
ESTUDIO DE UN CONVERTIDOR REDUCTOR EN LAZO CERRADO UTILIZANDO UN CONTROL PROPORCIONAL INTEGRAL

Study of a closed loop down converter using a proportional integral control

Marielsi Futrille

Universidad Arturo Michelena. prof.marielsi.futrille@uam.edu.ve

Resumen

El objetivo principal de este trabajo es estudiar el comportamiento del convertidor reductor en lazo cerrado utilizando un control proporcional integral clásico, donde se realizan los cálculos respectivos de cada uno de sus parámetros. Seguidamente se procedió a realizar el análisis del dispositivo electrónico utilizando una herramienta computacional para obtener el comportamiento del voltaje de salida, la corriente del inductor y aplicar variaciones en la carga logrando hacer los ajustes de parámetros de control para lograr la estabilidad del sistema.

Palabras clave: convertidor reductor, control proporcional integral, parámetros de control

Abstract

The main objective of this work is to study the behavior of the closed-loop step-down converter using a classic proportional-integral control, where the respective calculations of each of its parameters are performed. Next, the electronic device was analyzed using a computational tool to obtain the behavior of the output voltage and the inductor current and to apply variations in the load, making adjustments to the control parameters to achieve system stability.

Keywords: step-down converter, proportional integral control, control parameters

Introducción

Un convertidor reductor a lazo abierto, conocido como convertidor Buck es un tipo de convertidor DC/DC que reduce la magnitud del voltaje de entrada a una magnitud menor en la salida, sin utilizar un lazo de realimentación para controlar la salida. Al controlar un proceso o sistema se emplea un módulo controlador que recibe como entrada una o varias variables de control llamadas generalmente referencias y una o varias variables de salida del propio proceso, produciendo como salidas las acciones de control.

Problema de Investigación

Las aplicaciones del convertidor reductor a lazo abierto en el campo de la electrónica de potencia son de suma importancia porque reduce el voltaje de entrada a un nivel menor en la salida, es decir, su eficiencia se destaca por su capacidad para reducir el voltaje de entrada de manera eficiente y económica, lo que lo hace una opción rápida para algunos casos en específicos. No obstante, una de las desventajas del dispositivo reductor en lazo abierto incluye la falta de control preciso sobre la tensión de salida; de modo que la precisión en la regulación del voltaje de salida puede ser menor en comparación con un convertidor a lazo cerrado, lo que podría afectar la estabilidad del sistema por la falta de un mecanismo de control continuo.

Estrategias metodológicas

Una aplicación directa del convertidor reductor a lazo cerrado son las fuentes de alimentación en corriente continua, esta consta básicamente de dos etapas, la etapa de rectificación, que transforma la corriente alterna (AC) en corriente continua (DC). Esto se logra mediante un circuito rectificador, que

convierte las oscilaciones de voltaje de corriente alterna en una señal unidireccional. En la etapa de filtrado la señal de corriente continua rectificada aún puede contener pequeñas fluctuaciones o rizado. Pará suavizar estas variaciones, se utiliza un filtro, el cual consiste en colocar un condensador en paralelo a la salida del rectificador, donde el mismo almacena energía durante los picos de voltaje y libera en los puntos mínimos de la onda reduciendo así el rizado.

El principio de funcionamiento de las fuentes conmutadas consiste en transformar la tensión continua en una serie de pulsos que tienen un ancho determinado; estos pulsos son luego integrados y transformados nuevamente en una tensión continua. (Futrille, Villegas 2007). Variando el ancho de los pulsos, se pueden controlar la tensión de salida de manera eficiente, entonces al tomar solo la potencia necesaria para la carga, reducen la disipación de energía y mejoran su eficiencia.

