

## Capítulo 6

# PROTOTIPOS CONSTRUIDOS, EXPERIMENTOS REALIZADOS Y RESULTADOS OBTENIDOS

*En este capítulo se plantea el diseño y construcción de los balastos seleccionados en el capítulo anterior. Se muestra el método de diseño de los dos inversores de alta frecuencia elegidos, el de un interruptor (control por corriente máxima y tiempo de apagado) y el de dos interruptores (control por corriente máxima por la bobina). Para ello se obtienen, en primer lugar, los parámetros de las lámparas a partir de datos del fabricante. Una vez realizado el diseño completo de los inversores, se construye el prototipo de inversor de un interruptor, y se realizan los experimentos pertinentes. Se ensayarán las lámparas de 70W de halogenuros metálicos y de vapor de sodio a alta presión disponibles en el laboratorio, a fin de comprobar si con el método de alimentación propuesto aparecen resonancias acústicas.*

## *Índice del Capítulo*

6.1	PROTOTIPOS CONSTRUIDOS .....	6-3
6.1.1	DIAGRAMA DE LOS BALASTOS PROPUESTOS.....	6-3
6.1.2	LÁMPARAS ENSAYADAS .....	6-4
6.1.2.1	Resonancias Acústicas en las Lámparas Objetivo de Diseño .....	6-5
6.1.3	POTENCIA DE ENTRADA .....	6-6
6.1.4	ETAPA DE ADAPTACIÓN DEL BUS.....	6-6
6.2	INVERSOR DE 1 INTERRUPTOR.....	6-9
6.2.1	DISEÑO DE LA ETAPA DE ADAPTACIÓN DEL BUS.....	6-10
6.2.2	DISEÑO DEL INVERSOR .....	6-10
6.2.3	CONSIDERACIONES DE DISEÑO .....	6-12
6.2.3.1	Elementos Magnéticos.....	6-12
6.2.3.2	El Circuito de Control .....	6-12
6.2.3.3	Arrancador .....	6-13
6.2.4	PROTOCOLO DE PRUEBAS .....	6-13
6.2.5	LÁMPARA DE VAPOR DE SODIO .....	6-14
6.2.6	LÁMPARAS DE HALOGENUROS METÁLICOS .....	6-17
6.3	INVERSOR DE 2 INTERRUPTORES.....	6-20
6.3.1	DISEÑO DE LA ETAPA DE ADAPTACIÓN DEL BUS.....	6-21
6.3.2	DISEÑO DEL INVERSOR .....	6-21
6.4	RESULTADOS OBTENIDOS .....	6-23
6.5	REFERENCIAS.....	6-24

## 6.1 PROTOTIPOS CONSTRUIDOS

Como quedó expuesto en el capítulo anterior, se han escogido dos topologías básicas de alimentación de lámparas en alta frecuencia:

- ❑ Inversor Reductor-Elevador, controlado por Corriente Máxima por el Interruptor y Tiempo de Apagado ( $I_{M\ MAX}-T_{OFF}$ ).
- ❑ Inversor Medio Puento en Corriente controlado por Corriente Máxima por la Bobina ( $I_{L\ MAX}$ )

Además, estos controles implementarán el sistema de variación de parámetros en función de variación de la carga equivalente de la lámpara, a fin de mantener el rizado de potencia instantánea lo más bajo posible.

### 6.1.1 Diagrama de los Balastos Propuestos

En la figura 6.1 se muestra un diagrama de bloques de los balastos propuestos.

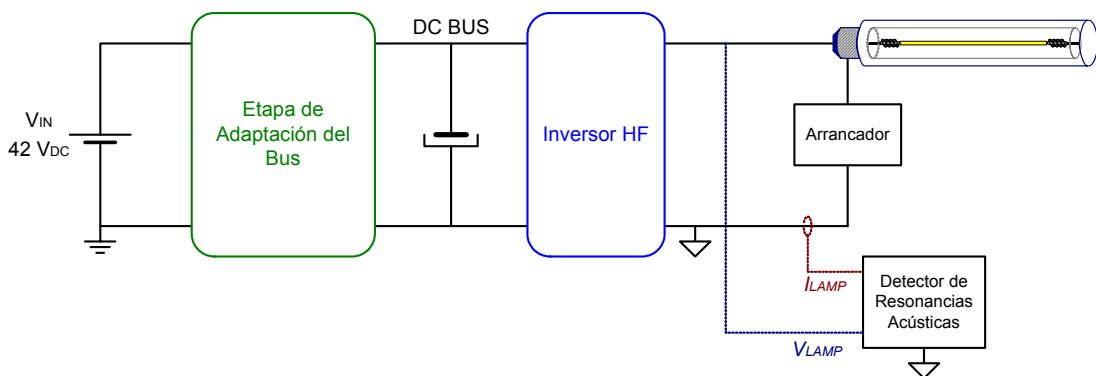


Figura 6.1. Diagrama de bloques de los prototipos construidos

Se parte de una fuente de tensión continua de 42 V. Esta fuente de entrada alimenta la primera etapa del balasto. A la salida de ésta, se obtiene el bus de continua que alimentará la lámpara, y que debe ser variable en función de la carga equivalente.

La fuente de continua de entrada se representa mediante  $V_{IN}$ , mientras que el bus de continua que alimenta al inversor se representa mediante  $DC\ BUS$ . En la figura puede observarse cómo el arrancador está situado en serie con la lámpara. Para los experimentos, el arrancador será deshabilitado completamente tras el encendido. Se representa también la obtención de los parámetros necesarios para llevar a cabo la detección de resonancias acústicas en la lámpara.

### 6.1.2 Lámparas Ensayadas

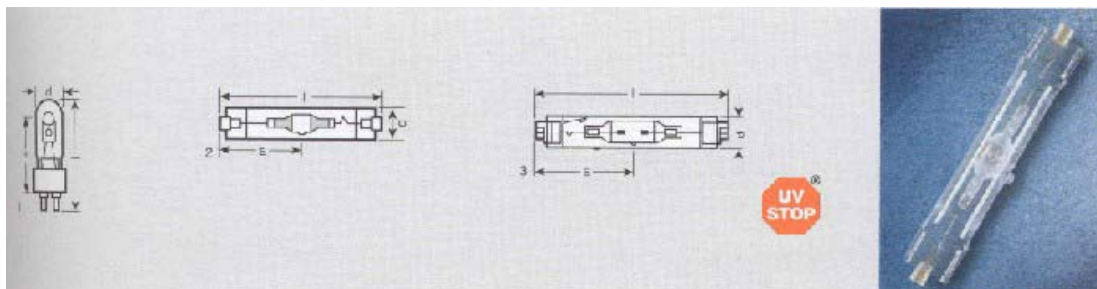
En el laboratorio se dispone, entre otras, de diversas lámparas de halogenuros metálicos y de sodio a alta presión de potencia nominal 70W.

Como se puso de manifiesto en el capítulo 1, las lámparas de sodio a alta presión y de halogenuros metálicos son las que presentan mayores problemas relativos a resonancias acústicas, al ser alimentadas a altas frecuencias. Estos problemas aumentan para potencias nominales bajas.

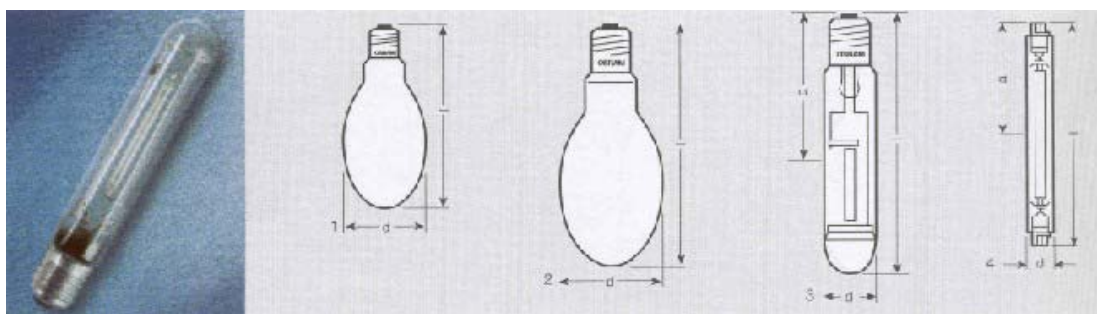
Al tener la misma potencia nominal, 70 W, pueden emplearse los mismos inversores para todas las lámparas, hecho que simplificará enormemente la construcción y diseño de los prototipos.

