

# Controlador Adaptativo Robusto por Modelo de Referencia en Eje Cero Aplicado al Control de Desbalance de Tensiones de Fase en Generadores de Inducción Autoexcitados Aislados

F. R. Gentile <sup>a, b</sup>, V. H. Kurtz <sup>a</sup>, R. F. de Camargo <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones (UNaM), Oberá, Misiones, Argentina.

<sup>b</sup> GEPOC, CT-UFSM, Santa María, RS, Brasil.

e-mails: ingentile@gmail.com, kurtz.unam@gmail.com, robinson.camargo@gmail.com

---

## Resumen

Se propone en este trabajo desarrollar un estudio teórico y práctico de un sistema de control de desbalance de tensiones de fase para motores de inducción tipo jaula de ardilla usados como generadores de inducción. El cuál podría ser usado en pequeñas centrales hidroeléctricas sin conexión a una red comercial de distribución de energía. El sistema cuenta con un bus corriente alterna de cuatro hilos, donde el generador provee las tres fases y el neutro es obtenido del centro estrella del banco de capacitores de excitación. La regulación de la tensión se realiza mediante un compensador estático de tensión de cuatro brazos y se utilizan técnicas de control adaptativas en ciertos lazos de control para la implementación del controlador, ya que pueden lidiar con dinámicas no modeladas y grandes variaciones paramétricas de la planta. Se llevó a cabo ensayos experimentales y se presenta uno de ellos para demostrar cómo funciona el sistema. Y finalmente la conclusión.

**Palabras Clave** –Control de Desbalance, Control Adaptativo, DSTATCOM, Energía Renovable, Generador de Inducción, Regulación de Tensión, RMRAC, PCH, VSC.

## 1. Introducción

La utilización de motores asincrónicos como generadores a inducción en pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH), constituye una interesante solución, tanto técnica como económica. Pero la ausencia de campo de excitación regulable dificulta bastante el control de la tensión generada [14].

La máquina de inducción tipo jaula de ardilla usada para tal fin, conocida como Generador de Inducción Auto-excitado (GIAE) (*Self-Excited Induction Generator* – SIEG en inglés), presenta ventajas comparadas con un generador síncrono convencional de la misma potencia para sistemas de micro-generación aislados. Fácil adquisición, no presenta mayores problemas de embalamiento, tiene robustez, protección intrínseca al corto circuito, ausencia de bobinado excitación de campo son algunas ventajas distintivas, [1], [2], [15].

La autoexcitación del sistema GIAE, en funcionamiento aislado o independiente (esto es sin conexión a una red comercial de mayor potencia) [14], comúnmente es llevada a cabo mediante un banco de capacitores en configuración delta o en estrella, conectados a los bornes del motor que actuará como generador. El valor de la capacidad generalmente es seleccionado para que a una determinada frecuencia de la tensión alterna generada y sin carga aplicada, se obtengan los valores nominales de tensión [3]. Sin embargo, en estas condiciones, no puede garantizarse la estabilidad de la tensión y frecuencia generada, debido a que las mismas son altamente dependientes del tipo y

potencia de la carga aplicada; por lo que es necesario un controlador de tensión y frecuencia para tal fin [2].

Para la configuración presentada en esta oportunidad se estudiaron varias estrategias de control de tensión utilizando dispositivos semiconductores de potencia y elementos reactivos [4]. Estos son conocidos como Compensadores Estáticos de Reactivos (*Static VAR Compensator* – SVC en inglés). El desarrollo de estos sistemas con dispositivos con Transistores Bipolar de Compuerta Aislada (*Isolated Gate Bipolar Transistor* – IGBT en inglés) y el procesador digital de señales (DSP), junto con los avances en control digital, llevaron a reemplazar los SVC por convertidores con fuente de tensión (*Voltage Source Converter* – VSC), que constituyen la base para los compensadores de distribución estáticos de tensión (*Distribution Static Compensator* – DSTATCOM en inglés), los cuales ofrecen una mejor performance en términos de regulación de tensión debido a que muestran una mejor respuesta dinámica y no inyectan armónicos de baja frecuencia en el sistema, [2], [5], [6].

