

# GENERACIÓN DISTRIBUIDA: CONEXIÓN DE UN INVERSOR A LA RED

GASTÓN RIVOIR, RENZO BIARDO, DIEGO GIACOSA Y GONZALO CASARAVILLA

*Instituto de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de la República  
Julio Herrera y Reissig 565, cp 11300, Montevideo, Uruguay*

*E-MAILS: [rbiardo@adinet.com.uy](mailto:rbiardo@adinet.com.uy), [grivoir@gmail.com](mailto:grivoir@gmail.com), [gcp@fing.edu.uy](mailto:gcp@fing.edu.uy)*

**Abstract** In the present work the implementation in the laboratory of a VSI connected to the grid controlled with a conventional PC with A/D capability and programmed in high level language is reported. The objective is delivering all the provided energy generated by a fuel cell and at the same time interchanging reactive energy with the network.

**Resumen** En el presente trabajo se reporta la implementación en el laboratorio de un VSI conectado a la red eléctrica controlado con un PC convencional provista de placa A/D y programado en alto nivel. El objetivo es entregar a la red eléctrica toda la energía provista al bus de continua del VSI por parte de una celda de combustible y al mismo tiempo intercambiar energía reactiva con la red.

**Keywords** VSI, Teoría p-q, Generación Distribuida.

## 1. Introducción

El desafío en la mayoría de las aplicaciones de Generación Distribuida es entregar energía no convencional, (por ejemplo una celda de combustible, un panel solar, eólica, etc.) a la red eléctrica. Para esto se debe convertir una tensión continua en alterna, lo cual se hace de forma natural con un inversor (VSI).

En este caso de estudio la tensión de continua es generada por una celda de combustible, que se asume se comporta (convertidor DC/DC mediante) como una fuente de corriente continua.

El objetivo del trabajo es el de mostrar los resultados obtenidos mediante las simulaciones y los experimentos realizados.

## 2. Estrategia de control

Sistema de potencia: En la Fig. 1 se observa la celda de combustible seguida de un convertidor DC/DC que se coloca para elevar la tensión de la celda. Este conjunto alimenta al condensador de entrada del inversor, el cual se conecta a la red a través de tres inductancias de desacople.

El control del VSI se divide en tres bloques: Control de voltaje, Control de potencia y Control de corriente. Estos bloques necesitan de entradas provenientes del sistema de potencia las cuales pasan por un bloque de acondicionamiento y protección de señales.

Dichos bloques están vinculados entre si, como se muestra en el diagrama de la (Fig. 1).

A continuación se da una descripción de cada uno de los bloques de control.

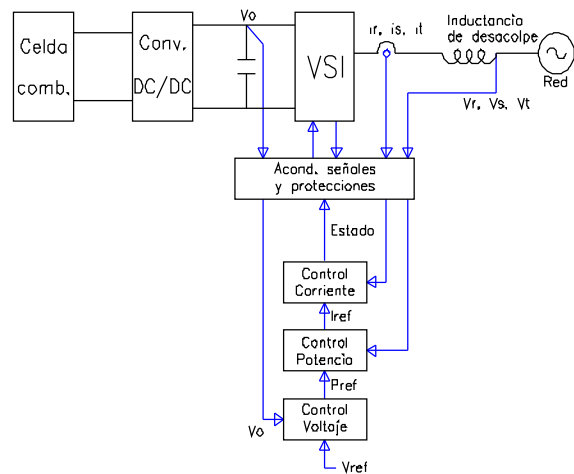


Figura 1. Esquema de la estrategia de control

### 2.1 Control de Voltaje

#### 2.1.1 Finalidad:

Se desea controlar la tensión de la celda de combustible, esto es debido a que si el voltaje en la misma es muy bajo el VSI no será capaz de controlar la corriente y entregar la potencia que se desea. Se realiza un control que al disminuir la tensión del condensador se solicita menos potencia del mismo con la finalidad de recuperar la pérdida de tensión.