Las pruebas se realizarán sobre las siguientes lámparas:

- 5 lámparas de halogenuros metálicos HQI-T 70W/WDL UVS *WARMWEISS DE LUXE*, del fabricante OSRAM.
- 5 lámparas de halogenuros metálicos, POWERSTAR HQI-TS 70W/NDL UVS *NEUTRALWIESS DE LUXE*, del fabricante OSRAM.
- 5 lámparas de vapor de sodio a alta presión VIALOX NAV-T 70W (SON-T) del fabricante OSRAM.



a)



b)

Figura 6.2. a) Lámparas de halogenuros metálicos  
b) Lámparas de vapor de sodio a alta presión.

En la figura 6.2 puede observarse el aspecto externo de estas lámparas.

Los parámetros del fabricante, relacionados en la tabla 6.1, permiten obtener el punto nominal de funcionamiento ([6]).

Tipo de Lámpara	Denominación Comercial	Potencia en régimen	Corriente en régimen	Resistencia Nominal	Lm
Halogenuros Metálicos	OSRAM HQI-T 70W/WDL UVS	75 W	1 A	75 $\Omega$	5200 lm
Halogenuros Metálicos	OSRAM POWERSTAR HQI-TS 70W/NDL UVS	75 W	1 A	75 $\Omega$	5500 lm
Sodio Alta Presión	OSRAM VIALOX NAV-T 70W	70 W	1 A	70 $\Omega$	5900 lm

Tabla 6.1. Datos del fabricante de las lámparas ensayadas.

La resistencia nominal de diseño variará desde un 10% al iniciarse el calentamiento (tras la fase de arranque) hasta el valor en régimen. Además, este valor en el permanente aumenta a lo largo de la vida de la lámpara hasta un 200% del valor nominal.

La potencia de diseño considerada será la nominal en régimen. Para el instante inicial del calentamiento (justo después del arranque), se toma un valor de potencia del 25% de la nominal. Por tanto, los parámetros eléctricos que se consideran son:

Tipo de Lámpara	Margen de Potencia	Margen de Tensión	Margen de Resistencia	Margen de Corriente
Halogenuros Metálicos	20 W - 75 W	12 V - 110 V	7,5 $\Omega$ - 150 $\Omega$	1,6 A - 0,7 A
Sodio Alta Presión	18 W - 70 W	11 V - 100 V	7,0 $\Omega$ - 140 $\Omega$	1,6 A - 0,7 A

Tabla 6.2. Parámetros de diseño del balasto.

#### 6.1.2.1 Resonancias Acústicas en las Lámparas Objetivo de Diseño

Al alimentar lámparas de vapor de sodio a alta presión a frecuencias de entre 50 y 80 kHz, mediante balasto resonante (forma de onda senoidal pura), se han observado resonancias acústicas en algunas frecuencias dispersas, si bien existen zonas en las que se consigue una descarga estable. Una de las frecuencias a las que se tienen resonancias acústicas para una frecuencia de unos 60 kHz (2 de las 5 lámparas).

Con las lámparas de halogenuros metálicos de 70 W, y alimentando mediante balasto senoidal de alta frecuencia, las resonancias acústicas aparecen de manera continua a lo largo del margen de frecuencias ensayado (entre 50 y 80 kHz).

Por tanto, una frecuencia de diseño adecuada son estos 60 kHz, ya que, para ambas lámparas, se tienen resonancias acústicas.

### 6.1.3 Potencia de Entrada

Los inversores electrónicos propuestos se alimentarán desde un bus de continua de 42 V, obtenido a partir de una fuente de potencia de laboratorio (Hewlett Packard AC Power Source / Analyzer 6812A, 300 V<sub>RMS</sub>, 750 VA). De este modo, los inversores podrían alimentarse directamente desde el nuevo bus de automoción de 42 V [5].

Para no restar generalidad a los experimentos, se plantea también la opción de construir balastos alimentados desde la red de alterna. A efectos prácticos, se realizarán experimentos que introduzcan en el nivel de continua de entrada un pequeño rizado de 100 Hz. Se representará así el efecto de utilizar como primera etapa un prerregulador del factor de potencia alimentado desde red de alterna, [1]. Este rizado puede programarse fácilmente en la fuente de potencia mencionada.

En la figura 6.3 se representan ambas posibilidades. Nótese como a partir del bus de continua, *DC BUS*, ambos balastos son exactamente iguales.

### 6.1.4 Etapa de Adaptación del Bus

El bloque "*Etapa de Adaptación del Bus*" es una etapa de potencia que tiene por objeto variar el valor del bus de continua. Este bus alimenta la etapa inversora de alta frecuencia, y debe presentar diferentes valores en función de parámetros relativos a la carga equivalente que presenta la lámpara. Esta variación del bus, permitirá que la modulación en frecuencia de la potencia no supere el valor límite de aparición de resonancias acústicas. La discusión relativa a esta variación se ha desarrollado en capítulos anteriores.

Tipo de Lámpara	Margen de Tensión del Bus de Continua	
	Inversor 1 Interruptor	Inversor 2 Interruptores
Halogenuros Metálicos	12 V - 110 V	6 V - 55 V
Sodio Alta Presión	11 V - 100 V	6 V - 50 V

Tabla 6.3. Márgenes de variación del bus de continua..

Cabe plantearse cuál es la topología óptima para esta etapa previa. Por simplificación del control, se partirá del bus de continua de 42 V. El nivel de tensión a la salida que debe obtenerse dependerá del inversor y de la lámpara.

Como se justificó en el capítulo 5, pueden calcularse fácilmente los valores máximo y mínimo del bus de continua para cada tipo de lámpara y para cada inversor. Se obtiene entonces la tabla 6.3.

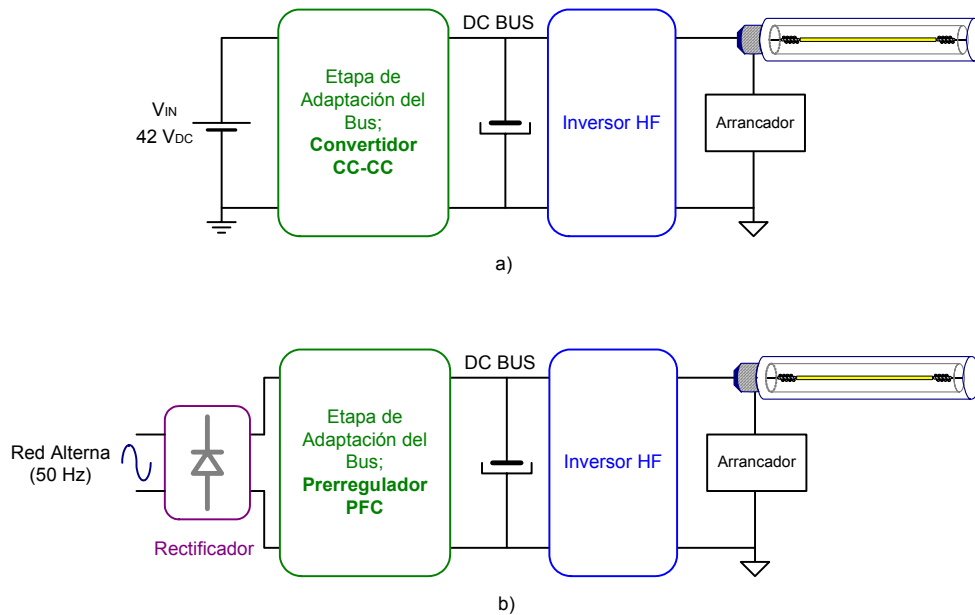


Figura 6.3. Diferentes configuraciones de los balastos propuestos.  
a) Alimentación desde batería de 42 V.  
b) Alimentación desde red.

La etapa de adaptación del bus debe ser capaz de entregar estas tensiones de salida a partir del valor de 42 V de entrada. Por tanto, la topología de entrada debe ser un convertidor continua-continua. Por sencillez se descarta la utilización de transformadores en esta primera etapa. Se escoge una configuración de reductor-elevador, puesto que es la topología de potencia más sencilla que permite obtener a la salida valores superiores e inferiores al valor de entrada, dependiendo del ciclo de trabajo.

En la figura 6.4 se presenta el convertidor CC-CC reductor-elevador. El ciclo de trabajo del interruptor S gobierna la salida del convertidor, mediante la función que puede verse en la gráfica 6.5.

