

Implementación digital de un doble lazo de control tensión/corriente para el control de inversores de potencia embarcables en aviones

A.B. Duret, D. Meneses, F. Moreno, O. Garcia, J.A. Oliver, P. Alou, J.A. Cobos

Abstract—En este artículo se presenta el control digital de un inversor de potencia embarcable en aviones basado en el control de un PWM con una modulación unipolar del tipo rama lenta – rama rápida. En este caso, la rama lenta tiene una frecuencia de 400Hz (frecuencia de salida). Para tener precisión en la forma de onda de salida, la modulación en frecuencia (mf) es de 100, así que la rama rápida conmuta a 40kHz lo que supone un tiempo de cálculo de 25 μ s para la computación del lazo de corriente y el lazo de tensión. Además, se ha implementado un protocolo de comunicación para poder poner los inversores tanto en paralelo como en trifásico. El objetivo del artículo es de implementar un control de un inversor de potencia en un DSP de bajo coste.

Keywords-component; Digital Signal Processor ; Control Loop design ; Communication protocol ; Inverter ;

I. INTRODUCCION

Los inversores de potencia se utilizan en aplicaciones como energía solar fotovoltaica [1] o aviónica [2]. Los sistemas críticos tienen que tener un sistema de tipo UPS. En el estado del arte, los Sistemas de Alimentación Ininterrumpida (UPS por sus siglas en inglés) se suelen controlar con un DSP con una frecuencia de la señal de salida de 50Hz (o 60Hz) [3]-[5]. Una modulación en frecuencia (mf) (proporción entre la frecuencia de dos ramas del puente completo, en caso de usar una rama lenta y una rápida) elevada es necesaria para tener una precisión elevada. Así que si se quiere una señal sinusoidal a la salida de 50Hz y si se utiliza una topología rama lenta/rama rápida, la rama rápida sería de 5kHz (mf = 100). Así, se tiene un periodo de 200 μ s. Este tiempo se usa para calcular el próximo ciclo de trabajo. Cuanto mayor sea el tiempo disponible, más fácil es la implementación de los lazos de control y/o de las protecciones. En este artículo, se propone el control de un inversor de potencia a 400Hz, así que la frecuencia de conmutación de la rama rápida es de 40kHz, lo que impide un tiempo de cálculo máximo de 25 μ s.

El aspecto crítico en la calidad de los UPS es el tipo de control y el tipo del PWM que se va a usar. Tradicionalmente, se emplea el método de control analógico. Una técnica natural de generación de PWM de forma analógica es comparar una forma de onda sinusoidal con una señal triangular. Esos componentes son sensibles a la temperatura sobre todo cuando están a alta frecuencia (típicamente 20kHz). Cuando un circuito es afectado por un ruido EMI o por la temperatura, puede causar problemas en la conmutación de los MOSFETS del puente y así, incrementar los armónicos de la forma de onda a la salida. Además, los tiempos muertos necesarios entre las conmutaciones se hacen con comparadores y/o monoestable que son muy sensibles al ruido.

Otra posibilidad para controlar un puente completo en la generación de una señal sinusoidal es mediante un microprocesador y un generador de señal PWM ayudado de un Convertidor Analógico Digital (ADC). La particularidad de los DSP (Digital Signal Processor) es tener todo ello embebido. Así, con los datos del ADC, con la referencia digital y con los datos anteriores del ciclo de trabajo, se calcula el ancho de pulso utilizado en el PWM.

Ahora, la frecuencia de la rama rápida limita el tiempo de cálculo para calcular los filtros digitales de las medidas, los lazos de control, el controlador de los PWM y, además, el sistema de comunicación para la puesta en paralelo. Así que se tiene que elegir un procesador con una potencia de cálculo importante u optimizar mucho el código para no superar al periodo de la rama rápida del sistema.

En este artículo se presenta la optimización del tiempo de cálculo de los lazos de control y sistemas de comunicación para un control digital implementado en un DSP de bajo coste para el control de inversor de potencia. Además, se propone un regulador con ganancia grande a 400Hz.