El DSTATCOM se comporta como una reactancia variable, es decir, como capacitor (entregando energía reactiva al generador para mantener el campo magnético dentro de la máquina) en caso de que la carga aplicada sea inductiva o como inductor en caso de que la carga sea capacitiva. Regulando de esta manera el flujo de energía reactiva para mantener constante la tensión. Para llevar esto a cabo, es preciso aplicar un sistema de control (controladores) que opere sobre las llaves del DSTATCOM.

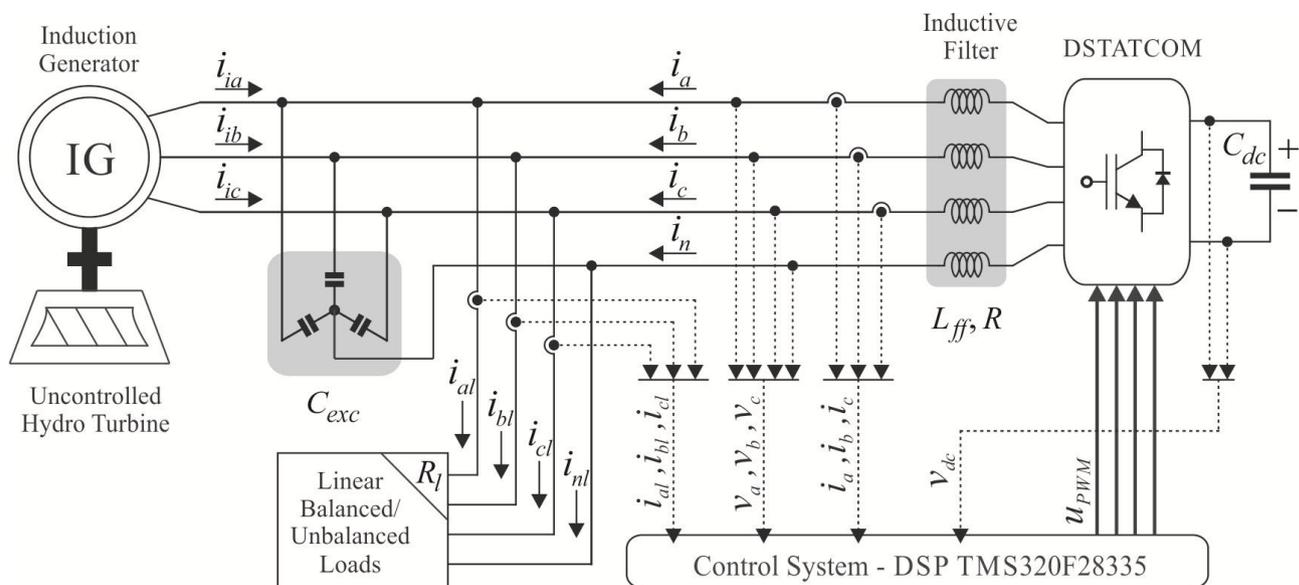
Controladores de coeficientes fijos son ampliamente utilizados debido a su facilidad y performance ajustable en torno a un punto definido y limitado de operación, [1], [2], [3], [4], [5], [6]. Con el poder de procesamiento de los microprocesadores actuales, se pueden usar técnicas de control avanzadas, como controladores adaptativos robustos. Estos tipos de controladores tienen como principal característica, garantizar estabilidad y buena performance en un amplio rango de operación, no sólo en torno a un punto. Para lograrlo, utiliza una estructura de adaptación de las ganancias o coeficientes del propio controlador, [7], [8], [9].