#### 2.1.2 Método de control

La (Fig. 2) muestra el modelo que surge de asumir que la celda de combustible junto con el convertidor DC/DC se comportan como una fuente de corriente y que el condensador no es ideal.

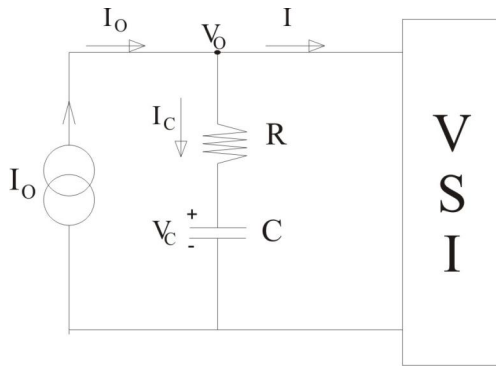


Figura 2. Esquema de la planta.

$I_o$  es la corriente que entrega la celda de combustible la cual es considerada constante,  $I_c$  es la corriente que circula por el condensador e  $I$  es la corriente entregada al inversor.

El objetivo del control es mantener la tensión en la celda ( $V_o$ ) igual a la tensión de referencia ( $V_{ref}$ ).

La (Fig. 3) muestra el diagrama de bloques de la planta junto con el control a implementar.

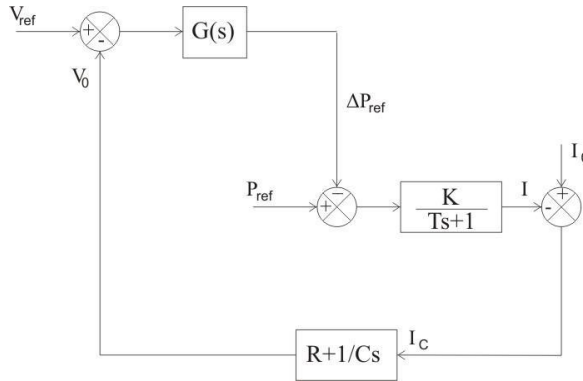


Figura 3. Diagrama de bloques del control.

Donde  $G(s)$  es el compensador a diseñar,  $K$  y  $T$  la ganancia y retardo introducido por el inversor respectivamente.

Se toman como hipótesis simplificadoras las siguientes:  $V_o$  constante en el intervalo considerado y el retardo  $T$  introducido por el VSI despreciable comparado con la dinámica del condensador. El sistema se estudia solamente para la entrada,  $V_{ref}$ .

La (Fig. 4) muestra el diagrama de bloques simplificado.

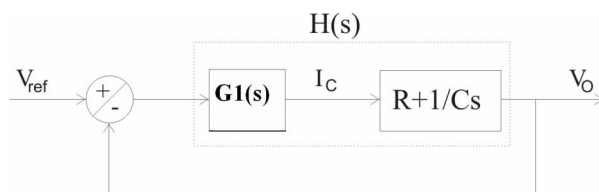


Figura 4. Diagrama de bloques simplificado.

Donde:  $G1(s)=K*G(s)$ .

Planteando las ecuaciones del diagrama de bloques se obtiene la transferencia de lazo cerrado.

$$\frac{V_o(s)}{V_{ref}(s)} = \frac{G_1(s) \times (RCs + 1)}{G_1(s) \times (RCs + 1) + Cs} \quad (1.1)$$

Las condiciones que determinan al controlador son: Tener error nulo ante una entrada escalón en  $V_{ref}$ . y que el sistema sea estable.

Siendo  $G1(s)$  un PI (Proporcional, integrador) se observa que se verifican las condiciones anteriores.

Elegimos como controlador

$$G_1(s) = a + \frac{b}{s} \quad (1.2)$$

Donde  $\alpha$  y  $\beta$  son constantes positivas.

### 2.1.3 Criterio de elección de $\alpha$ y $\beta$ .

El criterio utilizado fue encontrar una relación entre  $\alpha$  y  $\beta$  que minimice el sobretiro, dado que la transferencia de lazo cerrado es de segundo orden.