II. - CONTROL DEL PWM EN MODO CORRIENTE Y MODO TENSIÓN

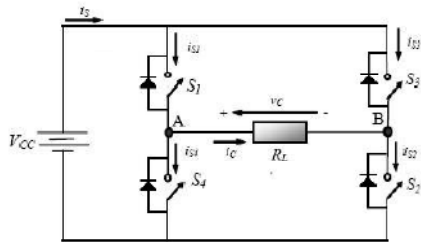


Figura 1: Puente completo del inversor monofásico

La figura 1 muestra el puente completo controlando el inversor de una fase del inversor. La modulación unipolar rama lenta – rama rápida impone al filtro una tensión cuadrada cuyo valor promedio es la tensión sinusoidal de salida deseada. Basándonos en este hecho, se ha obtenido un modelo promediado cuya representación en Matlab Simulink para el control en modo corriente se presenta en la figura 2.

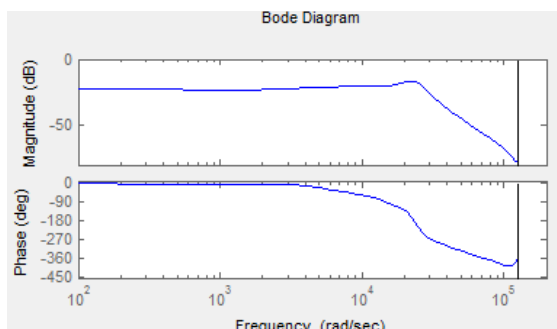


Figura 2: Diagrama de Bode del sistema

Se puede apreciar, en la figura 2, el diagrama de bode del inversor. En continua, se busca una ganancia grande en esa frecuencia. Pero, para un inversor a 400Hz, se busca una ganancia grande a 400Hz. Por eso, este control se realiza con un regulador de orden 4 como se puede ver en la figura 3, con una resonancia a la frecuencia de la tensión de salida. Se ha tenido que implementar esta resonancia para quitar el error en régimen permanente a 400Hz [6]. Efectivamente, el sistema tiene una rama lenta. Se produce un desfase debido al filtro de salida y a la carga. Si la carga cambia, el desfase entre la referencia y la corriente de salida cambia también y se produce un problema en el cruce por cero. Un polo complejo a 400Hz que se ha puesto en el regulador da suficiente ganancia para quitar el desfase.

El regulador ha sido diseñado para que regule una corriente de tal forma que la tensión de salida sea sinusoidal a 400Hz para cualquier carga, siguiendo la

referencia del lazo de tensión. La Fig. 4 representa las formas de onda de la corriente y de la tensión para tres cargas diferentes.

En la figura 4 se puede ver la tensión de salida (arriba) y la corriente en la bobina del filtro. El sistema está controlado en modo corriente, así que la corriente en la bobina tiene que seguir la referencia. Se puede apreciar que la corriente no cambia mientras la tensión de salida pasa de 50V a 150V de pico.

La regulación de la tensión de salida se basa en el mismo diseño que la regulación en modo corriente. Es decir un regulador de orden 3 con un polo doble a 400Hz, al igual que en el regulador de corriente. Se puede ver el diagrama de bode de este regulador en la figura 6. En la Figura 5, se puede ver el sistema modelado en Matlab Simulink® para el control en modo tensión

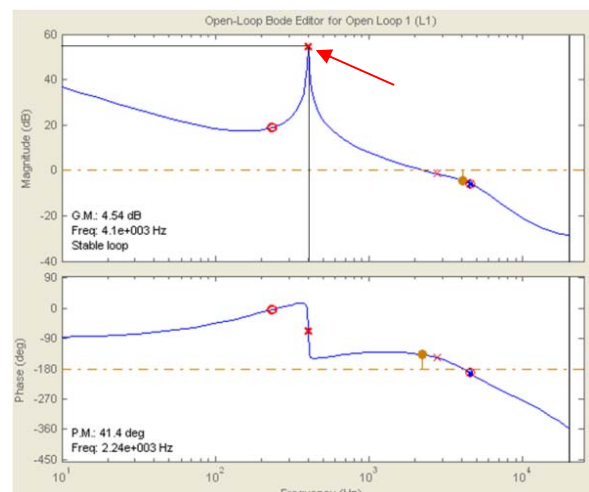


Figura 3: Diagrama de Bode del lazo de corriente.