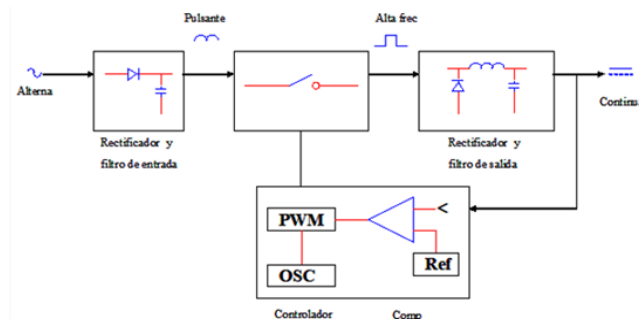


Figura 1: Diagrama de bloques fuente conmutada Fuente (Futrille, Villegas, 2007)

En la figura 1 se muestra el diagrama de una fuente conmutada, específicamente el tercer bloque es la esencia del dispositivo, según la aplicación que se requiera puede adoptar tres configuraciones distintas; siendo estas estructuras circuitos electrónicos de potencia que convierten un nivel de tensión en otro distinto clasificándose en reductor, elevador y reductor-elevador. Para este análisis solo estudiara el convertidor reductor, así como se muestra en la siguiente representación grafica

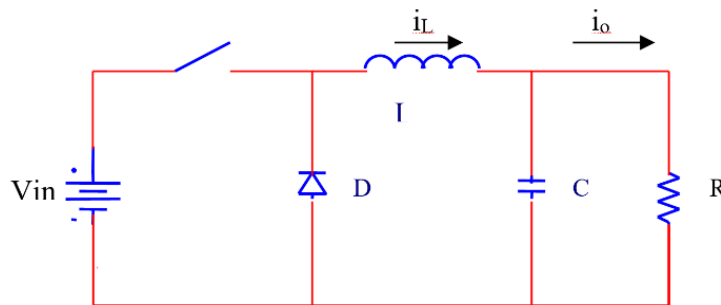


Figura 2: Topología básica de un convertidor reductor (Buck) Fuente (Futrille, Villegas, 2007)

Según Hart (2001), las variables características de un convertidor reductor DC/DC en funcionamiento de modo continuo son:

V_{in} : Voltaje de entrada, V_o : Voltaje de salida

I_L : Corriente promedio del inductor, $I_L = \frac{V_o}{R}$

$$I_{L_{\max}} : \text{Corriente máxima del inductor; } I_{L_{\max}} = V_o \left[\frac{1}{R} + \left(\frac{(1-D)}{2fL} \right) \right] = I_L + \frac{\Delta i_L}{2}$$

$$I_{L_{\min}} : \text{Corriente mínima del inductor; } I_{L_{\min}} = V_o \left[\frac{1}{R} - \left(\frac{(1-D)}{2fL} \right) \right] = I_L - \frac{\Delta i_L}{2}$$

$$\Delta i_L : \text{Variación pico a pico de la corriente del inductor, } \Delta i_L = \frac{(V_{in} - V_o)}{L} D T$$

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} : \text{Rizado del Voltaje de salida; } f : \text{Frecuencia de conmutación } T = \frac{1}{f} (s)$$

$$D : \text{Ciclo de trabajo. } D = \frac{V_o}{V_{in}} \quad L_{\min} = \frac{R(1-D)}{2f} \quad , \quad C = \frac{(1-D)}{8L \left(\frac{\Delta V_o}{V_o} \right) f^2}$$

Las ecuaciones que se describieron en la parte superior representan la caracterización del dispositivo electrónico de potencia. Entonces al realizar los cálculos de diseño se debe garantizar la corriente del inductor quede funcionando en modo continuo, por consiguiente, se considera el valor de la inductancia por encima del valor de inductancia mínima L_{\min} calculada. Asimismo, al realizar el cálculo del valor capacitivo se debe tomar en cuenta el ciclo de trabajo, la relación de variación del voltaje de salida, el voltaje de salida y la frecuencia de conmutación.

Ahora bien, Futrille&Villegas (2007), hacen el estudio del convertidor reductor DC/DC, con un lazo de control proporcional integral para analizar la respuesta del sistema considerando los siguientes parámetros: $V_{in} = 50 \text{ VDC}$, $V_o = 20 \text{ VDC}$, y $\frac{\Delta V_o}{V_o} = 3\%$ y el circuito de modulación ancho de pulso opera a 5 KHz, luego aplicando los modelos matemáticos anteriores se tiene los siguientes valores:

- Para la frecuencia establecida el periodo de la PWM será de $T = \frac{1}{5K} (s) = 200\mu s$;
- El ciclo de trabajo en modo continuo es $D = \frac{20}{50} = 0,4$
- El valor de la inductancia $L_{\min} = \frac{4(1-0.4)}{2 \times 5 \times 10^3} = 0.24mH$; con el fin de garantizar que la corriente del inductor trabaje en modo continuo se selecciona un valor de inductancia por encima del valor mínimo, entonces se selecciona $L = 1mH$
- El valor de la capacitancia $C = \frac{(1-0.4)}{(8 \times 1 \times 10^{-3}) \left(\frac{0.6}{20} \right) (5 \times 10^3)^2} = 100\mu F$
- La variación pico a pico de corriente del inductor $\Delta i_L = \frac{(50-20)}{1 \times 10^{-3}} 0.4 \times 200 \times 10^{-6}$
siendo $\Delta i_L = 2.4A$

A través de la herramienta computacional Orcad, se logra representar y estudiar el esquemático del dispositivo de potencia, así como se muestra en la figura 3 donde se simula la topología básica de un convertidor reductor en lazo cerrado colocando en la entrada del sistema una señal PWM

(Modulación por ancho de pulso), de modo que realiza los ajustes en la entrada del sistema en relación con las variaciones que tenga la salida del dispositivo.

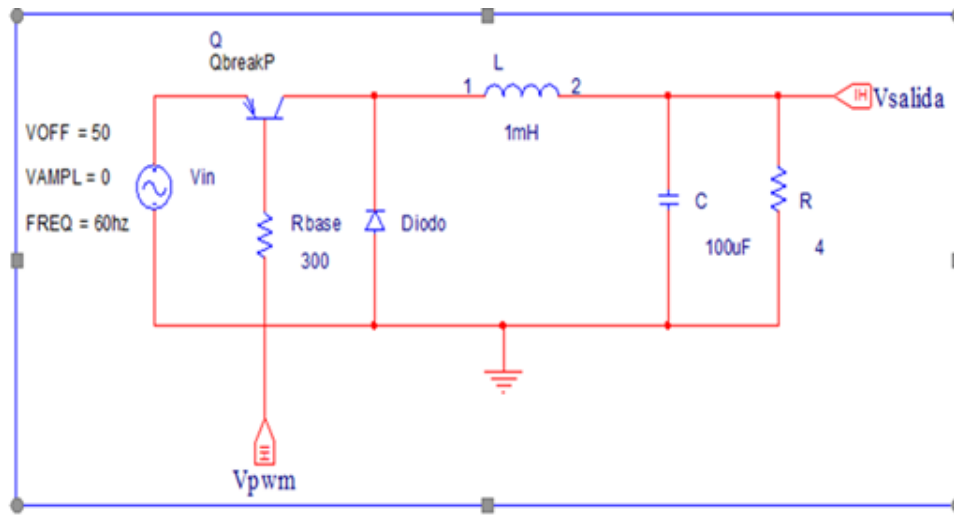


Figura 3: Topología convertidor reductor a lazo cerrado
Fuente (Futrille, Villegas, 2007)

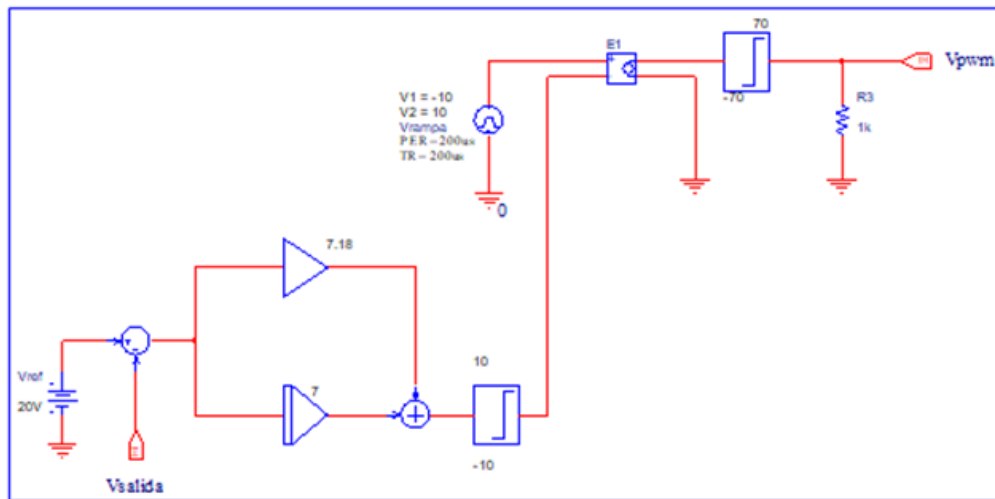


Figura 4: Topología lazo reductor
Fuente (Futrille, Villegas, 2007)

Según Futrille & Villegas (2007) se inserta un lazo de control proporcional integral para este ajuste de los parámetros K_p y K_i haciendo uso del criterio de Ziegler-Nichols como referencia y los ajustes de estos valores de K_p y K_i se hace según las diversas variaciones que se realizan en el ensayo obteniendo un resultado satisfactorio en los valores 7,18 y 7 respectivamente, esquema mostrado en la figura 4.