La (Fig. 5) muestra la respuesta al escalón para  $\beta=0.1$  y  $\alpha=0.3$ , donde se observa un mínimo sobretiro.

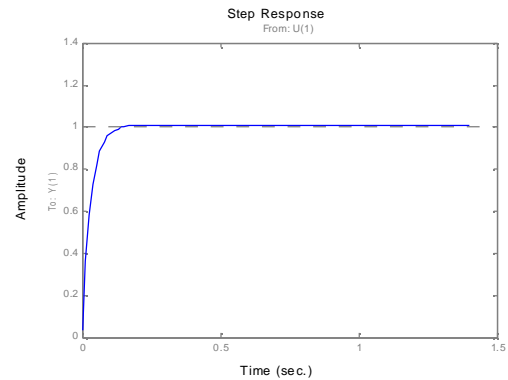


Figura 5. Respuesta al escalón con  $\beta=0.1$  y  $\alpha=0.3$ .

## 2.2 Control de potencia.

La Teoría p-q, denominada también teoría de las potencias activa y reactiva instantánea (Akagi, 1984), es una forma de caracterizar, en el dominio del tiempo, las variables involucradas en sistemas eléctricos de potencia en circuitos de tres o cuatro hilos con carga genérica.

Utilizando esta teoría se obtiene una función, cuyas entradas son las tensiones trifásicas instantáneas ( $v_r$ ,  $v_s$  y  $v_t$ ) y las potencias activa e imaginaria de referencia ( $p_{ref}$  y  $q_{ref}$ ), siendo sus salidas las corrientes trifásicas de referencia (Fig. 6).

Estas corrientes son las que deben circular por las fases para entregar  $p_{ref}$  e intercambiar  $q_{ref}$  con la red.

Primero, con la transformada de Clarke (1.3) y la tensión en coordenadas (r, s, t), se obtiene la terna de tensiones ( $\alpha$ ,  $\beta$ , 0) correspondiente a un sistema básico ortogonal.

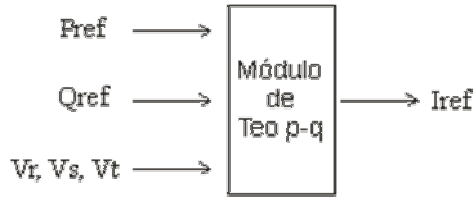


Figura 6. Bloque del control de potencia.

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_a \\ v_b \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_R \\ v_S \\ v_T \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

Segundo, con la transformación inversa de la Teoría p-q y las potencias de referencia, se obtienen las corrientes de referencia en coordenadas  $\mathbf{a}$  y  $\mathbf{b}$  (1.4).

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix} = \frac{1}{v_a^2 + v_b^2} \begin{bmatrix} v_a & v_b \\ v_b & -v_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{ref} \\ q_{ref} \end{bmatrix} \quad (1.4)$$

Tercero, con la transformada inversa de Clarke teniendo en cuenta que  $i_0$  es cero por trabajar con un sistema de tres hilos, y las corrientes en coordenadas  $\mathbf{a}$  y  $\mathbf{b}$  se obtienen las corrientes de referencia del sistema trifásico (1.5).

$$\begin{bmatrix} i_R \\ i_S \\ i_T \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_a \\ i_b \end{bmatrix} \quad (1.5)$$

*Observación:*

Supóngase que no hay potencia instantánea homopolar, como ocurre en el caso estudiado, dado que se trabaja con un sistema eléctrico de tres hilos.

Si por ejemplo se impone  $p_{ref} = P = \text{cte}$  y  $q_{ref} = 0$ , se estará forjando a que  $\bar{p} = P$ ,

$$\bar{q} = 0, \quad \bar{q} = Q = 0 \text{ y } \bar{q} = 0.$$

Si en este caso  $v_a$  y  $v_b$  son puramente sinusoidales (lo cual es cierto si  $v_R$ ,  $v_S$  y  $v_T$  son un sistema trifásico equilibrado de frecuencia fundamental) resulta  $v_a^2 + v_b^2 = 1$ . De (1.4) se observa que  $\hat{i}_b = P \cdot v_b$  y  $\hat{i}_a = P \cdot v_a$ , por lo que las corrientes serán una copia de las tensiones y por tanto sinusoidales, lo cual supone que el inversor ve a la red como una carga resistiva.