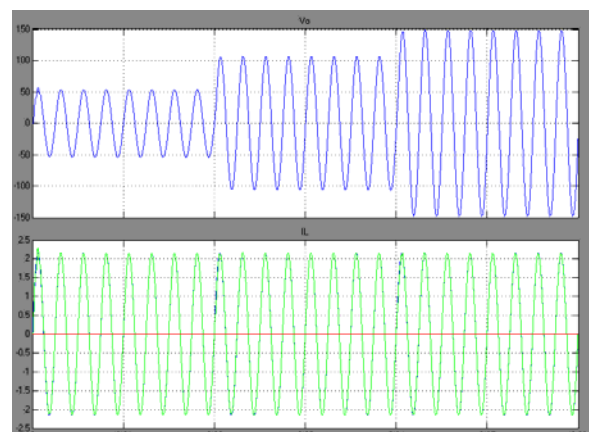


Figura 4: Simulación en modo corriente.

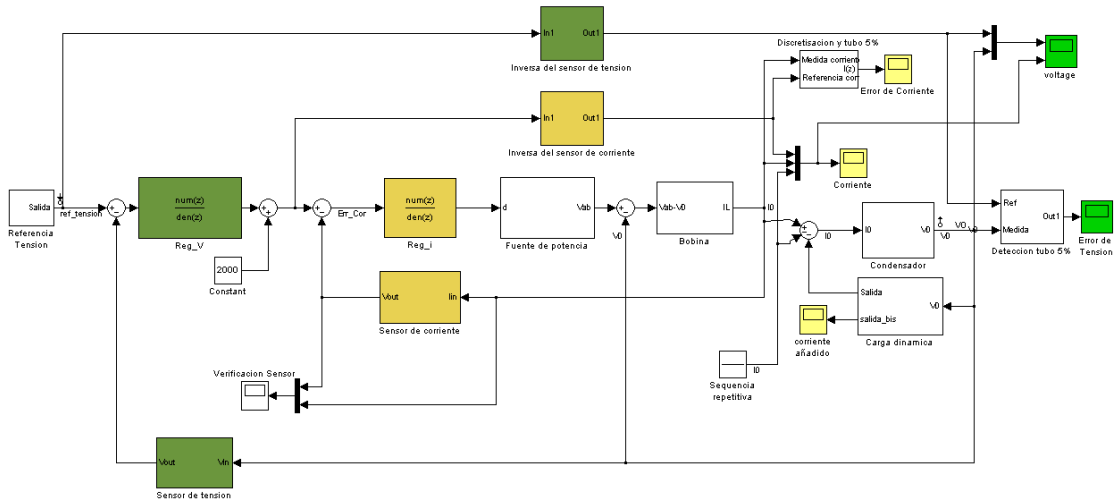


Figura 5 Modelo del sistema en control modo tensión

Se puede ver, en la figura 7, la tensión de salida (arriba en verde), la referencia de tensión (arriba en azul), la referencia de corriente (abajo en azul) y la corriente real de salida (abajo en verde). El regulador de tensión calcula, en función de la tensión de salida, de la referencia de tensión y de la corriente, la referencia de corriente que tiene que seguir el sistema. Entonces, el lazo de corriente es más rápido que el de tensión.

Las ventajas de tener un doble lazo de control (corriente y tensión) son la robustez y la posibilidad de poner los inversores en paralelo con un sistema de maestro/esclavo donde el esclavo es controlado en modo corriente y el maestro controla la tensión.

El sistema, aquí propuesto, está realizado en Matlab Simulink®, teniendo en cuenta que los coeficientes de los reguladores son decimales. El DSP que se utilizará (DSP TMS 320F2808) es de punto fijo, por lo que la implementación puede ser de dos maneras. La primera es usando números decimales en punto flotante (float). Los DSP de punto fijo pueden hacer cálculos usando este tipo de números, pero son muy lentos. Usando números en punto flotante, se ejecutaba el lazo de corriente en 22µs cuando se tiene un tiempo de computación máxima de 25µs (periodo de conmutación de 40kHz). Entonces, sería más adecuado optar por un DSP con una unidad de cálculo en punto flotante, pero es una solución más cara. La segunda posibilidad es optimizar el código usando una biblioteca de cálculo en punto flotante que traduce de punto flotante a punto fijo usando una aproximación del mismo número, codificándolo sobre N bits ($1 < N < 31$) de resolución.

La biblioteca IQmath de Texas Instrument [7] es una colección de funciones matemáticas muy optimizadas que se usan en los DSP de punto fijo, para

codificar números en punto flotante. Usando esta biblioteca se ha podido optimizar el tiempo de computación del lazo de corriente 22µs a 7.5µs.