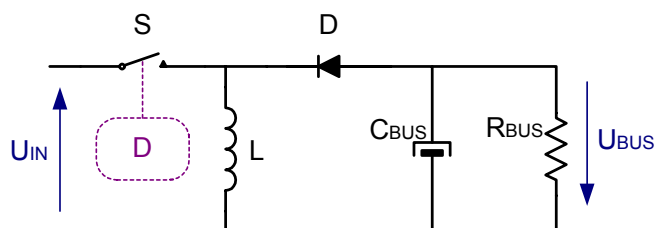
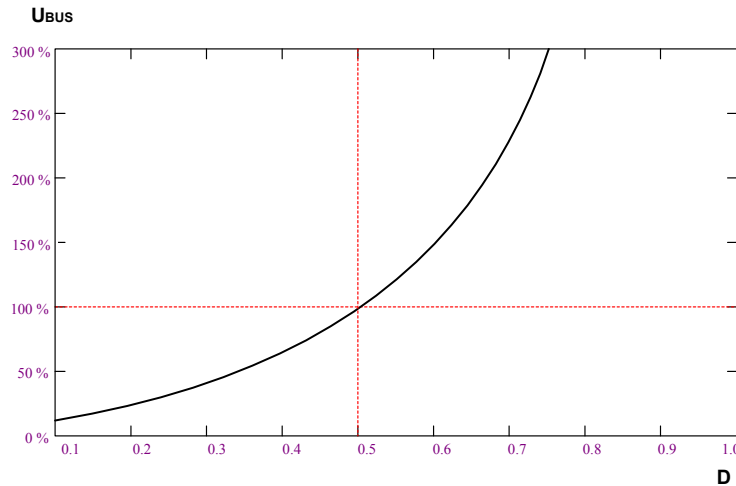


Figura 6.4. Esquema de un convertidor CC-CC reductor-elevador.

Mediante los valores de los elementos reactivos (condensador  $C_{BUS}$  y bobina  $L$ ), es posible fijar el máximo rizado que se obtendrá en el bus de continua. Este rizado lleva asociada una frecuencia igual a la de conmutación del convertidor. Por tanto, existe un límite para este rizado de tensión del bus, por encima del cuál se induce en la carga un rizado de potencia instantánea superior al valor máximo permitido (5% sobre la potencia media). Este límite debe ser tenido en cuenta a la hora de realizar el diseño completo.



*Figura 6.5. Relación entre la tensión de salida (como porcentaje de la tensión de entrada) y el ciclo de trabajo en un reductor-elevador.*



## 6.2 INVERSOR DE 1 INTERRUPTOR

En la figura 6.6 puede verse el diagrama de bloques del balasto completo basado en el inversor de un interruptor. Pueden diferenciarse las dos etapas básicas, la *Etapas de Adaptación del Bus* y el propio *Inversor de Salida*. El control básico del inversor de salida se realiza mediante corriente máxima por el interruptor (comparando la corriente por el interruptor,  $I_M$ , con un cierto valor  $REF I_{M MAX}$ ) y tiempo de apagado (carga del condensador  $C_{OFF}$ ), [2], [3], [4] y [7].

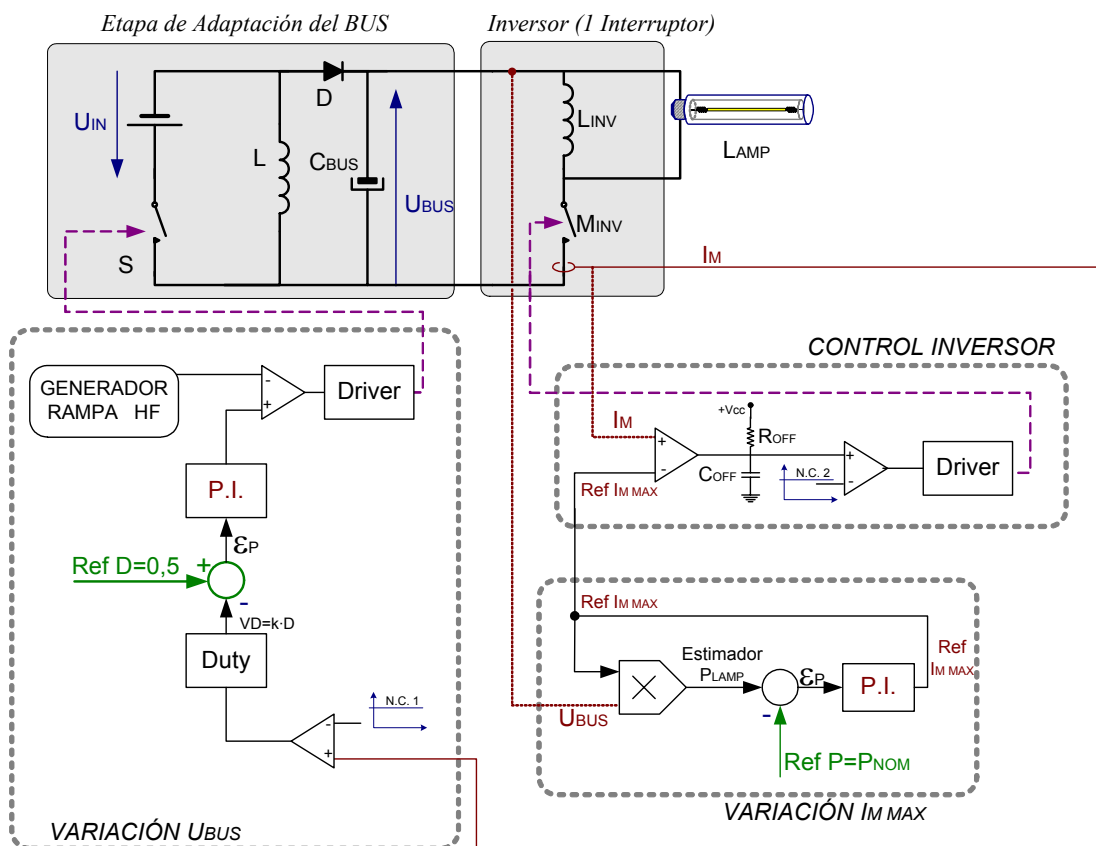


Figura 6.6. Diagrama de potencia y control del inversor de un interruptor

Además, existen las modificaciones al control propuestas en el presente trabajo:

- ❑ **Potencia media constante:** Midiendo el valor del bus de continua, y a través del estimador de potencia, se genera el valor de referencia de la corriente máxima,  $REF I_{M MAX}$ , que fija la potencia de salida del inversor.
- ❑ **Variación de la tensión del bus:** Mediante un comparador y un bloque *DUTY* se genera una tensión continua proporcional al ciclo de trabajo  $D$ . Este valor es comparado con un cierto valor de referencia,  $Ref D$ . La diferencia,  $\varepsilon_D$ , se introduce en un regulador PI que genera la acción de control que da

lugar a los pulsos del reductor-elevador de entrada. La frecuencia de conmutación de esta etapa de adaptación del bus puede controlarse manualmente gracias al bloque *GENERADOR RAMPA HF*.

### 6.2.1 Diseño de la Etapa de Adaptación del Bus

Para diseñar el reductor-elevador de entrada, se tiene en cuenta la frecuencia de conmutación de esta etapa (que se toma en torno a 100 kHz), así como la potencia de diseño y el rizado de salida en el bus (fijado en el 0,5%).

El valor de la máxima corriente que circula por la bobina de la etapa de entrada, se tiene cuando se alcanza el régimen permanente:

$$I_{MAX LE} = \frac{P_{AVG}}{V_{IN}} = \frac{75W}{42V} \cong 2A \quad \text{ec. (6.1)}$$

Fijando el rizado de corriente por esta bobina en torno al 5%, se tiene que:

$$\Delta I_{LE} = \frac{1}{L} \cdot D \cdot \frac{1}{f} V_{IN} \Rightarrow L \cong \frac{D \cdot V_{IN}}{f \cdot \Delta I_{LE}} = \frac{0,5 \cdot 42 V}{100 \text{ kHz} \cdot 0,2 A} = 2 \text{ mH} \quad \text{ec. (6.2)}$$

Por otra parte, para asegurar un rizado en el bus de tensión menor que el 0,5%, puede obtenerse el valor del condensador:

$$\Delta U_{BUS} = \frac{1}{C} \cdot D \cdot \frac{1}{f} I_C \Rightarrow C \cong \frac{D \cdot I_C}{f \cdot \Delta U_{BUS}} = \frac{0,5 \cdot 1 A}{100 \text{ kHz} \cdot 0,21 V} = 27 \mu F \quad \text{ec. (6.3)}$$

Finalmente, es preciso dimensionar los semiconductores de potencia que se emplearán como interruptores.

En un reductor-elevador, tanto el diodo como el interruptor (se utilizará un MOSFET de potencia) están sometidos a una tensión máxima de:

$$U_{INT MAX} = V_{IN} + U_{BUS} \quad \text{ec. (6.4)}$$

Por tanto, tanto el diodo como el transistor deben ser capaces de soportar  $42V + 110V = 152V_{DC}$ .

### 6.2.2 Diseño del Inversor

Se realiza a continuación un diseño del inversor de un interruptor basado en los valores nominales de las lámparas objetivo del trabajo. El proceso es análogo al ejemplo realizado en el capítulo anterior.

Para el caso de las lámparas de halogenuros metálicos, la potencia nominal de estas lámparas es de 75 W.