Luego en el caso que  $v_a$  y  $v_b$  contengan armónicos, también las corrientes  $\hat{i}_a$  e  $\hat{i}_b$  las tendrán. Si se quiere no replicar los armónicos de tensión en la corriente, basta con obtener con un PLL la secuencia positiva de las senoides  $v_a$  y  $v_b$  y usar estas para calcular  $\hat{i}_a$  e  $\hat{i}_b$ . En este caso las corrientes  $\hat{i}_a$  e  $\hat{i}_b$  serán

puramente sinusoidales de frecuencia fundamental y secuencia positiva.

Por otra parte el hecho de que  $Q = 0$  significa que no hay transferencia de energía reactiva, ya que en un sistema equilibrado de tensiones el valor medio de  $q$  coincide exactamente con la potencia reactiva convencional.

### 2.3 Control de Corriente.

Se utilizó un control vectorial de corriente (Nabae, 1986), que genera el comando de las llaves del inversor de forma que las corrientes de fase sigan a las corrientes de referencia aportadas por el control de potencia.

Es un control realimentado que puede suprimir el alto contenido de armónicos de corriente en régimen permanente y además tener una rápida respuesta en la corriente en régimen transitorio.

Como se muestra en el bloque final el control de corriente necesita la medida de las corrientes de fase, las corrientes de referencia aportadas por el modulo control de potencia y el estado anterior de las llaves para determinar el próximo estado. Por esto ultimo es que se dice que es un control realimentado.

## 3. Simulación

El modelo del sistema de potencia y control se implemento en MATLAB/SIMULINK.

El modelo simulado es el mostrado en la (Fig. 7) y (Fig. 8)..

El modelo de potencia consta de tres grandes grupos: primero la celda de combustible, segundo el inversor junto con una inductancia de desacople, y tercero el modelo de la red a la cual se quiere entregar la energía,

El modelo de la celda de combustible, se simuló como una fuente de corriente ideal en paralelo con un capacitor.

El VSI es un puente inversor trifásico modelado con IGBT's ideales con diodos antiparalelos, entre el VSI y la red se encuentra una inductancia trifásica de desacople.

La red eléctrica se modeló como una fuente de tensión trifásica equilibrada y una carga trifásica equilibrada la cual consume potencia activa y reactiva.

Como primer paso se realizo un estudio de los parámetros del sistema para determinar los valores que maximizan la performance del sistema.

Se simularon distintos escenarios de funcionamiento, entregando energía activa, consumiendo y entregando energía reactiva (Fig. 9), (Fig. 10) y (Fig. 11). Asimismo se simuló para distintas frecuencias de muestreo y control (Fig. 12) y (Fig. 13).