El generador bajo estudio es trifásico, y funcionando de manera aislada. Considerando que las cargas aplicadas son monofásicas, producen un desbalance en las tensiones del sistema. Corrientes desbalanceadas no son adecuadas para la vida útil del generador y deben ser evitadas o compensadas [10], [11]. Esta compensación puede ser llevada a cabo (dentro de un límite de potencia) con el DSTATCOM y el sistema de control implementado.

Con este trabajo se pretende contribuir con un estudio teórico y práctico sobre la compensación del desbalance de tensiones en generadores asincrónicos tipo jaula de ardilla trifásico en operación aislada, utilizando un controlador robusto por modelo de referencia en el eje cero del referencial síncrono  $dq0$ .

## 2. Configuración del Sistema

El Sistema de generación completo se muestra en la Fig. 1, el cual consiste en un bus de cuatro hilos, al que está conectado el Generador de Inducción (GI), movido por una turbina hidráulica no controlada, el banco de capacitores de excitación, las cargas y el DSTATCOM conectado mediante un filtro inductivo.



**Fig. 1: Diagrama de Bloques del Sistema de Micro-generación propuesto.**

Este sistema puede ser dividido en tres subsistemas tales como ser el sistema de generación de energía, el sistema de regulación de energía y las cargas de consumo.

El sistema de generación consiste en el GI el cual está mecánicamente acoplado a una turbina hidráulica de potencia constante no controlada y el banco de capacitores de excitación conectado en paralelo con los bornes del GI. En este caso, el banco de capacitores está conectado en estrella para tomar el cuarto conductor del bus, el neutro, desde su centro estrella.

El sistema de regulación de energía está compuesto por el DSTATCOM de cuatro brazos y un sistema de control implementado en un procesador digital de señales (*Digital Signal Processor – DSP* en inglés). El DSTATCOM se conecta al bus de CA a través de un filtro inductivo, esta topología permite la regulación de potencia activa y reactiva y por consecuencia frecuencia y tensión respectivamente en el punto común de conexión.

Son consideradas cargas de consumo cualquier tipo de carga lineal balanceada y desbalanceada, de dos, tres o cuatro hilos, con factor de potencia unitario (*Power Factor – PF* en inglés) o no.

### 3. Estructura de Control

El diagrama de bloques del sistema de control propuesto se muestra en el Apéndice A. Se puede observar por el lado izquierdo las variables censadas que corresponden a entradas (entradas a los convertidores analógico–digital) del DSP. Por el lado derecho se encuentran las salidas, resultado de aplicar las leyes de control implementadas. Estas señales de salida son aplicadas a los IGBT's que conforman las llaves electrónicas del DSTATCOM.

Mediante el uso de un sistema referencial síncrono con la frecuencia eléctrica generada ( $dq0$ ), es posible obtener modelos matemáticos más sencillos que si se utilizara un referencial fijo. Además de obtener FT's desacopladas realizando ciertas suposiciones.

El eje cero contiene la información correspondiente al desbalance de las tensiones de fase del sistema. Teóricamente un valor nulo o cero, indica que el sistema tiene sus tres fases balanceadas o de la misma amplitud. Entonces el lazo de control que se aplique debe actuar cuando el valor de la

tensión obtenida en dicho eje es distinto de cero, sin importar si el tipo de controlador que se utilice sea de ganancias fijas o adaptativas.

### 3.1. Plantas de Tensión y Corriente

Detalles sobre el modelado del sistema y los valores de los parámetros pueden ser vistos en los Apéndices A y B de [18].

Del modelo en espacio de estados del sistema completo, se pueden obtener las Funciones de Transferencia para la planta de tensión y corriente en el referencial síncrono  $dq0$ .

La ecuación (1) representa la planta de corriente y la (2) la planta de tensión en el eje cero:

$$G_{i0}(s) = \frac{Z_{base}}{4(L_f s + R_f)} \quad (1)$$

donde:  $s$  es la variable compleja de Laplace,  $Z_{base}$  es la impedancia base,  $L_f$  y  $R_f$  son la inductancia y resistencia del filtro de acoplamiento del DSTATCOM respectivamente.

$$G_{v0}(s) = \frac{Z_L}{Z_{base}(C_{exc} Z_L s + 1)} \quad (2)$$

donde:  $Z_L$  es la impedancia de la carga,  $C_{exc}$  es la capacidad de un capacitor del banco de excitación.