El valor de la resistencia equivalente obtenido de las características del fabricante es de  $75 \Omega$ . Por tanto, se conocen dos de los datos de diseño,  $P_{\text{NOM}}=75 \text{ W}$ ,  $R_{\text{LAMP-NOM}}=75 \Omega$ :

$$P_B = P_{\text{NOM}} = 75 \text{ W} \quad \text{ec. (6.5)}$$

$$R_B = R_{\text{LAMP-NOM}} = 75 \Omega \quad \text{ec. (6.6)}$$

Se toma como frecuencia de conmutación  $f_c=60 \text{ kHz}$ . Se escoge esta frecuencia porque, al probar con balasto senoidal puro, se observaron resonancias acústicas de magnitud importante en torno a esta frecuencia. De ahí, y mediante la ecuación (5.6), se calcula la inductancia base del diseño,:

$$L_B = \frac{R_{\text{LAMP-NOM}} \cdot k}{f_c} = \frac{75 \Omega \cdot 5}{60 \text{ kHz}} = 6,25 \text{ mH} \Rightarrow L_B = 10 \text{ mH} \quad \text{ec. (6.7)}$$

Fijados  $L_B$ ,  $R_B$  y  $P_B$ , pueden calcularse los demás valores base necesarios (ecuaciones de la (5.7) a la (5.10)):

Magnitud	Valor Base	Símbolo
Potencia	75 W	$P_B$
Resistencia	$75 \Omega$	$R_B$
Inductancia	10 mH	$L_B$
Periodo	133 $\mu\text{s}$	$T_B$
Tensión	75 V	$V_B$
Corriente	1,0 A	$I_B$

Tabla 6.4. Valores base y símbolos para el inversor de 1 interruptor (lámpara de halogenuros metálicos de 70 W, frecuencia de conmutación de 60 kHz).

Con estos valores base, puede procederse a la normalización del circuito. Los valores de los parámetros eléctricos normalizados que se obtendrían del funcionamiento nominal pueden observarse en la tabla 6.5, así como los correspondientes valores reales.

Para el caso de lámpara de vapor de sodio a alta presión, se toma el mismo diseño que para la lámpara de halogenuros. Aunque los datos del fabricante indican una potencia nominal de 70 W (por los 75 W de las lámparas de halogenuros), esta diferencia puede obviarse a la hora del diseño. Puesto que la referencia de potencia es ajustable externamente, puede variarse la potencia de salida de manera sencilla.

	Valor Normalizado NOMINAL	Valor Real NOMINAL		Valor Normalizado NOMINAL	Valor Real NOMINAL
Potencia entregada a la lámpara	$\Pi_{LAMP}=1$	$P_{LAMP}=75\text{ W}$	Bus de continua	$M_b=1$	$U_{BUS}=75\text{ V}$
Resistencia de la lámpara (nueva)	$Q_{LAMP}=1$	$R_{LAMP}=75\ \Omega$	Corriente máxima por la bobina	$j_{\lambda\text{ MAX}}=1,05$	$i_{L\text{ MAX}}=1,05\text{ A}$
Inductancia	$\lambda=1$	$L=10\text{ mH}$	Rizado de corriente por la bobina	$\Delta j_{\lambda}=0,1$	$\Delta i_L=0,1\text{ A}$
Frecuencia de Conmutación	$\omega_c=5$	$f_c=60\text{ kHz}$	Corriente máxima por el interruptor	$j_{M\text{ MAX}}=2,05$	$i_{M\text{ MAX}}=2,05\text{ A}$
Periodo	$\Psi_c=0,125$	$T_c=16,7\ \mu\text{s}$	Tiempo de ENCENDIDO del interruptor	$\Psi_{ON\text{ NOM}}=0,06$	$T_{on\text{ NOM}}=8,3\ \mu\text{s}$
Ciclo de trabajo	$D=0,5$	$D=0,5$	Tiempo de APAGADO del interruptor	$\Psi_{ON\text{ NOM}}=0,06$	$T_{off\text{ NOM}}=8,3\ \mu\text{s}$

Tabla 6.5. Valores normalizados, valores Base y valores reales de parámetros en un inversor de un interruptor funcionando en régimen nominal de diseño.

### 6.2.3 Consideraciones de Diseño

Existen una serie de consideraciones adicionales a tener en cuenta a la hora de diseñar el balasto. Entre ellas destacan las relativas a elementos magnéticos, al circuito de control y al arrancador.

#### 6.2.3.1 Elementos Magnéticos

El diseño de las inductancias se realizará teniendo en cuenta que el rizado de corriente que soportan va a ser prácticamente despreciable. De este modo, no es preciso utilizar hilo litz (no se tendrá en cuenta el efecto *skin* ni el efecto proximidad, etc.), ni tener en cuenta pérdidas debidas a la corriente alterna.

#### 6.2.3.2 El Circuito de Control

El circuito de control se realizará con todos los parámetros posibles ajustables mediante potenciómetros multivuelta (ganancia de amplificadores, regulación del tiempo de apagado, referencias externas, etc.). De este modo podrá analizarse fácilmente el comportamiento del inversor ante diferentes modos de funcionamiento, pudiendo regularse fácilmente parámetros tales como el tiempo de apagado ( $T_{off}$ ), el ciclo de trabajo ( $D$ ), la potencia de salida ( $P_{AVG}$ ), la frecuencia de conmutación de la etapa de entrada, etc.

### 6.2.3.3 Arrancador

El dispositivo empleado para arrancar la lámpara, es un arrancador gobernado mediante un pulsador. Al ser accionado este pulsador, se genera un pulso de alta tensión en bornes del primario de un transformador (de relación de transformación elevada). El secundario de este transformador está situado en serie con la lámpara. Además, este devanado puede cortocircuitarse fácilmente una vez la lámpara ha sido arrancada, para evitar influencias en el funcionamiento del circuito.

### 6.2.4 Protocolo de Pruebas

Para la realización de los experimentos se ha utilizado el esquema que puede verse en la figura 6.7.

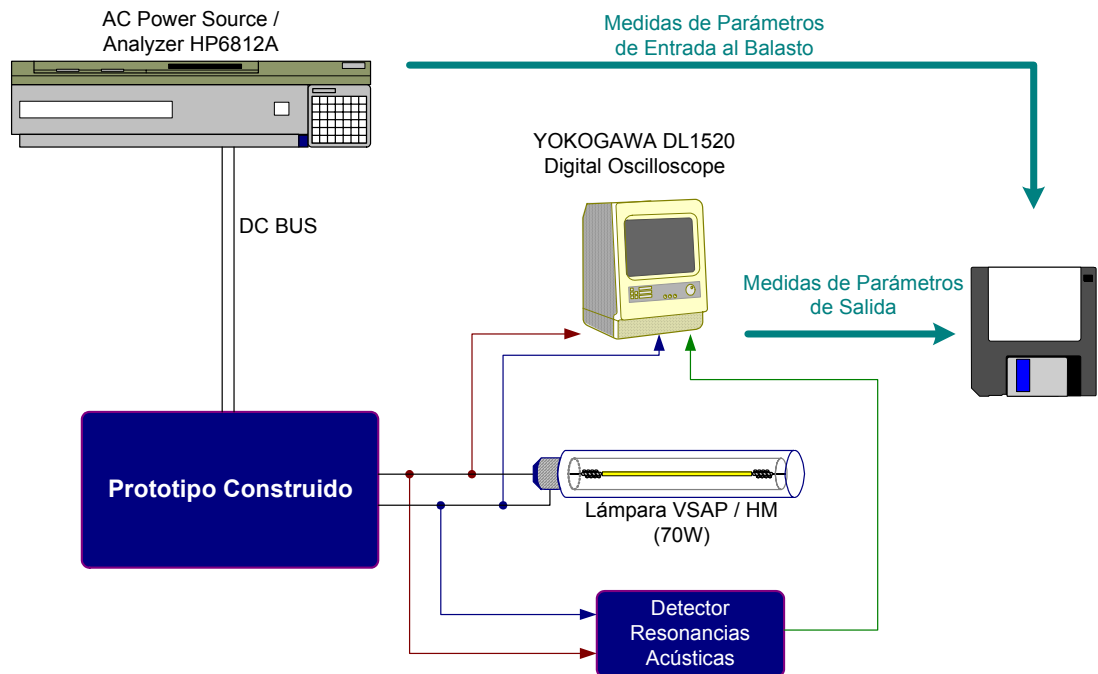


Figura 6.7. Esquema utilizado para la realización de experimentos

Tras el arranque de la lámpara, se procede al calentamiento de la misma durante unos minutos. Este calentamiento se logra aumentando la referencia de potencia desde un valor correspondiente a unos 25 W iniciales, hasta el valor que proporciona los 70 W nominales.

