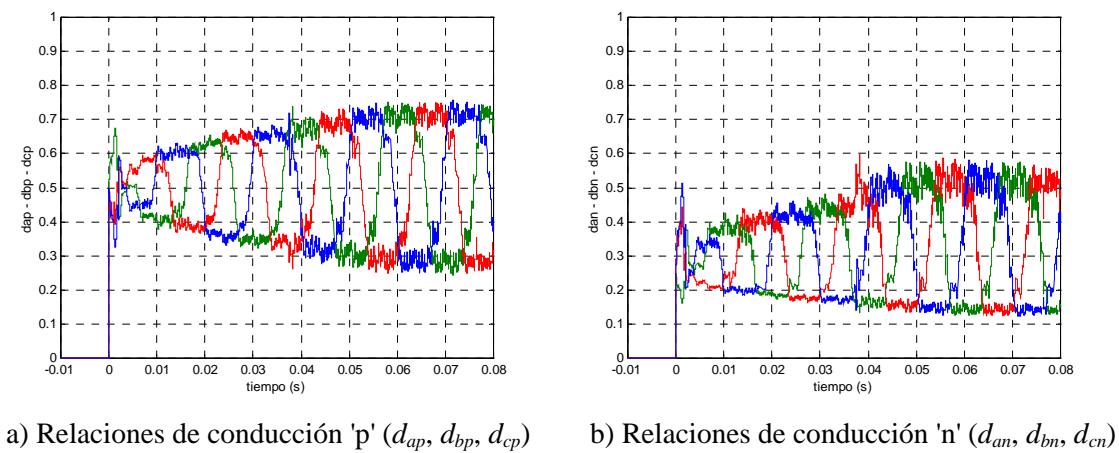


Figura 7.89. Simulación de las relaciones de conducción 'abc' durante el arranque.

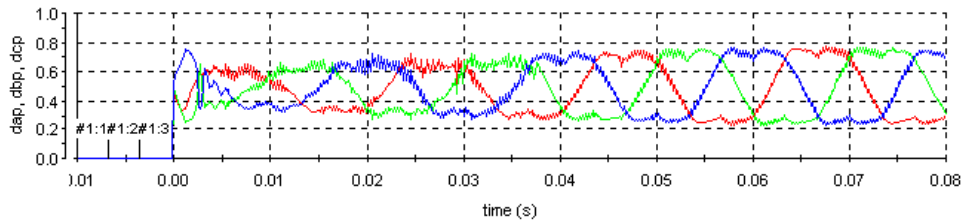


Figura 7.90. Relaciones de conducción 'p' (d_{ap} , d_{bp} , d_{cp}) desde *ControlDesk*.

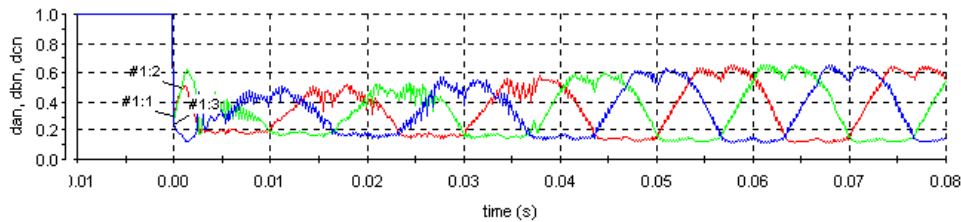


Figura 7.91. Relaciones de conducción 'n' (d_{an} , d_{bn} , d_{cn}) desde *ControlDesk*.

7.5.3. Observaciones sobre los resultados obtenidos con carga no lineal

Los ensayos realizados permiten apuntar algunos aspectos de interés:

- El control propuesto se muestra efectivo en la alimentación de una carga no lineal. Sus prestaciones (tiempo de respuesta, ausencia de oscilaciones, ausencia de rebasamiento, error estacionario nulo) lo validan para su aplicación en este tipo de sistemas.
- El DSP requiere 150 μ s para ejecutar el controlador propuesto.
- El controlador mantiene equilibrado el bus de continua bajo cualquier condición de operación.
- Las relaciones de conducción se hallan dentro de sus márgenes admisibles en todo momento.
- Las corrientes no senoidales absorbidas por la carga no lineal deforman la tensión entregada por el convertidor NPC, incrementando significativamente los rizados en las variables en el dominio D-Q respecto la carga lineal.
- El comportamiento del sistema y del control depende del valor de los componentes pasivos, que condicionan la calidad de la tensión entregada por el convertidor y la respuesta dinámica del sistema.
- En particular, se han visto las limitaciones que las corrientes de saturación de las bobinas introducen en el sistema y se han propuesto estrategias para compensar estas limitaciones.
- Entre otras opciones, es posible incorporar el modo corriente al controlador para eliminar las puntas de corriente en los cambios bruscos de consigna y ofrecer la respuesta dinámica más rápida.
- En cualquier caso, el controlador puede ser adaptado a las necesidades concretas de cada aplicación.

7.6. Convertidor NPC con conexión a red

Con objeto de comprobar el comportamiento del controlador sobre un sistema con conexión a red, se ha montado y ensayado el sistema de la figura 7.92. La fuente de corriente continua puede modelar diversos sistemas, desde una bobina superconductor (SMES) hasta un sistema fotovoltaico, tal como se ha presentado en el Capítulo 5.

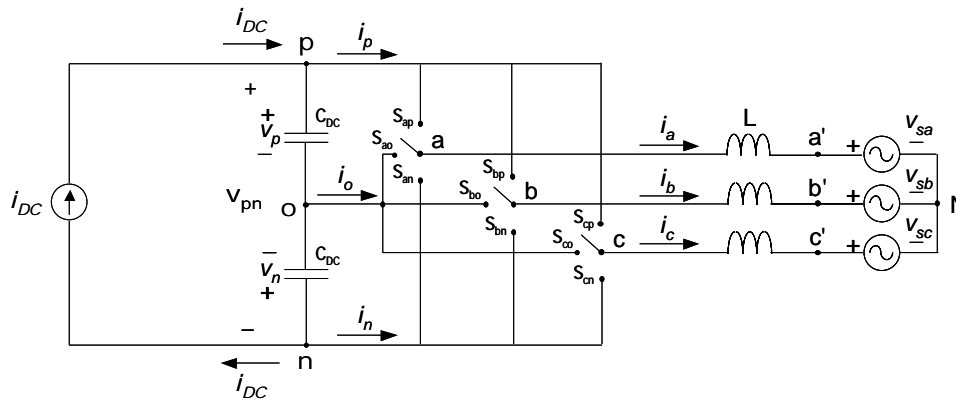


Figura 7.92. Convertidor NPC con conexión a red.