Se puede ver en (2) que la FT de la planta de tensión depende de la carga aplicada al sistema, por lo que representa una variación paramétrica del modelo, y no se saben los valores que va a tener. Es aquí donde el control adaptativo puede aplicarse para lidiar con estos problemas, esperándose obtener mejores resultados que con un controlador de ganancias fijas, ya que éste estaría diseñado para un punto específico de operación, es decir, diseñado para un cierto tipo de carga conocida de antemano.

Entre los distintos tipos de controladores adaptativos, en este trabajo se usará el Controlador Adaptativo por Modelo de referencia Robusto (*Robust Model Reference Adaptive Controller – RMRAC* en inglés).

### 3.2. Modelo de la Planta para diseñar el RMRAC

Para diseñar el controlador adaptativo se necesita obtener el modelo de la planta, por lo que es preciso tener en cuenta la malla interna de corriente (planta de corriente y controlador PI de ganancias fijas) y la planta de tensión. La Fig. 2 muestra lo antes mencionado en un diagrama de control.

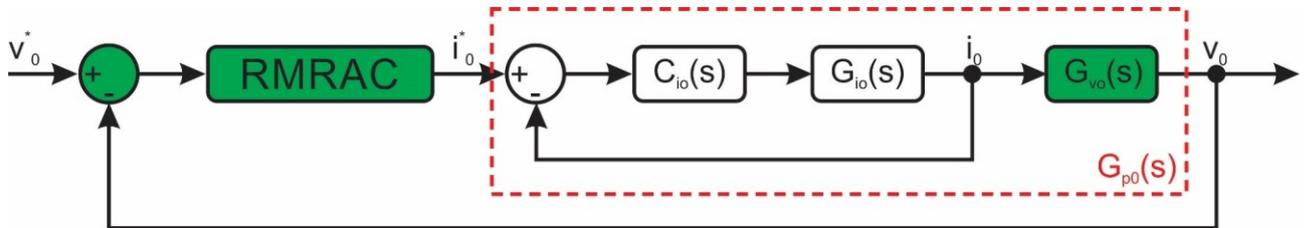


Fig. 2: Diagrama de Control de la Tensión del Eje Cero a Lazo Cerrado.

El controlador de la malla interna de corriente  $C_{io}(s)$  tiene la forma definida en (3):

$$C_{i0}(s) = \frac{a_1 s + a_0}{s} \quad (3)$$

Realizando las operaciones matemáticas necesarias para calcular  $G_{p0}(s)$  y simplificando polos y ceros, puede ser obtenido un modelo reducido que será utilizado para el diseño del RMRAC.

Como la implementación del controlador va a ser de forma digital en el DSP se necesita obtener la FT en tiempo discreto, por lo que utilizando un tiempo de muestreo de 100us y un mantenedor de orden cero (*Zero Order Holder* – ZOH en inglés) se obtiene el modelo descrito por (4).

$$G_{p_0}(z) = 0,0039954 \frac{z + 0,9107}{z^2 - 1,738z - 0,7552} = k_0 \frac{z + b_0}{z^2 + a_1 z + a_0} = k_p \frac{Z_p(z)}{R_p(z)} \quad (4)$$

donde:  $z$  es la variable compleja de tiempo discreto.

#### 4. Controlador Adaptativo por Modelo de Referencia Robusto

Los controladores de ganancia fija no garantizan un buen seguimiento de la referencia cuando la planta controlada tiene grandes variaciones paramétricas y dinámicas no modeladas [14], [15].