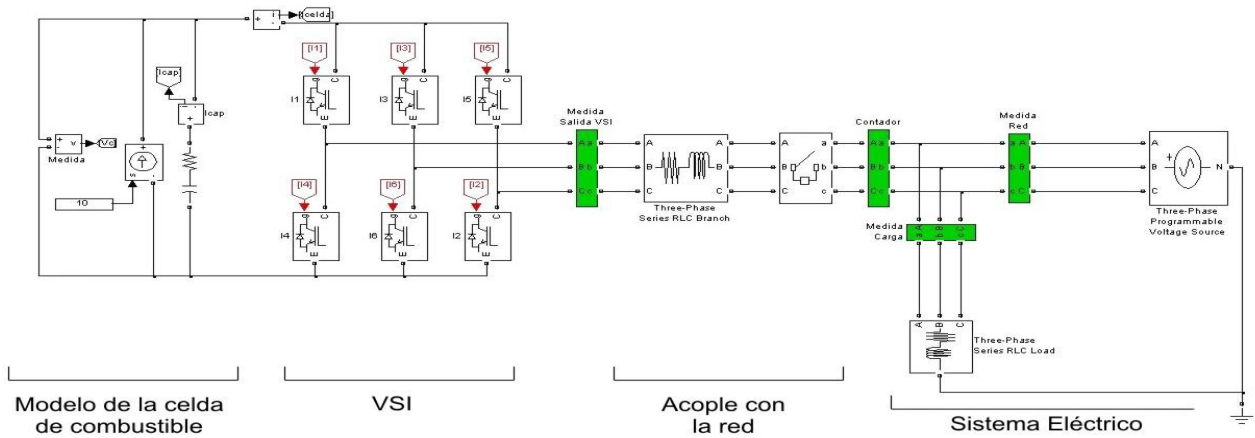


Figura 7. Modelo del sistema de potencia.

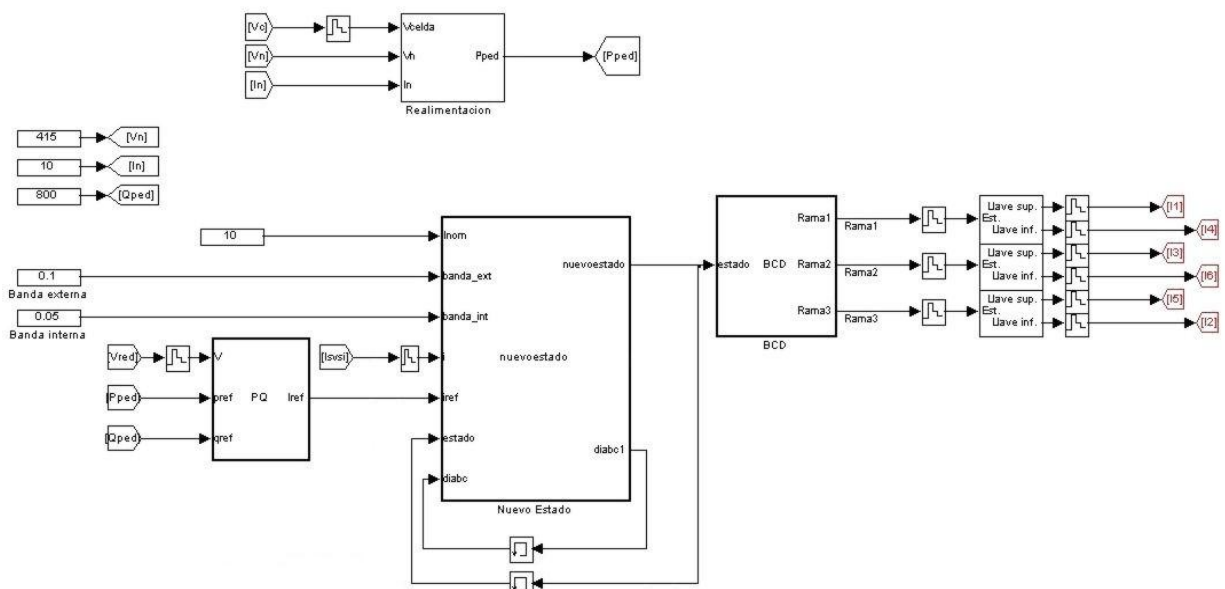


Figura 8. Modelo del sistema de control.

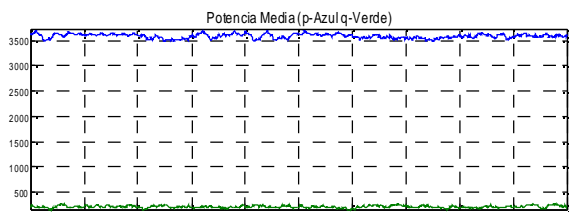


Figura 9. Simulación entregando potencia activa y reactiva nula..