Los valores para el sistema de la figura 7.92 son:

- Convertidor NPC: $C_{DC} = 100 \mu\text{F}$; $L = 5 \text{ mH}$; $f_s = 9 \text{ kHz}$
- Red: $f = 50 \text{ Hz}$; $(V_{simple})_{RMS} = 20 \text{ V}$

La fuente de corriente se ha implementado mediante una fuente de continua trabajando como fuente de corriente. No obstante, esta fuente presenta una capacidad de salida de 2.55 mF, que debe añadirse en el bus de continua y que influye en el comportamiento dinámico de la tensión total del bus de continua (v_{pn}).

Este ensayo se realiza a baja potencia. Se prevé una potencia máxima aproximada de 500 W en el convertidor ($v_{pn} = 150 \text{ V}$, $i_{DC} = 3.3 \text{ A}$). Las tensiones trifásicas (v_{sa} , v_{sb} , v_{sc}) son de pequeño valor (20 V_{RMS}) y se obtienen mediante un transformador trifásico a partir de la red trifásica convencional.

En el Capítulo 5 se halla extensamente detallado el proceso de cálculo del controlador para este sistema. Se verá que los pesos asignados para el cálculo del controlador empleado en este experimento no son los más apropiados. Tampoco se ha incorporado limitador de rampa en la consigna de la tensión total del bus de continua, lo que empeora la respuesta del sistema. Se comprobará que, aun con estos inconvenientes, el sistema presenta una respuesta admisible. Los pesos de la función de coste empleados en este apartado se muestran en (7.11).

$$KP_{iYD} = KP_{iYQ} = 1 ; KP_{v_{pn}} = KP_{v_o} = 0.01 ; KI_{iYQ} = 3e4 ; KI_{v_{pn}} = KI_{v_o} = 30 ; W = 100 \quad (7.11)$$

7.6.1. Régimen permanente

Los resultados de régimen permanente se han obtenido con una corriente continua de entrada (i_{DC}) igual a 1.3 A y una consigna del bus de continua (v_{pm}) de 100 V, resultando en una potencia de 130 W.

Las tensiones simples de red (v_{sa} , v_{sb} , v_{sc}) se muestran en la figura 7.93b. En comparación con el sistema trifásico simulado (figura 7.93a), se observa que el sistema trifásico real presenta un ligero desequilibrio, teniendo en cuenta el pequeño valor de las tensiones.

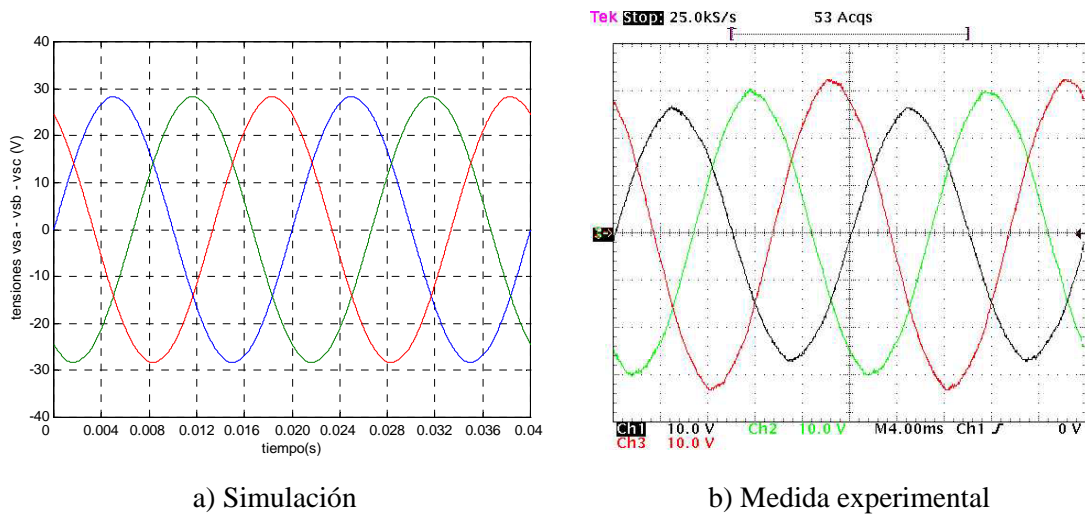


Figura 7.93. Tensiones simples de red.

La figura 7.94 muestra las corrientes entregadas a la red. Las simulaciones se han realizado teniendo en cuenta el desequilibrio de las tensiones de red, de ahí la coincidencia entre simulación y medida experimental. En caso de simular el sistema considerando tensiones de red equilibradas, se obtienen las corrientes presentadas en la figura 7.95.

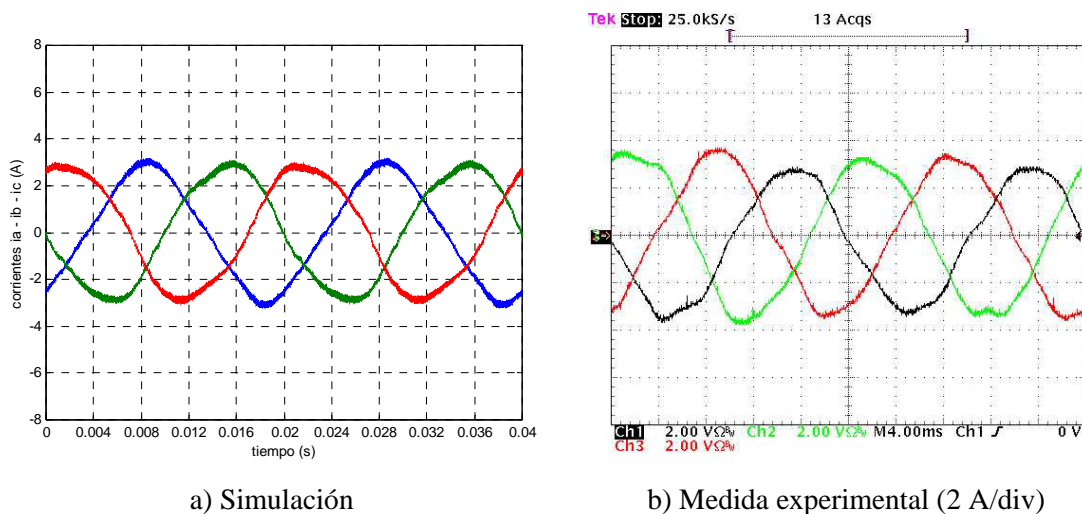


Figura 7.94. Corrientes entregadas a la red trifásica (i_a , i_b , i_c).