Tras un intervalo de 10 minutos a potencia nominal, se considera alcanzado el régimen permanente. Tras este periodo de tiempo, se realizan las medidas y pruebas del experimento:

- ❑ Conexión del sistema de detección de resonancias acústicas.

- Variación de la frecuencia de conmutación entre los 50 kHz y los 80 kHz, para comprobar la aparición de resonancias acústicas. Se actúa sobre el  $T_{off}$ . Tras variar la frecuencia, se esperan 5 minutos hasta considerar alcanzado nuevamente el permanente.
- Introducción de un cierto rizado de 100 Hz. en el bus de continua (condiciones de alimentación desde red).

### 6.2.5 Lámpara de Vapor de Sodio

Para las lámparas de vapor de sodio a alta presión analizadas, se ha observado la *ausencia total de resonancias acústicas en los experimentos realizados*, tanto en el permanente como durante el calentamiento.

En la figura 6.8 puede verse las formas de onda de corriente, tensión y potencia instantáneas por la lámpara a alta frecuencia. Estas formas de onda se han obtenido mediante un osciloscopio digital (Yokogawa DL1520 Digital Oscilloscope). La tensión en la lámpara se ha obtenido mediante una sonda de tensión diferencial (Tektronix P5200 High Voltage Differential Probe). La corriente por la lámpara se obtuvo mediante una resistencia de medida de  $0,5 \Omega$ .

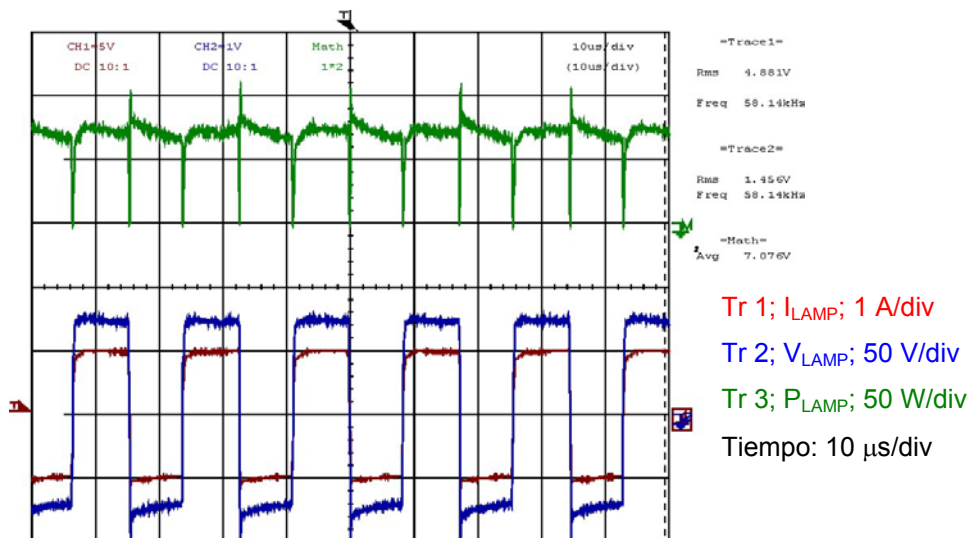


Figura 6.8. Formas de onda de corriente (traza roja), tensión (traza azul) y potencia instantánea (verde), en lámpara de vapor de sodio a alta presión en alta frecuencia (58,1 kHz).

Puede observarse cómo la forma de onda de potencia instantánea presenta un bajo rizado en alta frecuencia. Debido a tiempos muertos, flancos de subida y bajada, elementos parásitos, etc., la modulación de potencia conseguida no es del 5%, sino algo superior (en torno al 7-8%).

En la figura 6.9 puede observarse un detalle de estas formas de onda durante un periodo de conmutación. Se observa un leve transitorio de alta frecuencia al

iniciarse cada período de conmutación. Esto se debe a ruidos que penetran en el sistema de medida de corriente (para ésta lámpara se mide la corriente mediante una resistencia de medida).

La fase de calentamiento de la lámpara se ha realizado de forma manual, ajustando progresivamente (mediante un potenciómetro) el nivel de referencia de potencia. En las imágenes de la figura 6.10 pueden observarse diferentes instantes de esta fase de calentamiento.

Para cualquier potencia, y para cualquier frecuencia, el control actúa de manera que el ciclo de trabajo permanece constante e igual a 0,5. De este modo se logra que la potencia presente el mínimo de rizado posible.

Así, se minimiza el riesgo de aparición de resonancias acústicas. Para las 5 lámparas de vapor de sodio a alta presión ensayadas, *no se observaron resonancias acústicas en ningún caso*.

Puede emplearse el sistema de detección de resonancias acústicas presentado en el capítulo 2. En la figura 6.11.a) se representa la potencia media, a lo largo del

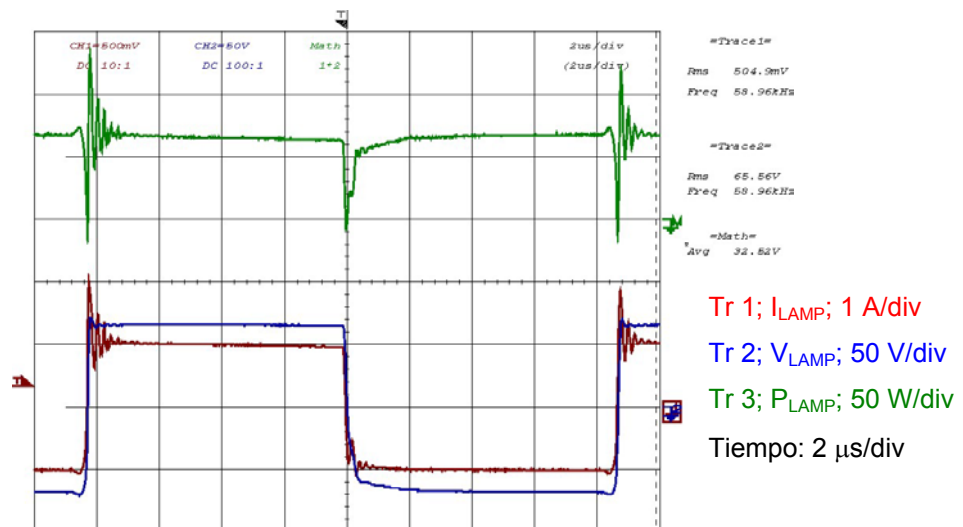


Figura 6.9. Formas de onda de corriente (traza roja), tensión (traza azul) y potencia instantánea (verde), en lámpara de vapor de sodio a alta presión en alta frecuencia (58,1 kHz). Detalle de un periodo de conmutación. (Medida de corriente sobre resistencia de 0,5  $\Omega$ ).

tiempo (5 segundos por división en el eje de tiempos), para una lámpara de vapor de sodio a alta presión de 70 W que experimenta resonancias acústicas. Puede observarse la fluctuación de esta potencia media, fruto de la inestabilidad del arco de descarga. Esta forma de onda se ha obtenido para una de las lámparas que presentaba resonancias acústicas al ser alimentada mediante balasto senoidal a 60 kHz.