Como se hizo mención anteriormente, (2) depende de la carga aplicada al sistema. Variar la carga implica que los polos del sistema se mueven, lo que puede producir una gran variación paramétrica. Por otro lado, el modelo que se usará para diseñar el controlador adaptativo es de orden reducido, lo que se puede traducir en dinámicas no modeladas. La estructura del RMRAC puede garantizar estabilidad y buena performance a lazo cerrado, inclusive cuando hay grandes variaciones paramétricas y dinámicas no modeladas.

##### 4.1. Modelo de Referencia y Suposiciones de la Planta

La ecuación (4) da la parte modelada de la planta, pero está sujeta a las siguientes suposiciones:

S1:  $Z_p(z)$  y  $R_p(z)$  son polinomios mónicos (coeficiente del término de mayor grado es 1) de grado  $m_p$  y  $n_p$  respectivamente.

S2:  $Z_p(z)$  es un polinomio de Schur (sus raíces tienen módulo menor a 1) y el signo de la ganancia  $k_p$  se asume conocido.

El objetivo del control adaptativo es determinar un vector de parámetros  $\theta$ , tal que la salida  $y(z)$  de la planta a lazo cerrado siga a la salida  $y_m(z)$  de un modelo de referencia predeterminado, representado por la TF  $W_m(z)$  que se define como:

$$\frac{y_m(z)}{r(z)} = W_m(z) = k_m \frac{Z_m(z)}{R_m(z)} \quad (5)$$

donde:  $r(z)$  es la entrada del modelo de referencia o referencia que el sistema debe seguir y  $k_m$  es la ganancia del modelo.

S3:  $W_m(z)$  es una FT arbitraria de grado relativo  $n^* = (n_p - m_p) > 0$ .

##### 4.2. Ley de Control y Algoritmo de Adaptación

La ecuación (6) representa la ley de control:

$$\theta^T(k)\omega(k)+r(k)=0 \quad (6)$$

donde:  $\theta^T = [\theta_1^T \quad \theta_2^T \quad \theta_y \quad \theta_u]$  es el vector de parámetros y  $\omega^T = [\omega_1^T \quad \omega_2^T \quad \omega_y \quad \omega_u]$  es el vector auxiliar o modos de la planta y  $u(k) = i_0^*$  es la ley de control que representa la referencia para el lazo interno de corriente.

Las señales auxiliares  $\omega_1$  y  $\omega_2$  son obtenidas mediante las (7):

$$\begin{aligned} \omega_1(z) &= \frac{\alpha(z)}{\Lambda(z)}u(z) = (z\mathbf{I} - \mathbf{F})^{-1} \mathbf{q}u(z) \\ \omega_2(z) &= \frac{\alpha(z)}{\Lambda(z)}y(z) = (z\mathbf{I} - \mathbf{F})^{-1} \mathbf{q}y(z) \end{aligned} \quad (7)$$

donde:  $\frac{\alpha(z)}{\Lambda(z)} = (z\mathbf{I} - \mathbf{F})^{-1} \mathbf{q}$  y el par compuesto por las matrices  $\mathbf{F}$  y  $\mathbf{q}$  debe ser controlable.

Para poder implementar en un DSP (7) se debe escribir en tiempo discreto:

$$\begin{aligned} \omega_1(k+1) &= \mathbf{F}\omega_1(k) + \mathbf{q}u(k) \\ \omega_2(k+1) &= \mathbf{F}\omega_2(k) + \mathbf{q}y(k) \end{aligned} \quad (8)$$

El algoritmo de adaptación paramétrica usado es el tipo gradiente y dado por la (9):

$$\theta(k+1) = [\mathbf{I} - \sigma(k)\mathbf{\Gamma}T_s]\theta(k) - T_s \frac{\mathbf{\Gamma}\zeta(k)\varepsilon(k)}{m^2(k)} \quad (9)$$

donde  $T_s$  es el tiempo de muestreo, la matriz  $\mathbf{\Gamma}$  es la ganancia de los parámetros y  $\zeta(z) = \omega(z)W_m(z)$ . El error aumentado es  $\varepsilon(k) = e_1(k) + \theta^T(k)\zeta(k) - W_m(z)\theta^T(k)\omega(k)$ , siendo  $e_1(k) = y(k) - y_m(k)$ .