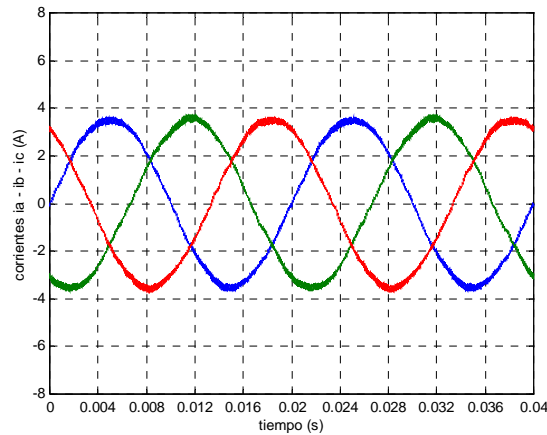
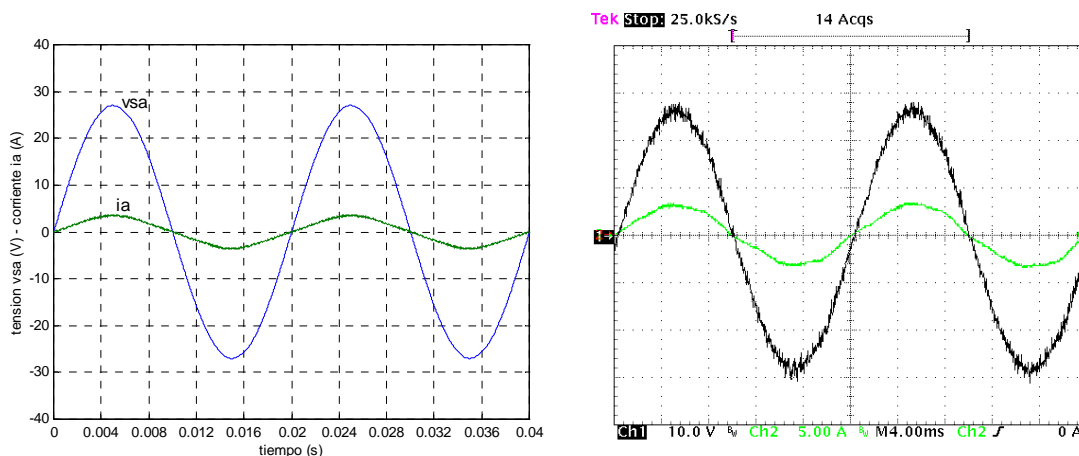


Figura 7.95. Simulación de las corrientes entregadas a la red trifásica (i_a , i_b , i_c), considerando tensiones de red equilibradas.

En los sistemas en conexión a red, uno de los objetivos habituales consiste en controlar el factor de potencia y, en particular, conseguir factor de potencia unitario. En la figura 7.96 se observa que el controlador propuesto alcanza este objetivo, puesto que tensión y corriente están en fase.



a) Simulación

b) Medida experimental

Figura 7.96. Tensión simple (v_{sa}) y corriente (i_a) de la fase 'a'.

Sobre la distorsión armónica de la corriente, es conveniente realizar un análisis adicional, teniendo en cuenta que se desea una corriente con distorsión nula. El control se ha implementado sobre el DSP dSPACE 1102, que requiere un tiempo de cálculo de 400 μ s para ejecutar la rutina de control. Adicionalmente, puesto que el DSP no dispone de entradas analógicas suficientes para realimentar directamente todas las variables medidas, se ha realizado un multiplexado de las variables medidas. En consecuencia, las lecturas de las variables medidas se refrescan en el DSP cada 1.2 ms, un tiempo elevado en un sistema electrónico.

Atendiendo a los anteriores comentarios, la simulación del sistema bajo las anteriores condiciones da como resultado una distorsión armónica total de la corriente $THD = 8.87\%$ (figura 7.94a), valor cercano al obtenido en el resultado experimental ($THD = 8.19\%$, figura 7.94b). Si las simulaciones se realizan considerando que el tiempo empleado por el DSP en ejecutar la rutina de control es de $200\ \mu\text{s}$, la distorsión armónica es de $THD = 6.87\%$. Adicionalmente, si se asume que las tensiones trifásicas están equilibradas, la distorsión armónica de la corriente (figura 7.95) cae a $THD = 3.39\%$. Se deduce, por tanto, que la distorsión armónica de la corriente se debe en parte a la lentitud del DSP en ejecutar el control y en parte al desequilibrio de las tensiones de red.

Se ha medido el rendimiento del sistema para diferentes potencias de entrada, resultados que se muestran en la figura 7.97. El rendimiento es superior al 90% en todo el rango de potencia experimentado.

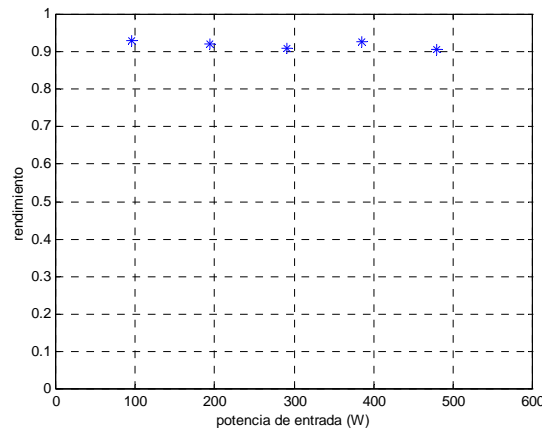


Figura 7.97. Rendimiento del sistema en función de la potencia de entrada.

7.6.2. Cambio en la tensión total del bus de continua

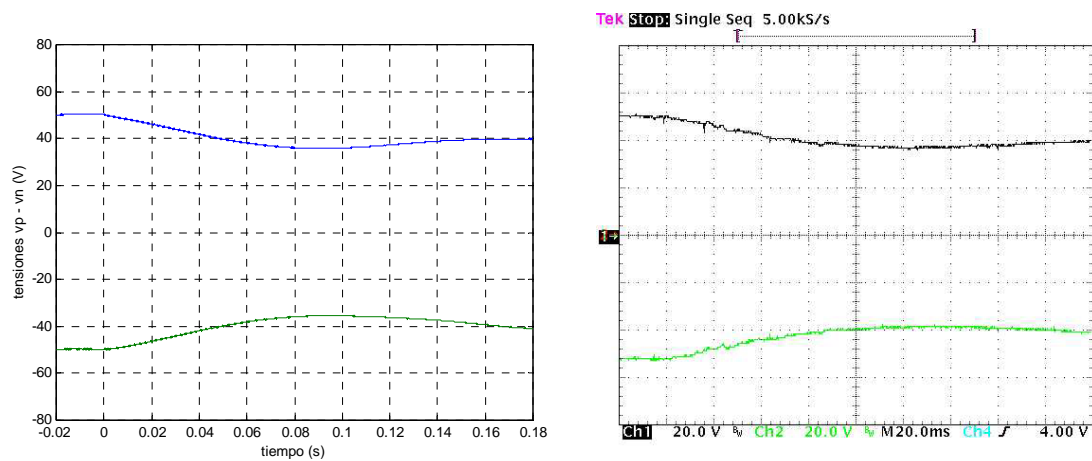
Para el sistema de la figura 7.92, con una corriente de entrada (i_{DC}) igual a $0.5\ \text{A}$, se aplica un escalón en la consigna de la tensión total del bus de continua (v_{pn}) de $100\ \text{V}$ a $80\ \text{V}$, con el objetivo de adaptar la potencia que se entrega desde la fuente de corriente (sistema fotovoltaico, bobina superconductora en SMES) a la red.