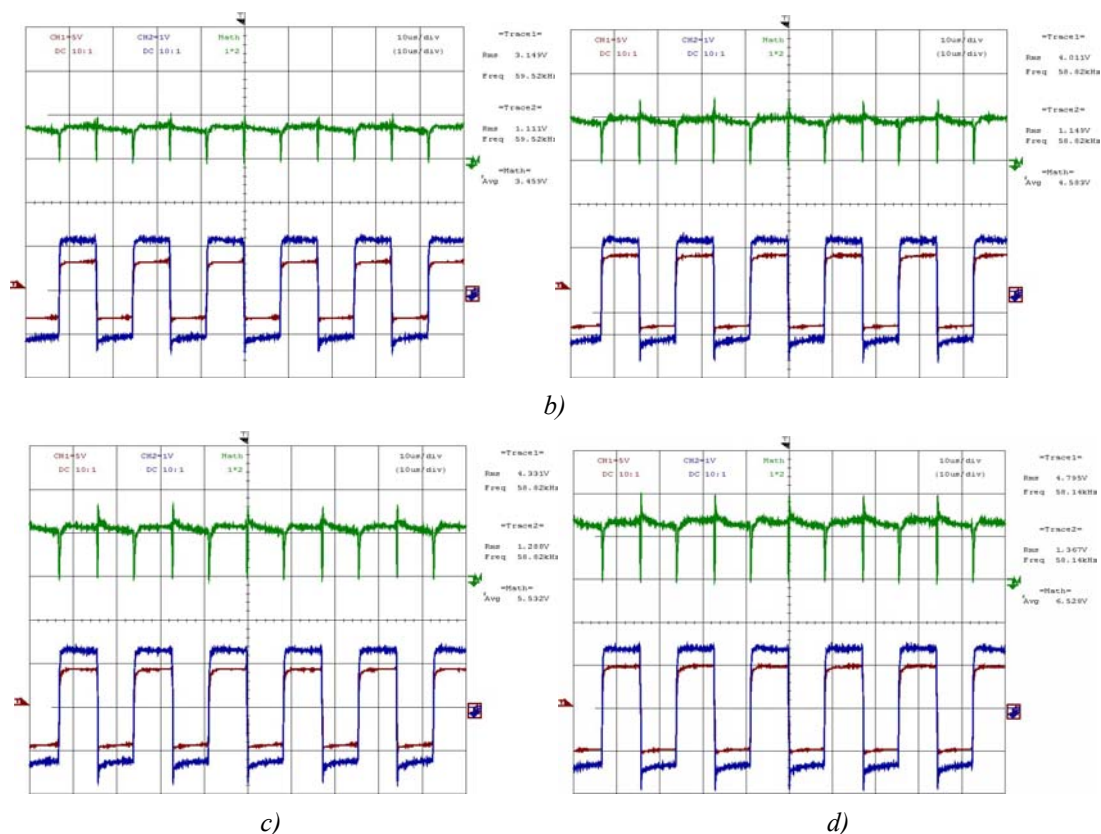


Figura 6.10. Diferentes instantes del calentamiento de la lámpara:

- a) Potencia 35 W; b) Potencia 45 W;  
c) Potencia 55 W; d) Potencia 65 W.

Tr 1;  $I_{LAMP}$ ; 1 A/div Tr 2;  $V_{LAMP}$ ; 50 V/div Tr 3;  $P_{LAMP}$ ; 50 W/div Tiempo: 10  $\mu$ s/div

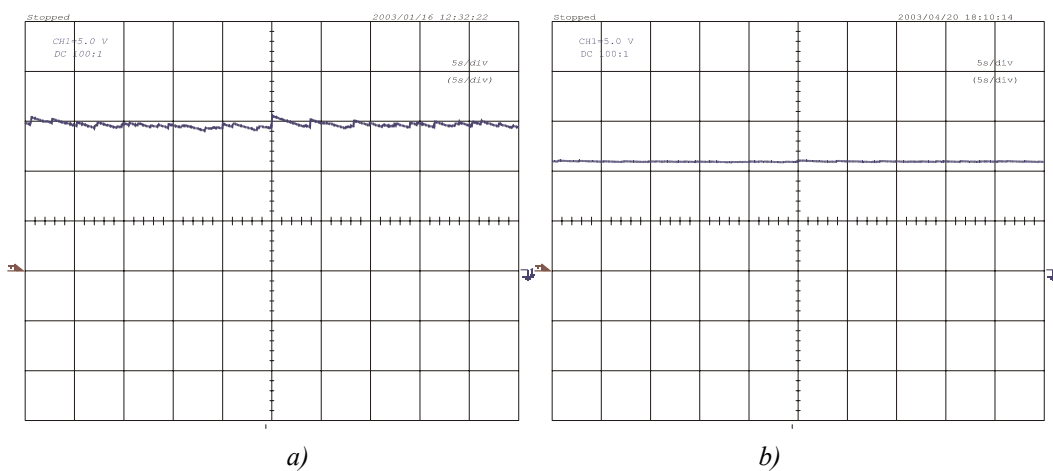


Figura 6.11. Potencia media de salida en lámpara de vapor de sodio a alta presión en situación de inestabilidad debida a resonancias acústicas. b) Descarga estable con el inversor propuesto.



En la figura 6.11.b) puede observarse cómo la potencia media permanece constante a lo largo del tiempo; la descarga es estable. Esta forma de onda, se ha obtenido al alimentar la lámpara mediante el inversor propuesto, para la misma frecuencia de conmutación de 60 kHz.

### 6.2.6 Lámparas de Halogenuros Metálicos

Al alimentar las lámparas de halogenuros disponibles con el inversor de alta frecuencia propuesto, se ha observado ausencia de resonancias acústicas cuando el funcionamiento del inversor es el de ciclo de trabajo  $D=0,5$  y potencia constante.

Al variar el ciclo de trabajo fuera del margen óptimo ( $D<0,45$  ó  $D>0,55$ ), la descarga se vuelve inestable. Esto implica que, en el margen de frecuencias en el que se ensaya la lámpara, se tienen condiciones de aparición de resonancias acústicas.

Durante el calentamiento, ha habido problemas en algunas de las lámparas, pero ajustando manualmente el ciclo de trabajo se ha logrado estabilizar la descarga cuando ésta era inestable.

En la figura 6.12 se muestran las formas de onda de alta frecuencia obtenidas.

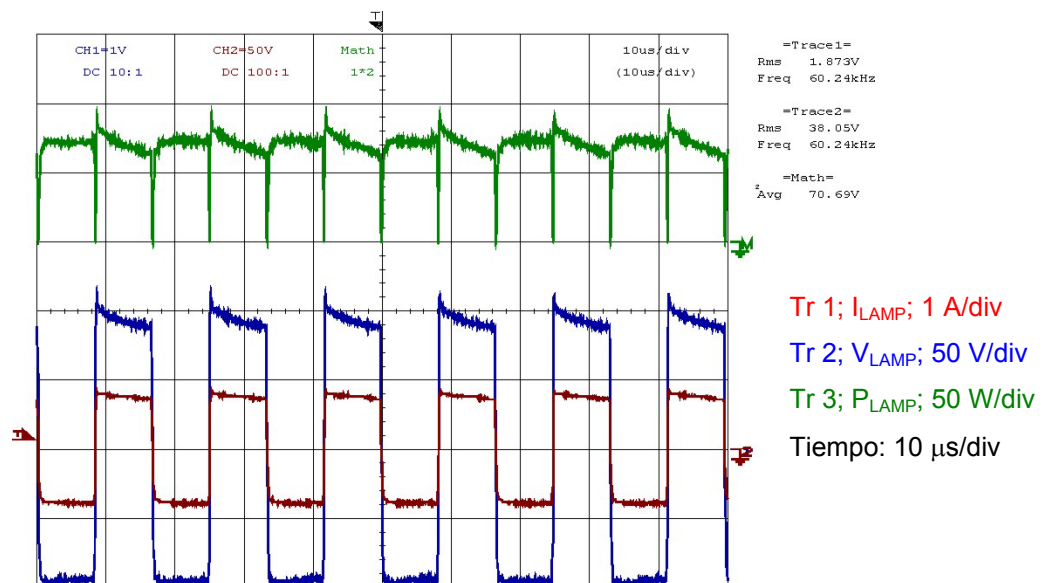


Figura 6.12. Formas de onda de corriente (traza roja), tensión (traza azul) y potencia instantánea (verde), en lámpara de vapor de sodio a alta presión en alta frecuencia (60,2 kHz)

En la figura 6.13 se puede ver un detalle de estas formas de onda para un período de conmutación. En este caso la corriente se mide mediante una sonda de corriente (Tektronix P6021 AC Current Probe); los transitorios en cada período de conmutación que se observaban en la lámpara de vapor de sodio desaparecen.

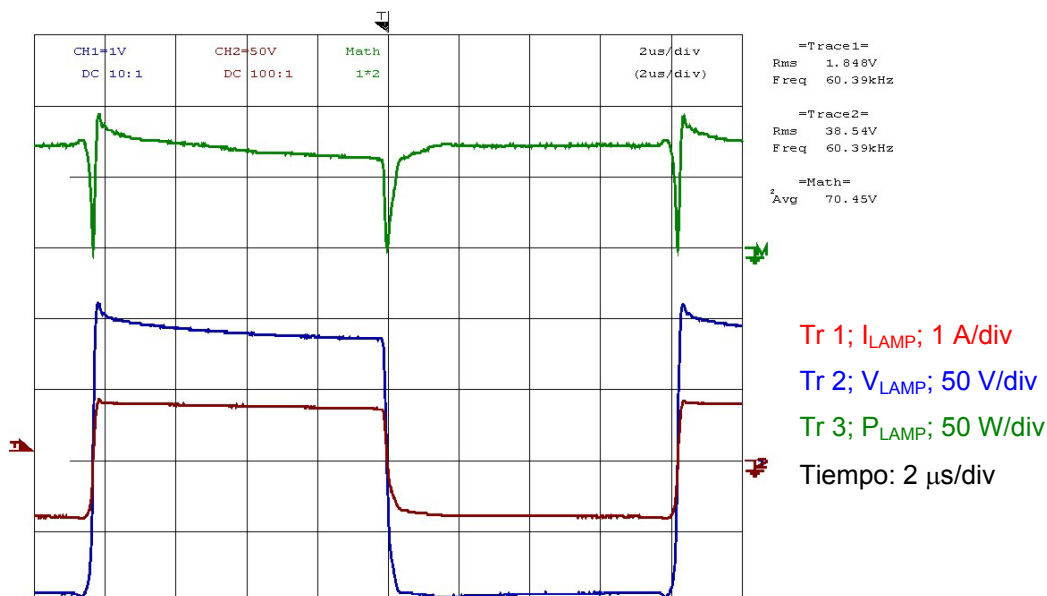


Figura 6.13 Formas de onda de corriente (traza roja), tensión (traza azul) y potencia instantánea (verde), en lámpara de halogenuros metálicos en alta frecuencia (60,2 kHz). Detalle de un periodo de conmutación.