Para lograr la regulación del voltaje de salida se utiliza un lazo de control del tipo proporcional integral (PI), tomando muestras de la salida y controlando la tensión de entrada al generador PWM que produce la señal de mando del interruptor. Este método de sintonización permite definir las constantes ganancia proporcional (K_p) y ganancia integral (K_i) a partir de la respuesta del sistema en

lazo abierto o en lazo cerrado. Los valores propuestos por este método buscan lograr en el sistema realimentado una respuesta al escalón con un sobre impulso máximo del 25%, lo que se considera un valor robusto con buenas características de rapidez y estabilidad para la mayoría de los sistemas.

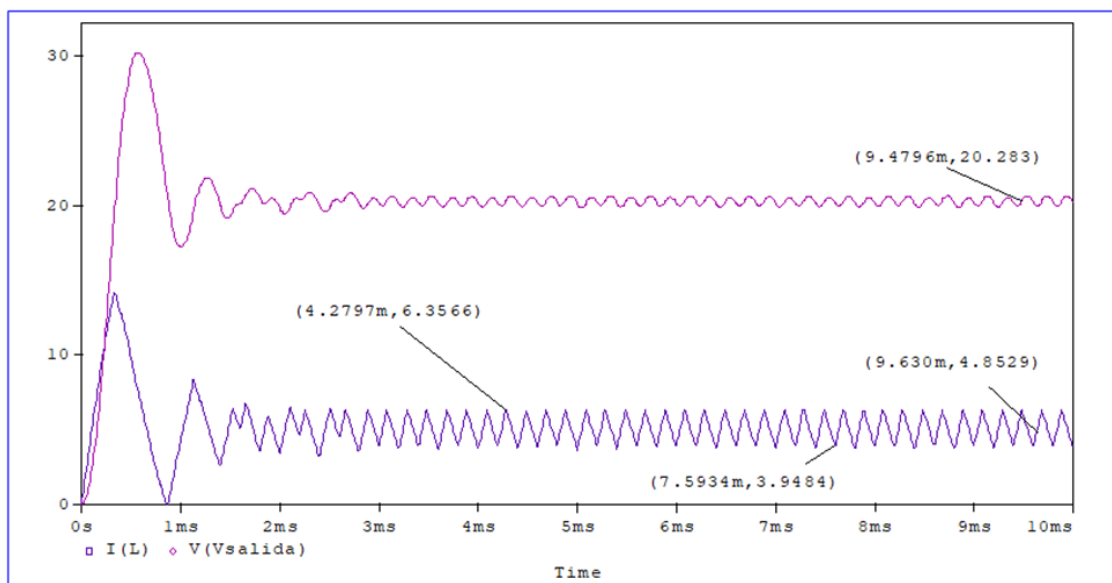


Figura 5: Voltaje de salida a lazo cerrado
Fuente: (Futrille, Villegas, 2007)

En la figura 5 se muestra el voltaje de salida del convertidor reductor en lazo cerrado, donde se observa que el voltaje de salida que logra estabilizarse al final reduciendo el rizado de señal.