En la figura 7.98 se aprecia el bus de continua equilibrado ($v_{pn} = 100\ \text{V}$, $v_p = -v_n = 50\ \text{V}$) en los instantes previos al cambio de consigna. Una vez realizado el cambio de consigna, las tensiones se adaptan a su nuevo valor ($v_{pn} = 80\ \text{V}$, $v_p = -v_n = 40\ \text{V}$) en unos $180\ \text{ms}$, con un rebasamiento significativo.

La respuesta del sistema frente al cambio de consigna es lenta, a causa de la elevada capacidad de salida de la fuente de continua empleada como fuente de corriente ($2.55\ \text{mF}$). Esta

capacidad afecta a la dinámica de la tensión total del bus de continua (v_{pn}), pero no afecta a la dinámica del punto medio del bus de continua, que depende de las capacidades del convertidor (100 μ F). La capacidad de la fuente de tensión se ha incorporado en las simulaciones efectuadas, con objeto de simular el sistema real con la máxima fidelidad posible.

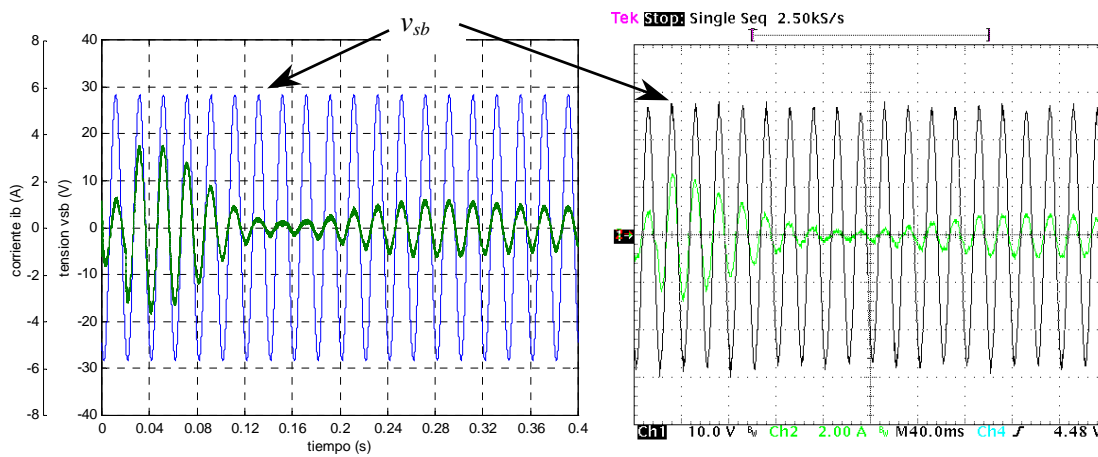
En la figura 7.99 se presentan la tensión simple de red y la corriente entregada a la red durante el transitorio. Se observa que, en todo momento, tensión y corriente se hallan en fase y el factor de potencia es unitario. La corriente evoluciona con una oscilación considerable hasta alcanzar el estado estacionario.



a) Simulación

b) Medida experimental

Figura 7.98. Evolución de las tensiones del bus de continua (v_p , v_n).



a) Simulación

b) Medida experimental

Figura 7.99. Evolución de la tensión simple (v_{sb} – forma de onda mayor) y la corriente (i_b – forma de onda menor) de la fase 'b'.

En las figuras 7.98-7.99 se observa una indeseable componente oscilatoria en la respuesta del sistema. Tal oscilación obedece a dos causas: excesivo valor del peso de la acción integral para la tensión total del bus de continua ($KI_{v_{pn}}$) y la ausencia de limitador de rampa en la consigna de

la tensión total del bus de continua. Redimensionando apropiadamente estos valores, puede mejorarse la respuesta del sistema, atendiendo a los resultados de simulación obtenidos en el apartado 5.8 del Capítulo 5.

No obstante, aunque es mejorable, la respuesta obtenida del sistema es admisible, teniendo en cuenta que la dinámica de los sistemas solares es lenta.

7.6.3. Observaciones sobre los resultados obtenidos en la conexión a red

De forma análoga a las aplicaciones estudiadas con anterioridad, se realizan algunas observaciones de interés sobre los resultados obtenidos:

- El controlador se muestra efectivo y es capaz de asegurar el equilibrio del bus de continua, el factor de potencia unitario y regular la potencia entregada a la red (mediante el control de la tensión total del bus de continua) en régimen permanente y transitorio.
- Las relaciones de conducción se mantienen dentro de su margen admisible en todo momento.
- En la implementación realizada, el DSP (dSPACE 1102) invierte 400 μ s en ejecutar la rutina de control. En este DSP, es necesario multiplexar las entradas analógicas, de forma que los valores de las señales realimentadas se refrescan cada 1.2 ms.
- Los contenidos armónicos de las corrientes de red empeoran cuanto mayor es el tiempo que emplea el DSP en ejecutar la rutina de control. Adicionalmente, el desequilibrio de las tensiones de red introduce un mayor contenido armónico.
- Los pesos del controlador propuesto no son los más apropiados, pero la respuesta del sistema, aunque presenta oscilaciones, puede considerarse admisible. En cualquier caso, demuestra que el control puede ser apto incluso con una elección poco óptima de los pesos.

7.7. Análisis de los contenidos armónicos

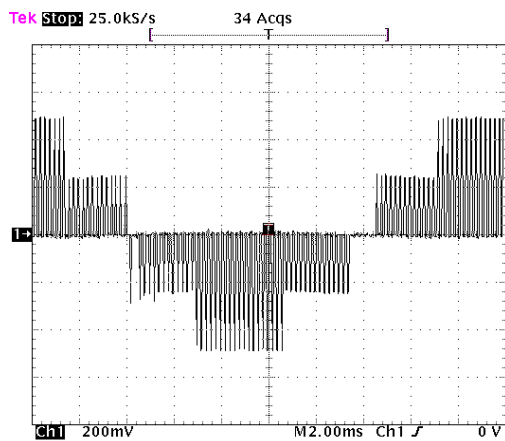
De forma complementaria, se analizan los contenidos armónicos de algunas de las señales del convertidor, si bien en el apartado 7.6 ya se han comentado algunas características de los contenidos armónicos. Para este análisis, es preferible distinguir el tipo de carga empleada, puesto que condiciona la presencia o no de armónicos de baja frecuencia.