La función de normalización  $m^2(k)$  puede ser expresada como:

$$m^2(k) = 1 + \zeta^T(k)\mathbf{\Gamma}\zeta(k) \quad (10)$$

La función  $\sigma$ -modificación está dada por (11):

$$\sigma(k) = \begin{cases} 0 & \text{si } \|\theta(k)\| < M_0 \\ \sigma_0 \left( \frac{\|\theta(k)\|}{M_0} - 1 \right) & \text{si } M_0 \leq \|\theta(k)\| \leq 2M_0 \\ \sigma_0 & \text{si } \|\theta(k)\| > 2M_0 \end{cases} \quad (11)$$

donde:  $M_0 > \theta^*$  es un parámetro de diseño [valor superior de  $\theta(k)$ ] y  $\theta^*$  es la norma euclidiana del vector de parámetros deseado.

#### 4.3. Diseño del RMRAC

Con la (4) que da el modelo reducido de la planta y la suposición S3, puede establecerse el siguiente modelo de referencia para el RMRAC:

$$W_m(z) = k_m \frac{(z - z_1)}{(z - p_1)(z - p_2)} = k_m \frac{Z_m(z)}{R_m(z)} \quad (12)$$

donde:  $p_1$  y  $p_2$  son los polos discretos del modelo de referencia,  $z_1$  es el cero discreto y  $k_m$  es la ganancia del modelo calculado de forma que sea unitaria en estado estacionario. La misma es dada por (13):

$$k_m = \frac{R_m(1)}{Z_m(1)} = \frac{(1 - p_1)(1 - p_2)}{(1 - z_1)} \quad (13)$$

El modelo de referencia establece el comportamiento del sistema de control RMRAC a lazo cerrado.

## 5. Resultados Experimentales

El sistema propuesto fue ensayado en laboratorio usando un GI de 3,7kW emulando una microcentral hidroeléctrica sin conexión a red. Y un motor de 5kW conectado a un regulador de velocidad para emular la turbina hidroeléctrica no controlada. Se utilizó una carga resistiva de 1,4kW (50% de la potencia nominal del generador) conectada a la "Fase b (S o L2)". Para ver el funcionamiento del controlador, se conecta la carga sin el control de desbalance y tiempo después se lo activa.

La Fig. 3 muestra una captura de pantalla del osciloscopio que se utilizó para realizar el ensayo, puede observarse que el lado izquierdo presenta señales con picos desaparejos y luego a la derecha, una vez que entra el control de desbalance (control en el eje 0), las señales se aprecian parejas.