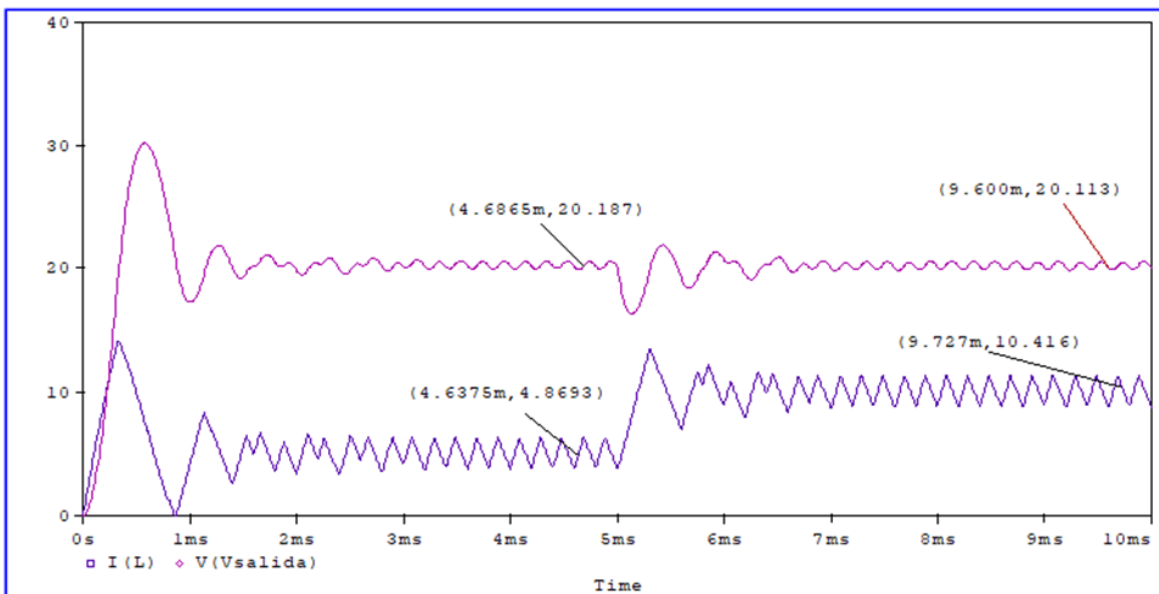


Figura 6: Voltaje de salida a lazo cerrado con variación en la carga de 4Ω a 2Ω .
Fuente: (Futrille, Villegas, 2007)

En la figura 6 se muestra el voltaje de salida para el convertidor reductor en lazo cerrado y la corriente del inductor al realizarse una variación de la carga de 4 ohmios a 2 ohmios, donde se observa que la estabilidad del sistema se mantiene al presentar una perturbación en la carga.

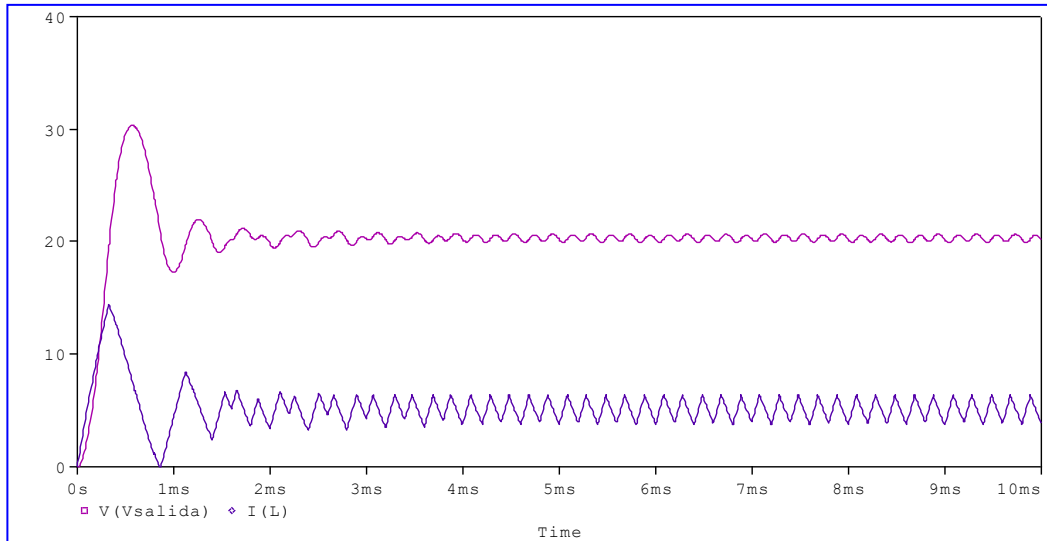


Figura 7: Variación del voltaje de entrada a 51V
Fuente: (Futrille, Villegas, 2007)

En la figura 7 se observa que al realizar variación en el voltaje en la entrada del dispositivo reductor el voltaje de salida se mantiene en el rango de valor establecido dentro de los parámetros de diseño del circuito reductor.