7.7.1. Inversor NPC con filtro LC y carga resistiva

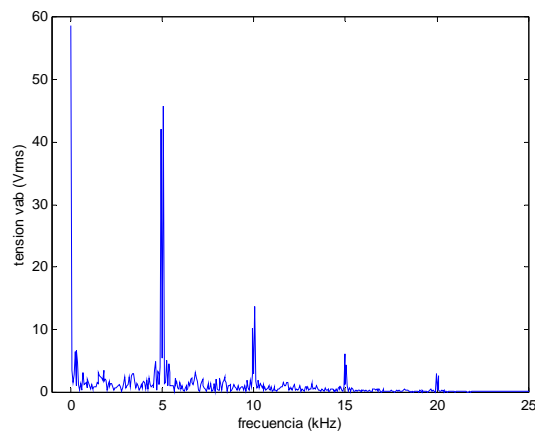
Para el sistema de la figura 7.1, se muestra la tensión compuesta de salida del convertidor NPC (v_{ab}), así como su espectro armónico, para diferentes valores de consigna, en las figuras

7.100-7.102. Teniendo en cuenta que la frecuencia de conmutación es de 10 kHz, y que se ha escogido una estrategia de modulación PWM simétrica, los espectros armónicos obtenidos se aproximan al espectro armónico esperado en este tipo de modulación, mostrado en la figura 4.19. No obstante, el empleo de la rutina de generación automática de las relaciones de conducción a secuencia cero (d_{p0} , d_{n0}) incrementa significativamente la componente armónica a la mitad de la frecuencia de conmutación (5 kHz).

Los valores de distorsión armónica total mostrados en la tabla 7.8 son los esperados para este tipo de señal. Se observa que la distorsión disminuye conforme se incrementa el índice de amplitud.

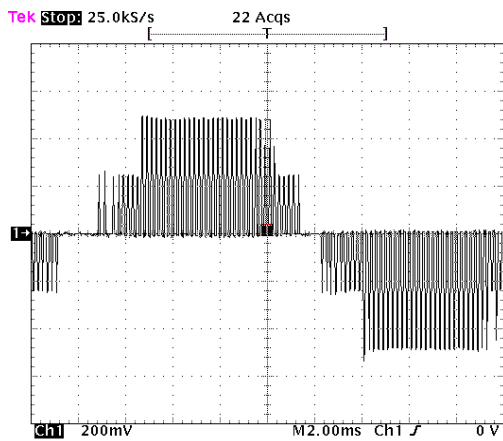


a) Medida experimental (100 V/div).

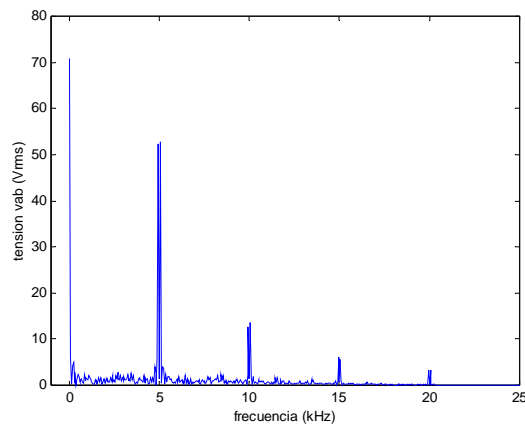


b) Espectro armónico.

Figura 7.100. Tensión compuesta de salida del convertidor NPC (v_{ab}). Consigna 41 V.

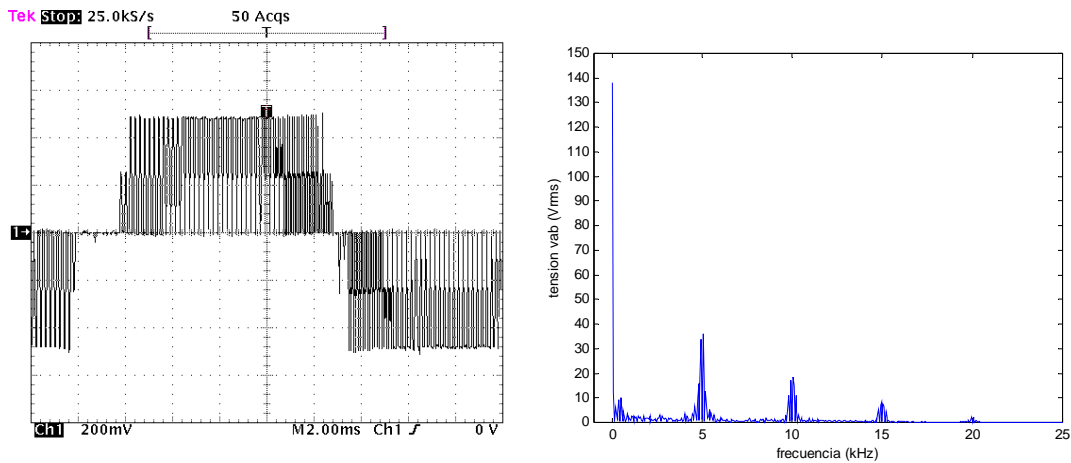


a) Medida experimental (100 V/div).



b) Espectro armónico.

Figura 7.101. Tensión compuesta de salida del convertidor NPC (v_{ab}). Consigna 63 V.



a) Medida experimental (100 V/div).

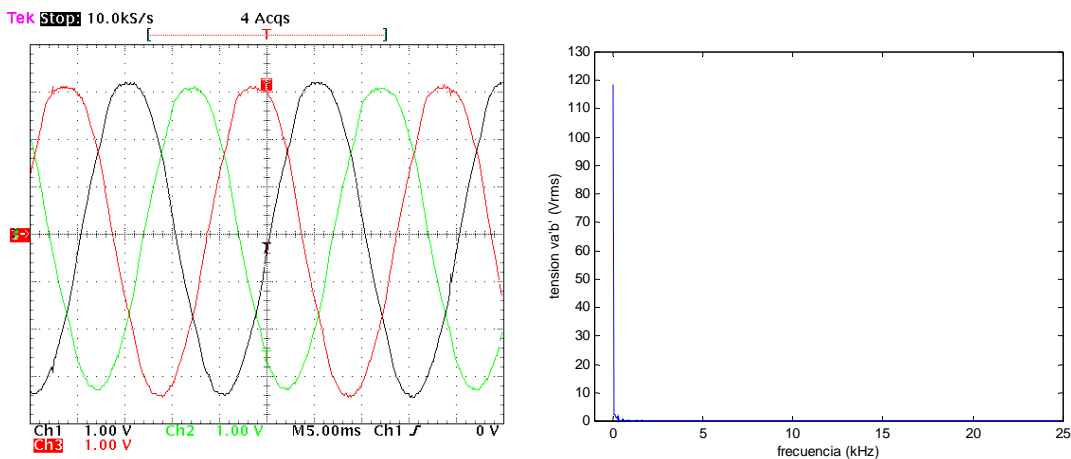
b) Espectro armónico.

Figura 7.102. Tensión compuesta de salida del convertidor NPC (v_{ab}). Consigna 120 V.

Consigna (V)	Fundamental (V)	Indice de amplitud (m_a)	THD (%)
41	59	0.38	120.43
63	71	0.46	113.44
120	138	0.90	57.19

Tabla 7.8. Distorsión armónica para la tensión compuesta de salida (v_{ab}) del convertidor NPC.