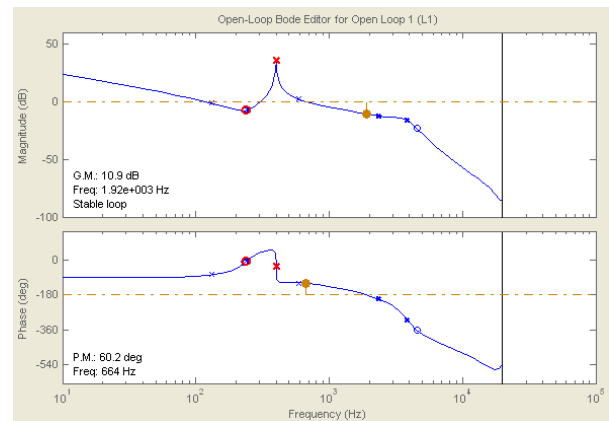


Figura 6: Diagrama de Bode del lazo de tensión.

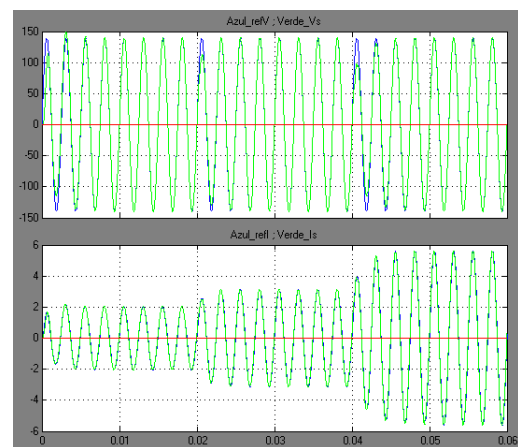


Figura 7: Simulación del control en modo tensión.

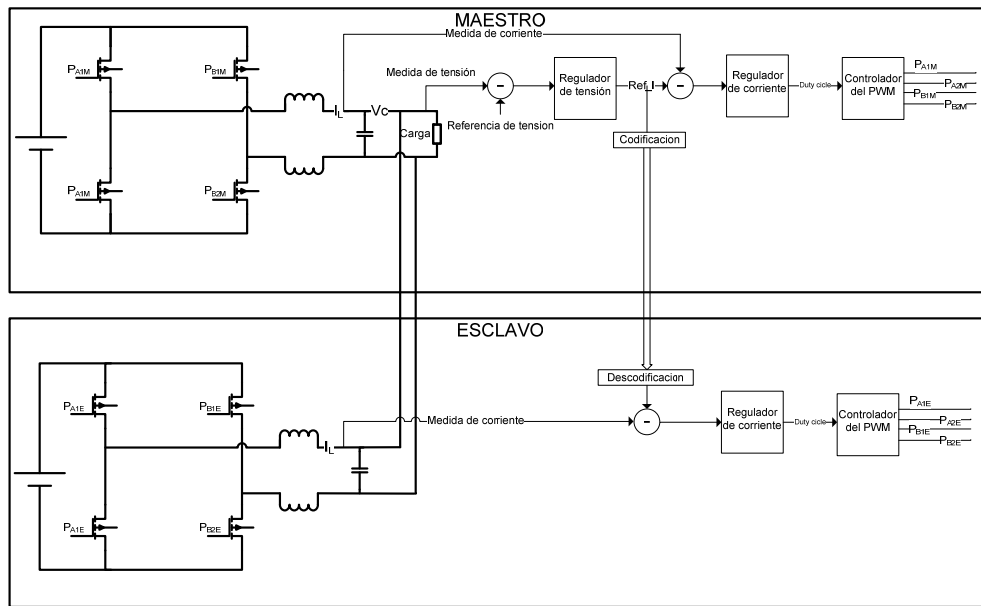


Figura 8: Esquemático de la puesta en paralelo de los inversores de potencia

III. SISTEMA DE COMUNICACION DEL INVERSOR DE POTENCIA

Una posibilidad para incrementar la potencia en el sistema es la conexión de inversores en paralelo. En la topología Maestro-esclavo, el Maestro controla la tensión de salida y los esclavos proporcionan la corriente que demanda el maestro. El maestro da la referencia de corriente al esclavo mediante un bus de comunicación funcionando por interrupciones. La Figura 8 representa este sistema.