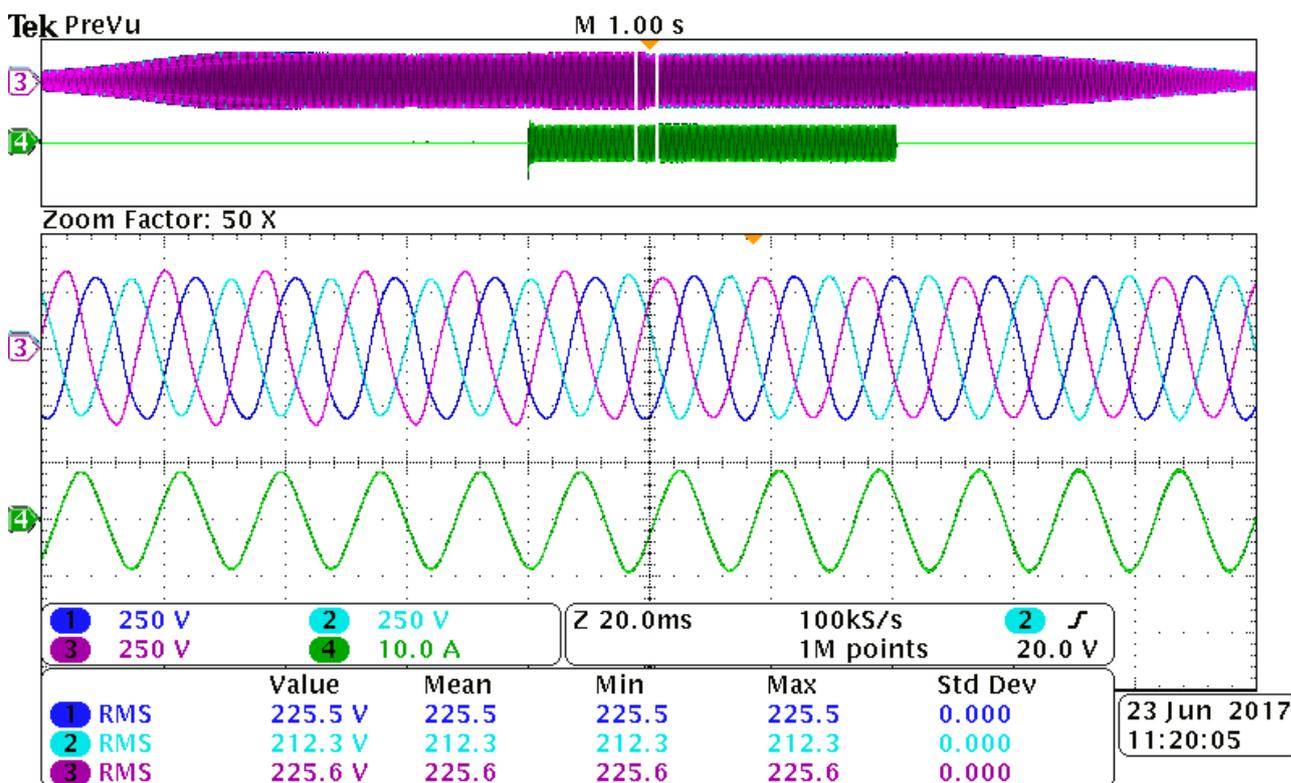
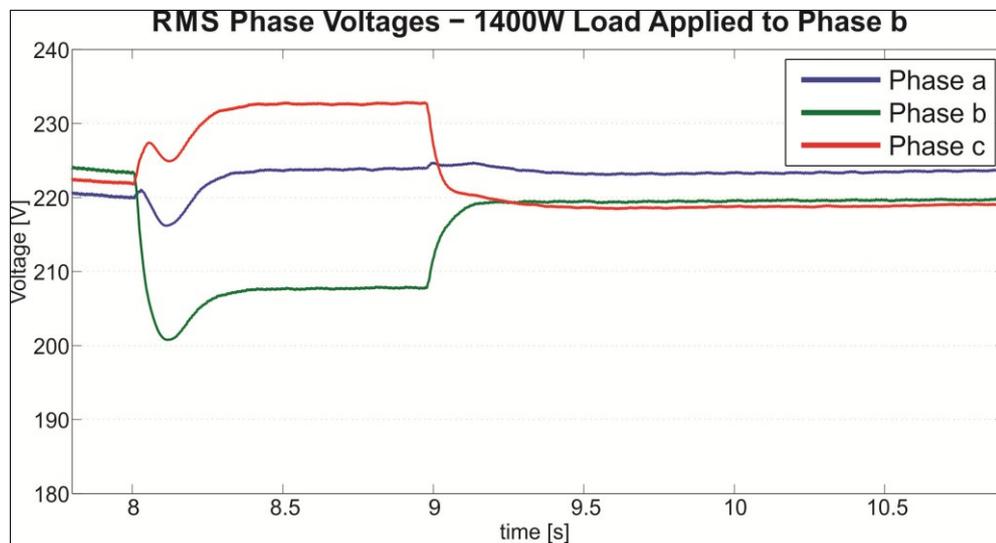
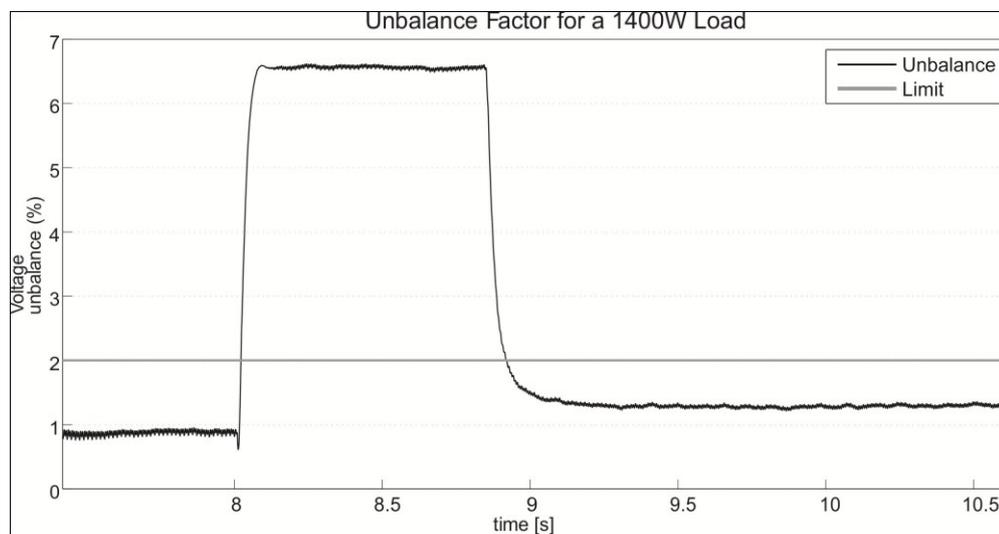