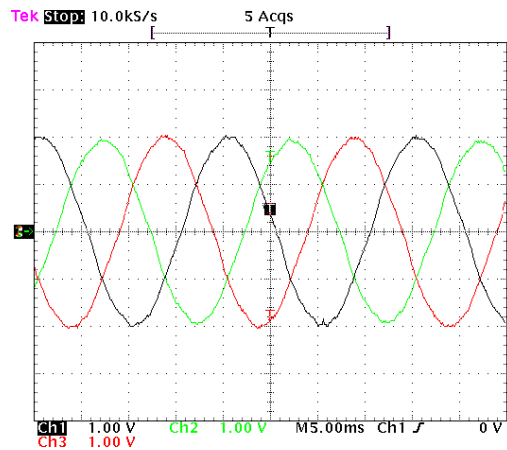
El filtro LC situado entre convertidor y carga elimina las componentes de alta frecuencia, efecto que puede verificarse en las figuras 7.103-7.104, donde se muestran las tensiones compuestas y simples aplicadas a la carga. Se observa que han desaparecido las componentes de alta frecuencia y las tensiones son prácticamente senoidales. Las distorsiones armónicas presentan un valor de 3.65 % para la tensión compuesta y 2.38 % para la tensión simple.



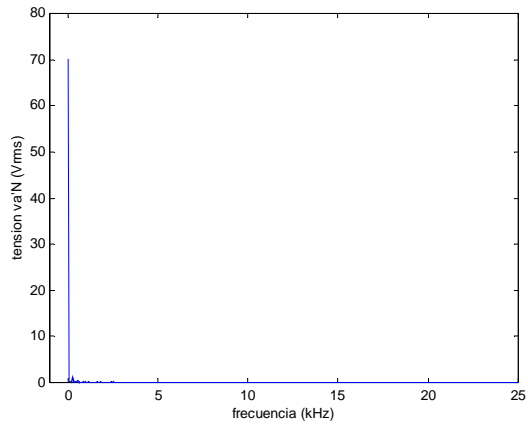
a) Medida experimental (50 V/div).

b) Espectro armónico de la tensión $v_{a'b'}$.

Figura 7.103. Tensiones compuestas en bornes de la carga ($v_{a'b'}$ - $v_{b'c'}$ - $v_{c'a'}$). Consigna 120 V.



a) Medida experimental (50 V/div).



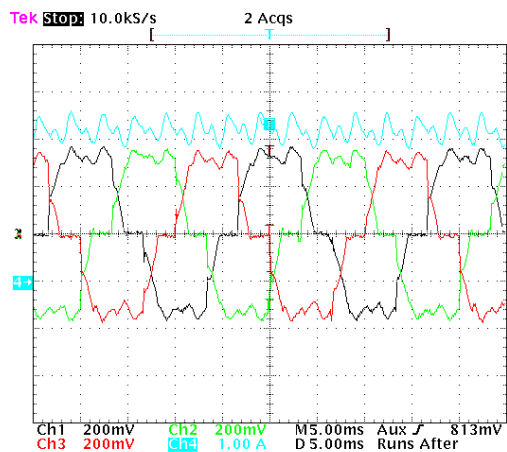
b) Espectro armónico de la tensión $v_{a'N}$.

Figura 7.104. Tensiones simples en bornes de la carga ($v_{a'N}$ - $v_{b'N}$ - $v_{c'N}$). Consigna 120 V.

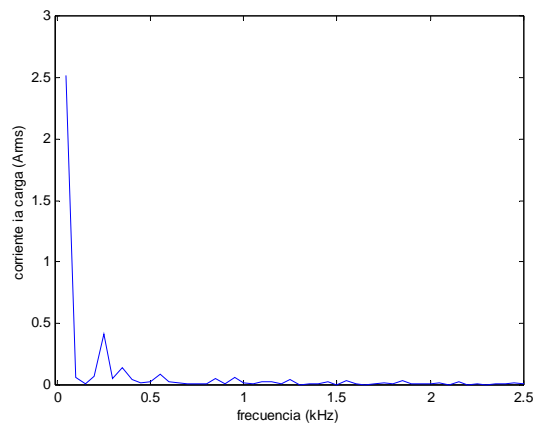
7.7.2. Inversor NPC con filtro LC y carga no lineal

Considerando el sistema de la figura 7.66, es importante valorar la distorsión armónica de las corrientes que, en definitiva, son las causantes de la deformación de la tensión.

La figura 7.105 muestra las corrientes absorbidas por el rectificador y su espectro armónico, mientras que la figura 7.106 presenta el espectro armónico y otros datos adicionales. Los principales armónicos son el 5º y el 7º, típico en puentes rectificadores trifásicos. El valor de la distorsión armónica total es 17.76 %, mientras que el factor de cresta es 1.58 (CF).



a) Medida experimental.



b) Espectro armónico de $i_{a'}$.

Figura 7.105. Corrientes absorbidas por el rectificador ($i_{a'}$ - $i_{b'}$ - $i_{c'}$ - 2 A/div-) y corriente a través de la bobina del rectificador (i_{LRECT} - 1 A/div-).

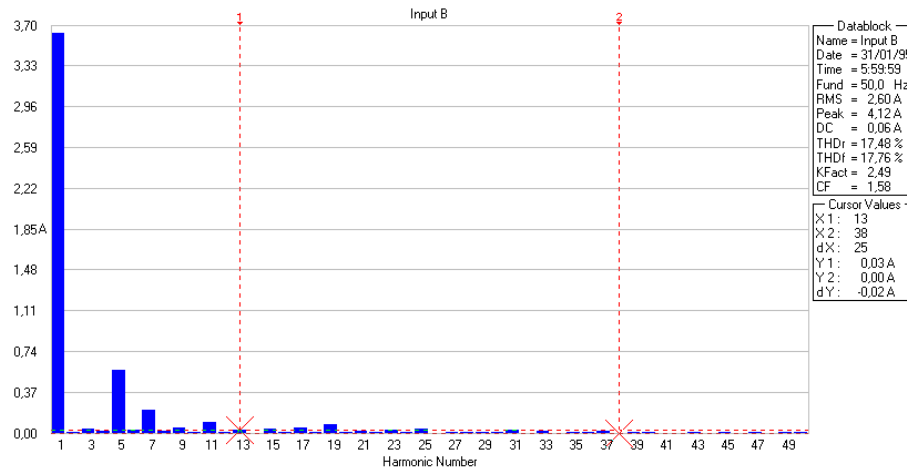
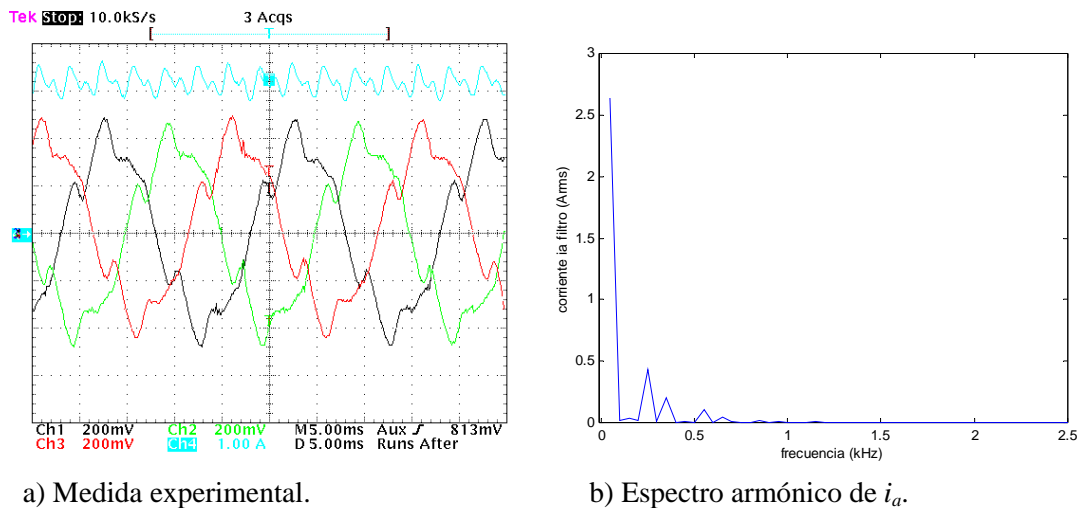