La fase de calentamiento se realiza ajustando manualmente la referencia de potencia de salida. En la figura 6.14 se muestran diferentes instantes del calentamiento de la lámpara.

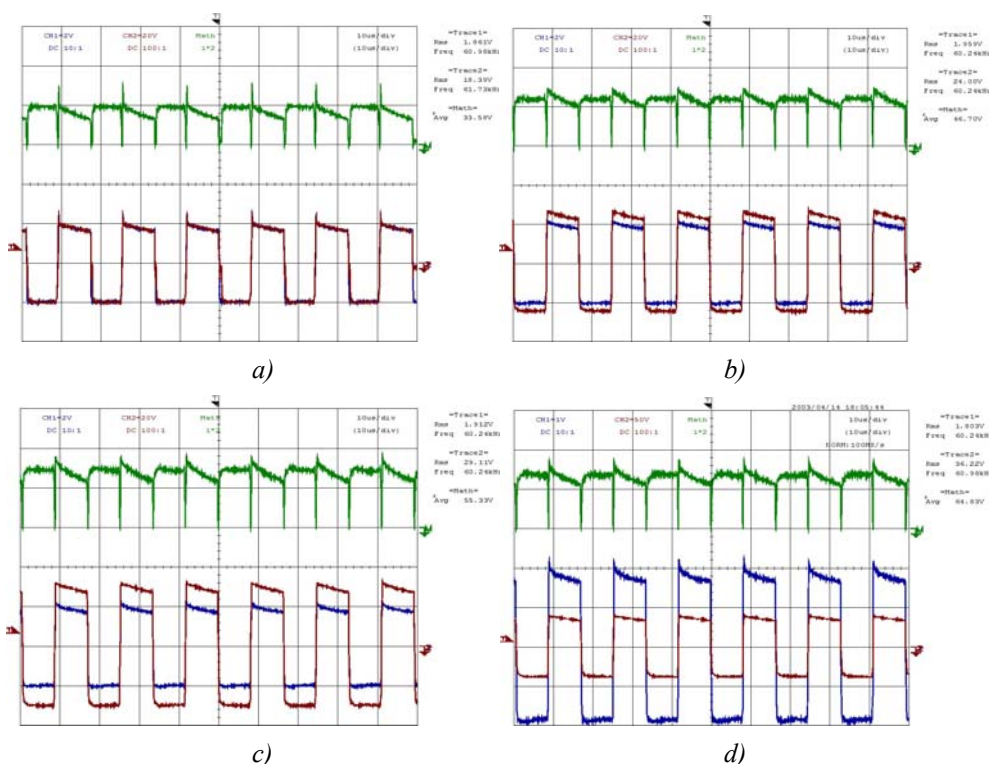


Figura 6.14 Diferentes instantes del calentamiento de la lámpara:

a) Potencia 35 W;

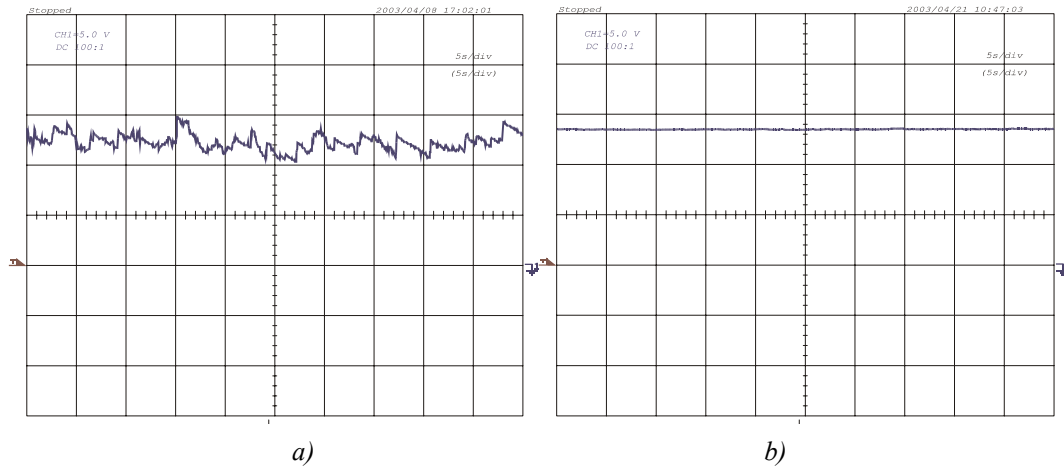
b) Potencia 45 W;

c) Potencia 55 W;

d) Potencia 65 W.

Tr 1;  $I_{LAMP}$ ; 1 A/div Tr 2;  $V_{LAMP}$ ; 50 V/div Tr 3;  $P_{LAMP}$ ; 50 W/div Tiempo: 10  $\mu$ s/div

De modo análogo a lo realizado para la lámpara de vapor de sodio a alta presión, se presenta, en la figura 6.15.a), la variación de potencia media observada, en una lámpara de halogenuros de 70 W, cuando es alimentada mediante balasto de onda senoidal de frecuencia 60 kHz.



*Figura 6.15. Potencia media de salida en lámpara de halogenuros metálicos en situación de inestabilidad debida a resonancias acústicas. b) Descarga estable con el inversor propuesto*

En la figura 6.15.b) se representa la potencia media observada para la misma lámpara alimentada mediante el inversor propuesto (frecuencia de conmutación 60 kHz). Puede verse cómo las fluctuaciones de potencia debidas a resonancias acústicas han desaparecido.

### 6.3 INVERSOR DE 2 INTERRUPTORES.

El diseño del balasto completo basado en el inversor de 2 interruptores se realiza de manera completamente análoga a lo efectuado en el caso del inversor de 1 interruptor.

En la figura 6.16 puede verse el diagrama de bloques del balasto basado en el inversor de dos interruptores. Pueden diferenciarse las dos etapas básicas de potencia, la *Etapas de Adaptación del Bus* y el *Inversor de Salida*. El control básico del inversor de salida se realiza midiendo la corriente por las bobinas (comparando estas corrientes,  $I_{L1}$  e  $I_{L2}$ , con un cierto valor  $REF I_{ML MAX}$ ) y actuando sobre un biestable R-S.

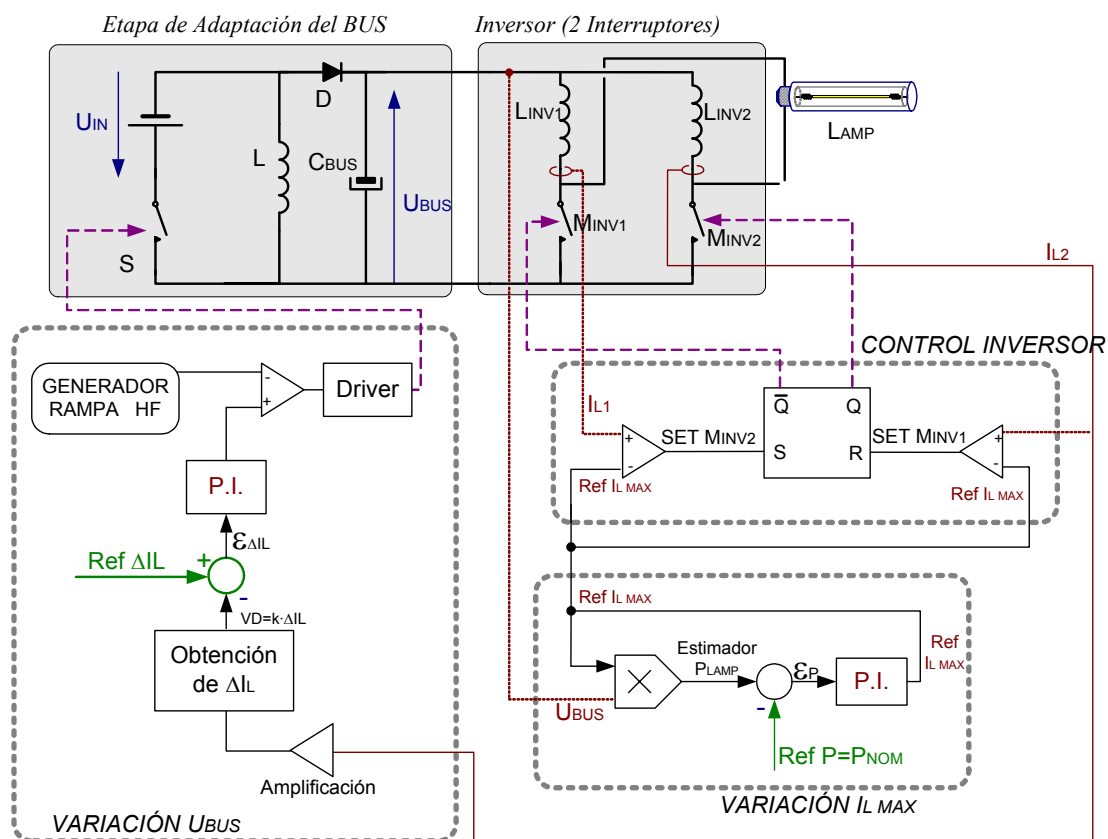


Figura 6.16. Diagrama de potencia y control del inversor de dos interruptores

Además, existen las modificaciones al control propuestas en el presente trabajo:

- **Potencia media constante:** Midiendo el valor del bus de continua, y a través del estimador de potencia, se genera el valor de referencia de la corriente máxima,  $REF I_{L MAX}$ , que fija la potencia de salida del inversor.
- **Variación de la tensión del bus:** Mediante un amplificador (puesto que el rizado de corriente por la bobina es muy bajo), y un bloque "Obtención de  $\Delta I_L$ ", se genera un valor de tensión proporcional al rizado de la corriente por

las bobinas. Este valor es comparado con un cierto valor de referencia,  $Ref \Delta I_L$ . El error resultante,  $\varepsilon_L$ , se introduce en un regulador PI que genera la acción de control que da lugar a los pulsos del reductor-elevador de entrada. La frecuencia de conmutación de esta etapa de adaptación del bus, al igual que en el caso anterior, puede controlarse manualmente gracias al bloque *GENERADOR RAMPA HF*.

### 6.3.1 Diseño de la Etapa de Adaptación del Bus

El reductor-elevador de entrada obtenido es el mismo que en el caso del balasto basado en el inversor de un interruptor.

### 6.3.2 Diseño del Inversor

Se realiza a continuación un diseño del inversor de dos interruptores basado en los valores nominales de las lámparas objetivo del trabajo. El proceso es análogo al realizado para el inversor de un interruptor.

Nuevamente los parámetros de partida del diseño son la potencia nominal de las lámparas y su resistencia equivalente.

$$P_B = P_{NOM} = 75 \text{ W} \quad \text{ec. (6.8)}$$

$$R_B = R_{LAMP-NOM} = 75 \Omega \quad \text{ec. (6.9)}$$

Se toma como frecuencia de conmutación nuevamente  $f_c=60 \text{ kHz}$ , por las mismas razones expresadas anteriormente. En este caso el valor de  $k$  es, de la ecuación (5.125):

$$k_{NOM} = 7 \quad \text{ec. (6.10)}$$

Por tanto, de la ecuación (5.6), se calcula la inductancia base del diseño:

$$L_B = \frac{R_{LAMP-NOM} \cdot k}{f_c} = \frac{75\Omega \cdot 7}{60\text{kHz}} = 8,75 \text{ mH} \Rightarrow L_B = 10 \text{ mH} \quad \text{ec. (6.11)}$$

Fijados  $L_B$ ,  $R_B$  y  $P_B$ , pueden calcularse los demás valores base necesarios (ecuaciones de la (5.7) a la (5.10)).

	Valor Normalizado NOMINAL	Valor Real NOMINAL		Valor Normalizado NOMINAL	Valor Real NOMINAL
Potencia entregada a la lámpara	$\Pi_{LAMP}=1$	$P_{LAMP}=75\text{ W}$	Bus de continua	$M_b=0,5$	$U_{BUS}=38\text{ V}$
Resistencia de la lámpara (nueva)	$Q_{LAMP}=1$	$R_{LAMP}=75\ \Omega$	Corriente máxima por las bobinas	$j_{\lambda\text{ MAX}}=1,038$	$i_{L\text{ MAX}}=1,038\text{ A}$
Inductancia	$\lambda=1$	$L=8,75\text{ mH}$	Rizado de corriente por las bobinas	$\Delta j_{\lambda}=0,075$	$\Delta i_L=0,075\text{ A}$
Frecuencia de Conmutación	$\omega_c=7$	$f_c=60\text{ kHz}$	Corriente máxima por los interruptores	$j_{M\text{ MAX}}=2,038$	$i_{M\text{ MAX}}=2,038\text{ A}$
Periodo	$\Psi_c=0,14$	$T_c=16,7\ \mu\text{s}$	Tiempo de ENCENDIDO del interruptor	$\Psi_{ON\text{ NOM}}=0,07$	$T_{on\text{ NOM}}=8,3\ \mu\text{s}$
Ciclo de trabajo	$D=0,5$	$D=0,5$	Tiempo de APAGADO del interruptor	$\Psi_{ON\text{ NOM}}=0,07$	$T_{off\text{ NOM}}=8,3\ \mu\text{s}$

Tabla 6.6. Valores normalizados, valores Base y valores reales de parámetros en un inversor de dos interruptor funcionando en régimen nominal de diseño.

Con los parámetros de las lámparas del punto 6.2.2 (tabla 6.4), puede procederse a la normalización del circuito y al cálculo de los valores de diseño. El resultado puede verse en la tabla 6.6.

Las consideraciones adicionales sobre elementos magnéticos, el circuito de control y el arrancador son análogas al caso de inversor de un interruptor.

## **6.4 RESULTADOS OBTENIDOS**

El sistema de alimentación y control propuesto ha demostrado ser válido para alimentar lámparas de alta intensidad de descarga en zonas de resonancias acústicas sin que éstas aparezcan.

Además, el calentamiento puede llevarse a cabo de manera controlada (referencia de potencia accesible); más aún, gracias a esta referencia, puede realizarse una regulación de potencia de salida (dimming) de manera sencilla y eficaz.

El balasto de un interruptor, basado en un tiempo de apagado fijo (control  $T_{off}$ ) y en un sistema de regulación del ciclo de trabajo (mantenido constante e igual a 0,5), resulta finalmente en un control de frecuencia constante (al menos para variaciones muy lentas de carga, debidas al envejecimiento, etc). Por ello es posible alimentar la lámpara en bandas de frecuencia en la que se conoce, de antemano, la existencia de resonancias acústicas.

Puesto que con el presente método de alimentación propuesto, a estas frecuencias, no se aprecian resonancias acústicas, puede decirse que el método es válido para las lámparas (halogenuros metálicos y vapor de sodio a alta presión), y las potencias (70W) ensayadas.

## **6.5 REFERENCIAS**

- [1] Cardesín, J.; "Aplicación del Convertidor Reductor a la Corrección del Factor de Potencia en Estructuras Conversoras de Dos Etapas", Tesis Doctoral, Universidad de Oviedo, 2002.
- [2] Corominas, E. L.; "Alimentación de Lámparas Fluorescentes Compactas desde Muy Baja Tensión: Aportaciones a la Optimización del Sistema Electrónico", Tesis Doctoral, Universidad de Oviedo, Marzo 1999
- [3] Corominas, E. L.; Rico-Secades, M.; Fernández, J. A.; Alonso, J. M.; Calleja, A. J.; Ribas, J.; "A Novel Low Cost Two-Stage Electronic Ballast for 250W High Pressure Mercury Vapor Lamps Based on Current-Mode-Controlled Buck-Boost Inverter", APEC 2001
- [4] García, J.; Rico Secades, M.; Jaureguizar, M.; "Balasto Electrónico de Bajo Coste de Dos Etapas para Lámparas de Vapor de Sodio a Alta Presión de 70 W Basado en Inversor Reductor-Elevador con Control en Modo Corriente", XXVIII Symposium Nacional del Alumbrado, CNI, España 2002.
- [5] Lorenzi, S.; "Sistemas para el Automóvil Alimentados a 42 V; Panorámica de la Oferta de Circuitos de Potencia", Mundo Electrónico, Febrero 2003.
- [6] OSRAM, Catálogo General de Luz, '98 - '99, Osram S. A.
- [7] Rico-Secades, M.; García, J.; Cardesín, J.; Calleja, A.; Alonso, J. M.; Ribas, J.; Corominas, E. L.; "Complete Low Cost Two-Stage Ballast for a 70 W High Pressure Sodium Lamp Based on a Current-Mode-Controlled Buck-Boost Inverter", IEEE IAS 2002.