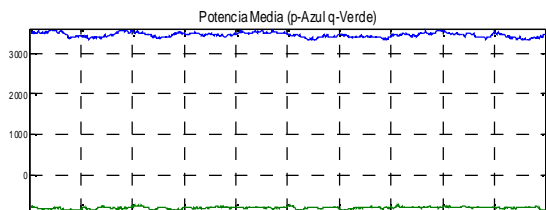


Figura 10. Simulación entregando activa y potencia reactiva de 1000Var

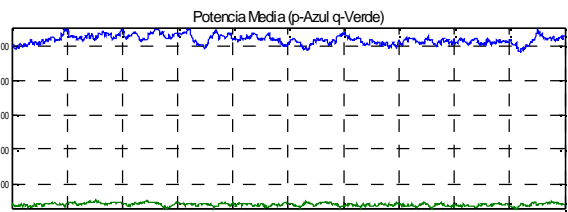


Figura 11. Simulación entregando activa y potencia reactiva de -1000Var.

Se pudo observar que el tiempo de muestreo y procesamiento de los datos es determinante a la hora de minimizar el error de corriente obtenido.

Se ve que el sistema de control funciona correctamente para esta aplicación en particular

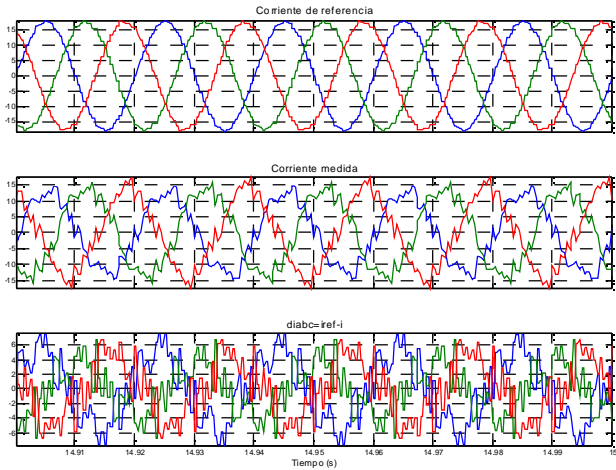


Fig. 12 Corrientes. Procesamiento de datos cada 500 us.

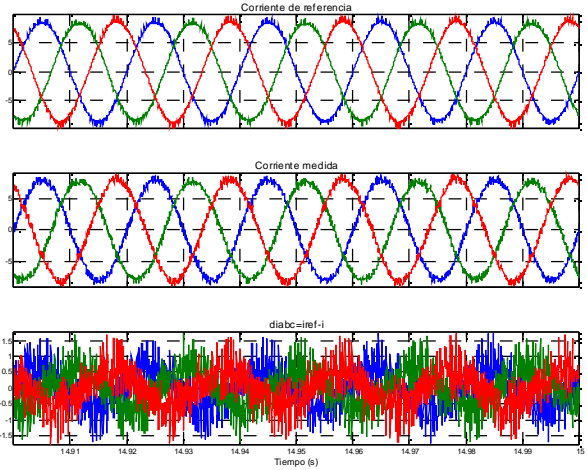


Fig. 13 Corrientes. Procesamiento de datos de 50 us.

#### 4. Implementación

El hardware que se utilizó consta de un VSI, tarjeta de interconexión, tarjeta de adquisición (PCLPM16), y un computador PII de 300MHz. En la (Fig. 14) se muestra una foto del VSI.

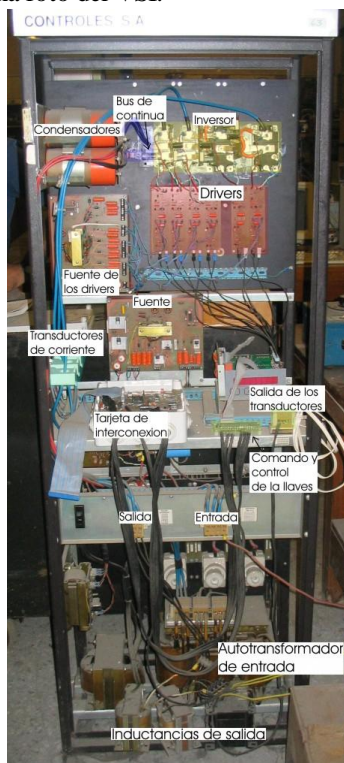


Figura 14 Foto del VSI utilizado.