Figura 7.106. Espectro armónico y datos adicionales de la corriente del rectificador i_a .

En la figura 7.107 se presentan las corrientes que circulan por las bobinas del filtro y su espectro armónico. En comparación con las corrientes del rectificador, no se aprecian cambios significativos. La apariencia del espectro armónico no presenta cambios, la distorsión armónica prácticamente no varía (16.8 %) y el factor de cresta se incrementa ligeramente (CF = 1.85).

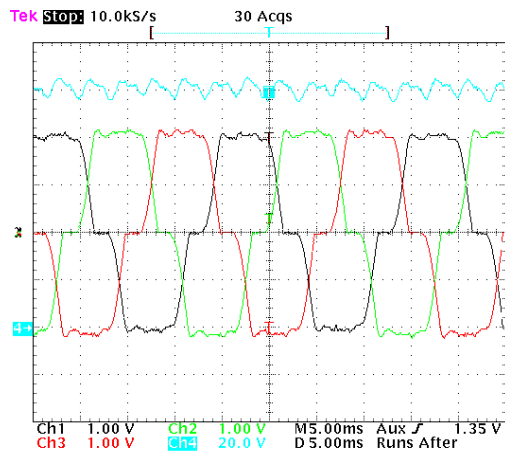


a) Medida experimental.

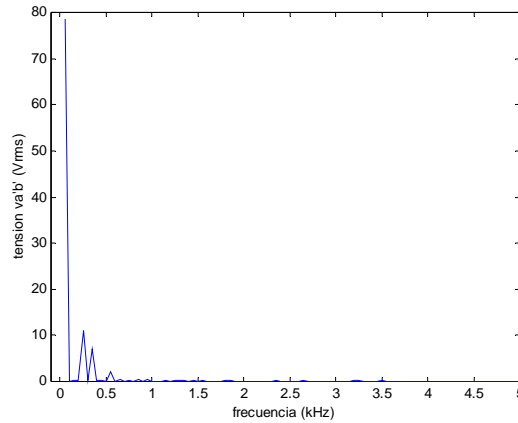
b) Espectro armónico de i_a .

Figura 7.107. Corrientes de las bobinas del filtro ($i_a - i_b - i_c - 2 \text{ A/div-}$) y corriente a través de la bobina del rectificador ($i_{LRECT} - 1 \text{ A/div-}$).

La figura 7.108 muestra las tensiones compuestas aplicadas a la carga, deformadas por las corrientes no senoidales, y su espectro armónico. Las componentes armónicas de baja frecuencia que aparecen en la tensión son provocadas por los armónicos de las corrientes, siendo el 5º y 7º armónico los más importantes. Para esta señal, la distorsión armónica total es del 16.96 %.



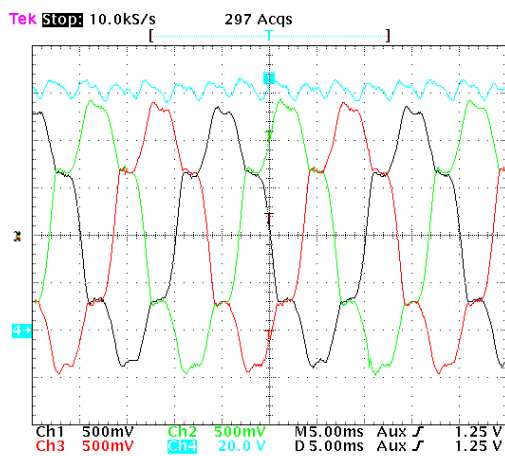
a) Medida experimental.



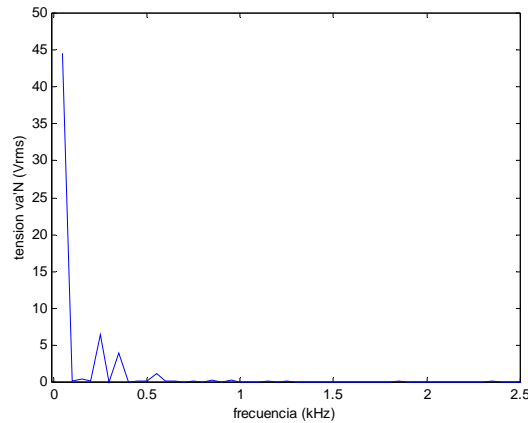
b) Espectro armónico de la tensión v_{ab} .

Figura 7.108. Tensiones compuestas aplicadas a la carga (v_{ab} - v_{bc} - v_{ca} -50 V/div-) y tensión de carga del rectificador (v_{DC} -20 V/div-) para un valor de consigna 80 V.

De forma análoga, se tienen las tensiones simples aplicadas a la carga en la figura 7.109, junto con su espectro armónico, donde resaltan los armónicos 5° y 7°. La distorsión armónica total es del 20.14 %. La figura 7.110, ofrece algunos datos adicionales, como el factor de cresta ($CF = 1.78$).



a) Medida experimental.



b) Espectro armónico de la tensión $v_{a'N}$.

Figura 7.109. Tensiones simples aplicadas a la carga ($v_{a'N}$ - $v_{b'N}$ - $v_{c'N}$ -25 V/div-) y tensión de carga del rectificador (v_{DC} -20 V/div-) para un valor de consigna 80 V.