En las tablas 1 y 2 se muestra en la parte posterior se indican los parámetros de ajustes de ajustes de control K_p y K_i y las variables que caracterizan al circuito reductor Buck en estudio obtenido en las simulaciones realizadas con la herramienta computacional de simulación de circuitos electrónicos Orcad.

Parámetros de ajuste del controlador PI	
K_p	7.18
K_i	7.0

Tabla 1: Parámetros K_p y K_i .
Fuente: (Futrille, Villegas, 2007)

Variable	Resultado
V_0	20.283V
I_L	4.853A
$I_{L\max}$	6.357A
$I_{L\min}$	3.948A
$\frac{\Delta V_o}{V_o}$	0.03165

Tabla 2: Resultados de las gráficas obtenidas en el Orcad.
Fuente: (Futrille, Villegas, 2007)

Análisis de los Resultados de la Investigación

Los parámetros de ganancia proporcional (K_p) y ganancia integral (K_i) se ajustan de modo que, el sistema de control logre corregir el error entre la variable de salida medida y el punto de ajuste que se

desea, en este caso 20V con un rizado de la señal del voltaje de salida de aproximadamente de un 3% según los requerimientos establecidos para este diseño.

Cuando se hace el análisis de la forma de onda de la tensión de salida en régimen permanente se verifica que el sistema de control hace la regulación en la carga cuando ella se varia por debajo del valor nominal, logrando mantener la estabilidad del sistema a pesar de que se presenta un pequeño sobrepulso cuando ocurre la perturbación en la salida del circuito reductor.

Conclusiones y Recomendaciones

En un convertidor reductor de corriente continua a corriente continua en lazo cerrado, el sistema de control monitorea y ajusta continuamente la salida del dispositivo para mantenerla en línea con la referencia deseada. Este enfoque permite una regulación precisa y estable del voltaje de salida, lo que es fundamental en numerosas aplicaciones de electrónica garantizar un rendimiento óptimo.

El control proporcional integral (PI) es una técnica de los sistemas de control que permite corregir el error entre una variable de proceso medida y el punto de ajuste deseado. Los parámetros ganancia proporcional (K_p) y ganancia integral (K_i) se deben elegir de manera minuciosa logrando optimizar la acción de control antes distintas perturbaciones que se presenten en el sistema a controlar. Cuando se diseña un lazo de control clásico como el proporcional integral o el proporcional derivativo se requiere hacer estudio matemático por consiguiente el diseñador lleva mucho más tiempo y en ocasiones se hace un poco más costoso al implementar.

En ese orden de ideas se recomienda realizar el estudio del comportamiento de estos dispositivos de potencia, utilizando técnicas de control basado la inteligencia artificial como las Redes Neuronales Artificiales, la Lógica Difusa, Control Adaptativo u algún otra que sea útil y aplicable en el área de controladores con el fin de mejorar la precisión, la estabilidad y la capacidad de adaptación de los sistemas a entornos cambiantes.

Referencias Consultadas

- Campos, D. (2005), Experimentos en Teoría de Control Convertidores CD-CD, Facultad de Ciencias (UASLP)
- Corripio, S. (2001), Control automático de procesos, Editores Limusa Noriega, Capítulo 6. Pág. 225-340.
- Diaz, A. (Enero 2001), Elaboración y sintonización de controladores PID usando lógica difusa, Sartenejas, Baruta Universidad Simón Bolívar.
- Futrille, M. & Villegas, Y. (2007) Diseño de un lazo de control proporcional integral utilizando lógica difusa en un convertidor reductor DC/DC
- Hart, D. (2002), Introducción a la Electrónica de Potencia, Madrid, Pearson Educación.
- Indiarte, E. (2001), Aportación de la lógica borrosa y del control H_∞ a la regulación de los sistemas continua-continua. Tesis Doctoral Universidad Politécnica de Cataluña. Capítulo III
- Malik, N. (1999), Circuitos electrónicos. Análisis, diseño y simulación, Madrid, PRENTICE HALL.
- Ogata, K. (1993), Ingeniería de control moderna, Mexico, Pearson Educación.
- Olívar, G. (1987). Chaos in the Buck Converter, Universitat de Catalunya.