El software se realizó en Turbo Pascal sobre MS-DOS cuyo esquema se muestra en la (Fig. 14).

El bloque de la Teoría p-q implementa el control de potencia, el bloque control implementa el control de voltaje, el bloque entrada-salida controla la tarjeta de adquisición PCLPM16.

Dado el PC utilizado y el programa en ejecución se utilizó un tiempo de muestreo de 394,5  $\mu$ s lo cual corresponde a un control vectorial de corriente de frecuencia de 2,5kHz, que a los efectos comparativos corresponde desde el punto de vista de las conmutaciones del VSI a un PWM con portadora triangular de 1,25kHz.

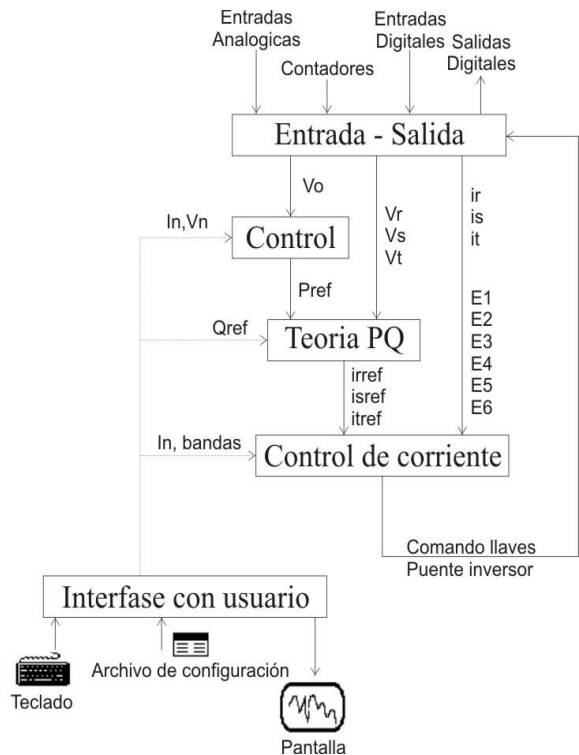


Figura 14. Esquema de programación.

Se realizaron diferentes pruebas en donde se varió la potencia reactiva solicitada, se registraron tres casos diferentes en el primero no se le solicitó potencia activa, en el segundo 1000VAR y en el tercero -1000VAR de potencia reactiva. En las tablas 1, 2 y 3 se muestran los datos relevados en la práctica, y en las (Fig. 15 16 y 17) las graficas relevadas experimentalmente y la comparación con lo simulado. En ellas se aprecia la tensión de red, la corriente de referencia



y la corriente entregada por el VSI (estas corrientes no se encuentran a escala).

Tabla 1 Datos relevados, Q solicitada 0Var.

P (W)	Q (Var)	S (VA)
2190	215	2273

Tabla 2 Datos relevados, Q solicitada 1000Var.

P (W)	Q (Var)	S (VA)
2050	1180	2360

Tabla 3 Datos relevados, Q solicitada -1000Var.

P (W)	Q (Var)	S (VA)
2280	-1150	2530

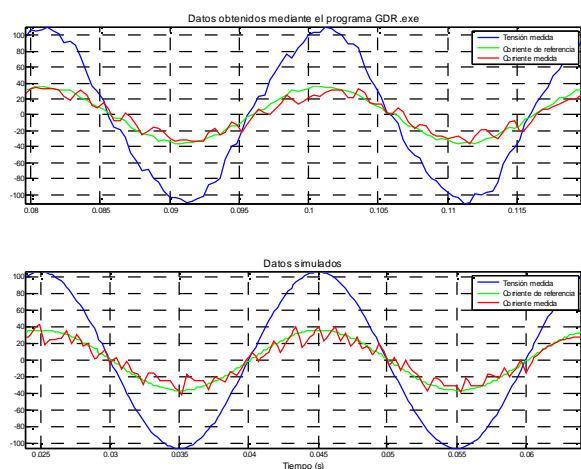


Figura 15. Grafica para Q solicitada 0Var.