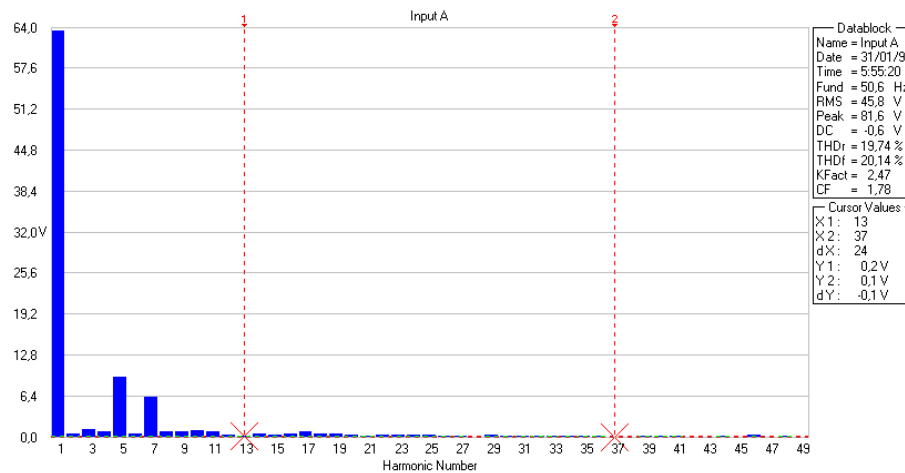


Figura 7.110. Espectro armónico y datos adicionales de la tensión $v_{a/N}$.

7.8. Conclusiones

En el presente capítulo se ha implementado el controlador propuesto para el convertidor NPC. Se ha aplicado sobre diferentes cargas y para controlar diferentes variables, en función de la aplicación.

Los resultados experimentales obtenidos verifican la efectividad del control propuesto. El controlador se ha mostrado aplicable, útil y eficaz en la regulación de las distintas cargas y aplicaciones experimentadas, bajo diferentes y variadas condiciones de trabajo y variables a controlar.

Resulta remarcable el excelente control conseguido del equilibrio del bus de continua, condición indispensable para el correcto funcionamiento del convertidor. El controlador ha mantenido dicho equilibrio, sin sufrir desviaciones, bajo cualquier condición de trabajo, estacionaria o transitoria, en cualquiera de las aplicaciones experimentadas.

En los diferentes montajes experimentados, el comportamiento del sistema con el controlador propuesto es muy correcta:

- En régimen permanente, se alcanza error estacionario nulo.
- En procesos transitorios, el tiempo de respuesta puede ser muy rápido (1-2 ms) en el mejor de los casos. Los componentes pasivos del sistema condicionan la velocidad de respuesta, ralentizando el proceso transitorio. En cualquier caso, la respuesta transitoria obtenida con el controlador propuesto está en disposición de competir con otros sistemas de control publicados, donde los tiempos de respuesta suelen estar habitualmente comprendidos entre 10 y 100 ms, por ejemplo [111][114]-[118][121]-[123].
- Además, la calidad de la respuesta transitoria es buena, con bajo tiempo de establecimiento, sin rebasamiento ni oscilaciones.

- Se consigue una buena robustez frente a cambio de parámetros en el sistema, lo que permite alcanzar el régimen permanente deseado aunque diferentes parámetros del sistema presenten desviaciones significativas respecto los valores esperados.
- El controlador se ha verificado efectivo incluso con carga no lineal, donde las formas de onda de tensiones y corrientes se deforman significativamente.

Se ha experimentado el cambio de controlador con una programación de ganancia determinada (control de tensión – control de corriente), con buenos resultados:

- Las conmutaciones entre los controladores no perturban la correcta operación del control. No conducen a la inestabilidad del sistema ni provocan que las variables de control salgan fuera de sus límites admisibles.
- La programación de ganancia experimentada se ha mostrado útil, puesto que la conmutación del controlador a modo corriente se ha revelado eficaz en la protección contra sobrecorrientes.
- Se sabe que la técnica de control multivariable LQR es muy versátil, puesto que deja a criterio del diseñador la definición del control deseado. Tal versatilidad se amplía con el empleo adicional de la programación de ganancia. Para cada aplicación, pueden diseñarse y aplicarse tantos controladores LQR multivariable como sea necesario para alcanzar el control deseado, sin límite en su número. El control propuesto es, por tanto, versátil, abierto y adaptable. En cualquier caso, el controlador puede ser adaptado a las necesidades concretas de cada aplicación.

A lo largo del capítulo, se ha comprobado la congruencia entre las simulaciones realizadas y los resultados experimentales obtenidos, en todos los ensayos efectuados. Esta coincidencia valida los modelos de simulación empleados y puede afirmarse que se aproximan apropiadamente al sistema real.

La anterior conclusión es muy importante, puesto que otorga validez sobre el proceso de diseño del controlador por simulación. No obstante, resulta imprescindible realizar un modelado completo de la aplicación.

En el análisis de los contenidos armónicos, los resultados son los esperados:

- Si la carga es lineal, los contenidos armónicos son mínimos.
- Con carga no lineal, se deforman significativamente corrientes y tensiones, incrementando la distorsión armónica y los rizados en las variables en el dominio D-Q respecto la carga lineal. No obstante, el controlador continua cumpliendo eficazmente su tarea.
- Los contenidos armónicos empeoran cuanto mayor es el tiempo que emplea el DSP en ejecutar la rutina de control.

Si la implementación del control se realiza sobre el DSP dSPACE 1104, se requieren 150 μs para ejecutar la rutina de control. Sin embargo, sobre el equipo dSPACE 1102, el tiempo es mayor y se requieren 400 μs .

En este tipo de sistemas, se desea que la rutina de control se ejecute, como máximo, en un periodo de conmutación del convertidor (100 μs para una frecuencia de conmutación de 10 kHz). De esta forma, en cada periodo de conmutación se refrescan las señales de control y se incrementa la capacidad de respuesta del control. Si se tiene en cuenta que es conveniente incrementar la frecuencia de conmutación hasta 20 kHz, como mínimo, para reducir los contenidos armónicos, resulta que el DSP dispone de 50 μs para realizar el control.

Con la implementación realizada y el equipo disponible, es impensable rebajar el tiempo por debajo de 150 μs . Buena parte de este tiempo lo emplea el equipo para comunicaciones entre los DSP maestro y esclavo. Para reducir este tiempo, es necesario generar las señales de conmutación directamente desde el DSP maestro y entregarlas directamente a través de las salidas digitales, junto con un dispositivo digital externo (*PLD*) que genere las doce señales que requiere el convertidor NPC.

A la vista de los resultados mostrados en este capítulo, pueden apuntarse algunas tareas que pueden constituir un trabajo futuro:

- Estudiar la posibilidad de emplear el controlador propuesto junto con la estrategia de conmutación SVM. De esta manera, se reducirían los contenidos armónicos y el tiempo empleado por el DSP para ejecutar el control, redundando en un mejor comportamiento del sistema.
- Sistematizar el diseño del controlador y proponer un cálculo independiente de la potencia del sistema (empleando el sistema por unidad, por ejemplo).
- Verificar experimentalmente la utilidad del control en otras aplicaciones (accionamiento de motores, sistemas de alimentación ininterrumpida, sistemas fotovoltaicos, sistemas SMES, etc...), realizando físicamente el montaje correspondiente.