Se puede apreciar, en la figura 8, el maestro (arriba) que tiene un regulador de tensión y de corriente. Al final del regulador de tensión, se codifica la referencia de corriente y se comunica al esclavo que lo descodifica y lo usa para calcular su ciclo de trabajo con su regulador de corriente. Es decir, el esclavo no tiene regulador de tensión habilitado.

El sistema de comunicación codifica la referencia de corriente sobre 10 bits. El maestro interrumpe al "DSP esclavo" que recibe la referencia de corriente sobre 10 GPIOs (General Purpose Input Output) y los descodifica. Una vez descodificada, el esclavo manda una confirmación de recepción, mediante una interrupción, al maestro para indicarle que la comunicación se ha realizado. Además de ser muy robusto frente al ruido exterior porque se envía en digital, se codifica y se envía en un tiempo máximo de 2 μ s.

Se puede apreciar, en la figura 9, La rama lenta del sistema (amarilla), la rama rápida (rosa oscura), la medida de la corriente de salida (verde) y los 10 bits de codificación (rosa claro).

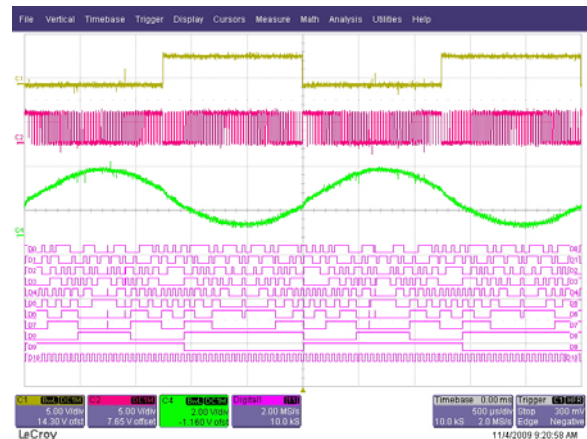


Figura 9: Sistema de comunicación

IV. PROGRAMACION DEL DSP TMS320F2808

El programa empieza por una inicialización de sus registros. El PWM tiene que ser configurado con una frecuencia de 40kHz, los GPIOs tienen que ser configurados como entrada o salida, dependiendo de su uso, el WatchDog tiene por su parte su propia inicialización, etc.

Cuando el sistema está listo para empezar, se habilita la interrupción del PWM a 40kHz (rama rápida). Esa interrupción arranca el Convertidor Analógico Digital para las medidas de corriente y tensión. A su vez, se mantiene el sincronismo con la rama lenta mediante un contador y se hace la conversión de los datos recibidos (ADC).

Cuando se tienen los datos, el ADC interrumpe el sistema y se tratan los datos. Se empieza por verificar que el 0V del ADC y del sistema son iguales. Si no es así, se toman 20 valores sin que el sistema funcione, se suman los valores y se dividen por 20 para que se identifique, en el DSP, el 0V del sistema.

Una vez inicializado el sistema, se calcula los lazos de la siguiente manera (figura 10). Se filtran los datos digitalmente con un filtro promedio. Se calcula la referencia de corriente gracias a la medida filtrada de la tensión. Se codifica la referencia de corriente sobre 10 bits y se transmite al esclavo. Se calcula el ciclo de trabajo con la referencia de corriente y la medida de corriente. Se actualizan los registros del PWM con el nuevo valor del ciclo de trabajo, multiplicándolo por el ancho de pulso máximo que se puede tener de tal manera que el ciclo de trabajo se refleja en el PWM.