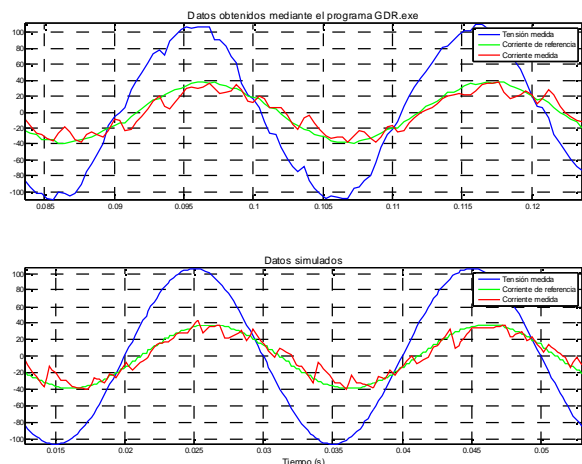


Figura 16. Grafica para Q solicitada 1000Var.

## 5. Conclusiones

A partir de los simulaciones y los datos experimentales se puede concluir que con un PC de bajo costo y una tarjeta AD convencional y todo programando en alto nivel, se puede controlar un VSI conectado a la red con el objeto de intercambiar energía con la misma utilizando control vectorial de corriente y la Teoría p-q. La utilización de la Teoría p-q, por su clara concepción práctica y asociada a variables físi-

cas convencionales resultó muy adecuada a los efectos de una fácil implementación de su programación e implementación del control de tensión del bus de continua del inversor.

Con respecto a la modalidad de control que se aplicó podemos decir que, el control de corriente propuesto por Nabae funciona correctamente pese a la baja frecuencia de trabajo (1.25kHz). Esto se verificó tanto en las simulaciones como en la práctica.

De utilizar una tecnología más potente (DSP o un microcontrolador) de manera de poder bajar los tiempos de procesamiento de datos se lograría que el control fuera más efectivo, como se mostró en las simulaciones.

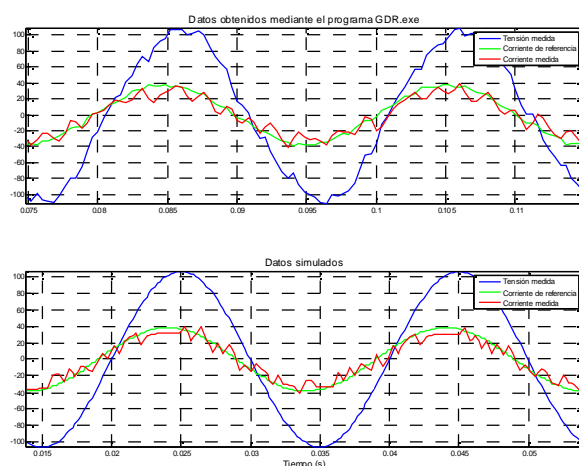


Figura 17. Grafica para Q solicitada -1000Var.

## Agradecimientos

En el desarrollo de este trabajo realizado como proyecto de fin de carrera de Diego Giacosa, Gastón Rivoir, Renzo Biardo, colaboraron las personas que se señalan a continuación:

- Ing. Gonzalo Casaravilla. Director del proyecto.
- Ing. Cesar Briozzo.
- Ing. Rubén Méndez.
- Ing. Rubén Chaer. Por su aporte esclarecedor de los programas de interfase grafica en pascal.
- Ing. Adhemar Prieto. Por sus aportes a la puesta en marcha del VSI.
- Ing. Diego Alcatagaray. Por su ayuda en la programación y préstamo del PLD.

## Referencias

- H. Akagi, Y. Kanazawa, and A. Nabae, Instantaneous reactive power compensator comprising switching devices without energy storage components, IEEE Trans. Ind. Appl., vol. Vol. 20, no. 3, pp. 625.630, 1984.
- A. Nabae, S. Ogasawara, H. Akagi. A Novel Control Scheme for Current-Controlled PWM Inverters. IEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-22 N°. 4, July/August 1986.