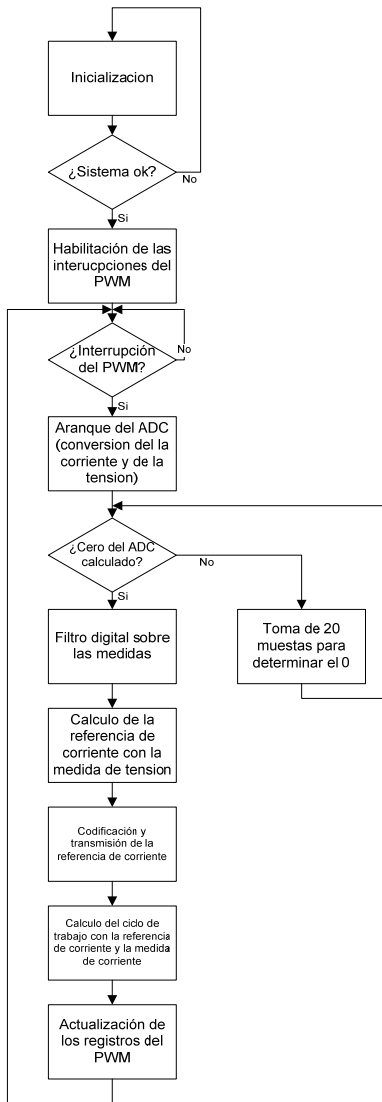


Figura. 10: Diagrama de bloque del programa

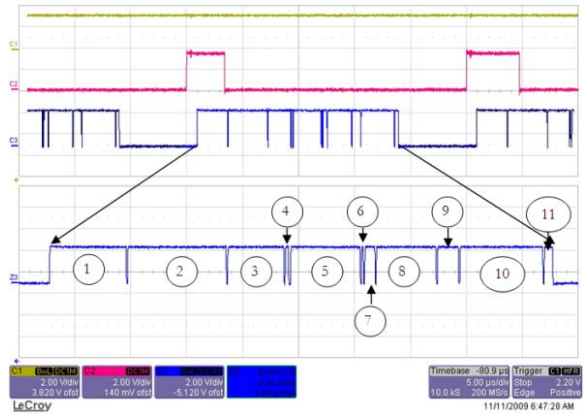


Figura. 11: Tiempo de computacion

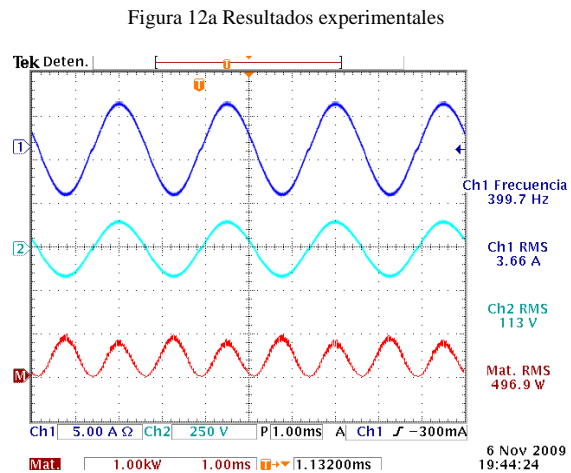
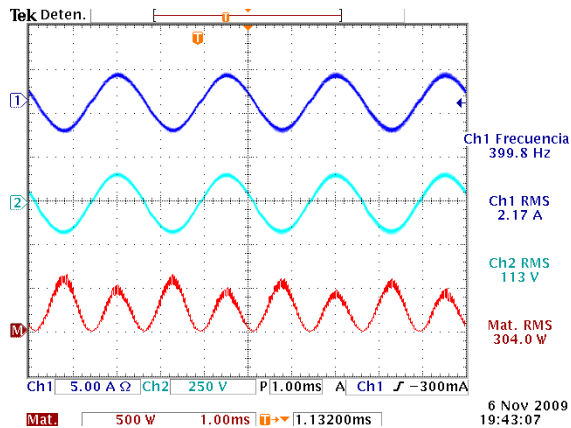
Se optimiza para obtener tiempos pequeños al fin de poder computar todo el sistema en menos de $25\mu\text{s}$. Las muestras de la corriente y de la tensión se hacen justo después del flanco de subida de la rama rápida (en rosa en la figura 11)

- 1: Filtro digital / $2.73\mu\text{s}$
- 2: regulador de tensión / $3.53\mu\text{s}$
- 3: Codificación de la referencia de corriente / $2\mu\text{s}$
- 4: Desplazamiento de la tabla de error de corriente / 120ns
- 5: Desplazamiento de la tabla de los antiguos ciclos de trabajo / $2.485\mu\text{s}$
- 6: Cálculo del nuevo error de corriente / 60ns
- 7: Cálculo del numerador del regulador de corriente / 365ns
- 8: Cálculo del denominador del regulador de corriente / $2.14\mu\text{s}$
- 9: Programa de almacenamiento de datos (Solo por la fase de pruebas) / 775ns
- 10: Controlador del PWM / $2.96\mu\text{s}$
- 11: Actualización de los registros / 305ns

El tiempo total, con el filtro, los cálculos de los dos reguladores, el sistema de comunicación y el programa de prueba, es de $17.98\mu\text{s}$, menor que $25\mu\text{s}$.

V. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Para validar los estudios teóricos realizados, se ha construido un inversor de 115V y 400Hz con una potencia nominal de 350VA. El control del inversor se realiza con un DSP TMS 320F2808, o incluso en uno de menor coste como el TMS 320F28027, en el que se implementa los lazos de control con la codificación utilizando la biblioteca IQmath.



En las figuras 12a y 12b, se puede apreciar el funcionamiento del sistema (corriente, tensión y potencia de salida) con 2 diferentes cargas. Así, se puede ver que la tensión es de 113V_{EFF} a 400Hz mientras la corriente puede ser de 2.17A_{EFF} o 3.66A_{EFF}. La tasa de distorsión máxima (THD) que se ha medido es del 2% con un rendimiento de 96% a plana carga.

Las diferencias entre las amplitudes de semi-ciclos consecutivos que se pueden observar en la potencia en las figuras 12a y 12b son debidas a un offset en la sonda de corriente..

VI. CONCLUSIONES

Este artículo presenta una implementación de un doble lazo de control corriente/tensión para un inversor embebido en un avión. El DSP TMS320F2808 de Texas Instruments® ha sido empleado para el control de este inversor con una modulación rama lenta (400Hz)/Rama rápida (40kHz). Un control digital con un doble polo a la frecuencia de conmutación de la rama lenta (400Hz) ha sido implementado tanto en el regulador de corriente como en el de tensión. Con esta ganancia se evita el error en régimen permanente en ambos lazos. A fin de poder tener más potencia entregada a la carga, el sistema de puesta en paralelo ha sido implementado con una topología Maestro/Esclavo. El maestro tiene el control de la tensión de salida que genera la referencia de corriente que se envía al Esclavo mediante un bus de comunicación digital.

Gracias a la utilización de la biblioteca IQmath, se ha conseguido reducir a 18 μ s el cálculo de los filtros, los dos lazos y el sistema de comunicación, frente a 22 μ s de cálculo de únicamente el lazo de corriente en el caso de usar números en punto flotante.

El sistema, en su totalidad, permite tener una señal sinusoidal a la frecuencia de 400Hz, controlando en tensión y corriente, con una potencia máxima de 350VA, un rendimiento de 96% y una tasa de distorsión armónica (THD) de 2% comprobados experimentalmente.

REFERENCIAS

- [1] Jewell, W.T., "Electric utility experience with solar photovoltaic generation," *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol.4, no.2, pp.166-171, Jun 1989
- [2] A new control method for 400-Hz ground power units for airplanes. Jensen, U.B.; Blaabjerg, F.; Pedersen, J.K.; *Industry Applications, IEEE Transactions on* Volume 36, Issue 1, Jan.-Feb. 2000 Page(s):180 - 187
- [3] G. Escobar, A. A. Vald'ez, J. Leyva-Ramos, and P. Mattavelli, "A Repetitive-Based Controller for UPS Using a Combined Capacitor/ Load Current Sensing," in *Conf. IEEE PESC'05 conf.*, 2005, pp. 955-961.
- [4] G. Escobar, A. M. Stankovic, and P. Mattavelli. "Dissipativity-Based Adaptive and Robust Control of UPS in Unbalanced Operation," *IEEE Trans. Power Electron.* vol. 18, no. 4, pp. 1056-1062, Jul. 2003.
- [5] M. Liserre, R. Teodorescu, and F. Blaabjerg, "Stability of Photovoltaic and Wind Turbine Grid-Connected Inverters for a Large Set of Grid Impedance Values," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 21, no. 1, pp. 263-272, Jan. 2006.
- [6] Chunxi Liu; Chi Sun; Wenhua Hu, "Proportional-resonant controller of high power 400Hz inverter in stationary frame," *Electrical Machines and Systems, 2008. ICEMS 2008. International Conference on*, vol., no., pp.1772-1777, 17-20 Oct. 2008
- [7] C28x™ IQMath Library - A Virtual Floating Point Engine <http://focus.ti.com/docs/toolsw/folders/print/sprc087.html>