Fig. 3: Captura de pantalla del Osciloscopio usado para el ensayo.

La Fig. 4 muestra los valores eficaces de las tensiones de fase al momento de ingresar la carga y cuando se activa el controlador. Y la Fig. 5 muestra el factor de desbalance de las tensiones para el mismo intervalo.



**Fig. 4: Tensiones Eficaces de Fase.**



**Fig. 5: Factor de Desbalance.**

## 6. Conclusión

Se pudo demostrar que la propuesta de controlar el desbalance de tensiones usando un controlador RMRAC en el eje cero fue exitosa. Además de los resultados presentados, se ensayaron otras pruebas con distintos valores de carga, funcionando todas las veces.

Como ventaja se puede mencionar que teóricamente al ser un controlador adaptativo, se podría cambiar de motor (siempre de la misma potencia) usado como generador sin necesidad de modificar valores del controlador.



- [2] R. Chilipi, B. Singh, S. Murthy, S. Madishetti, and G. Bhuvaneswari, “Design and implementation of dynamic electronic load controller for three-phase self-excited induction generator in remote small-hydro power generation,” *IET Renewable Power Generation*, vol. 8, no. 3, pp. 269–280, 2014.
- [3] J. Björnstedt, F. Sulla, and O. Samuelsson, “Experimental investigation on steady-state and transient performance of a self-excited induction generator,” *IET generation, transmission & distribution*, vol. 5, no. 12, pp. 1233–1239, 2011.
- [4] Y. Chauhan, S. Jain, and B. Singh, “A prospective on voltage regulation of self-excited induction generators for industry applications,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 46, no. 2, pp. 720–730, 2010.
- [5] J. Barrado, R. Grino, and H. Valderrama-Blavi, “Power-quality improvement of a stand-alone induction generator using a statcom with battery energy storage system,” *IEEE transactions on power delivery*, vol. 25, no. 4, pp. 2734–2741, 2010.
- [6] T. Ahmed, K. Nishida, and M. Nakaoka, “A novel stand-alone induction generator system for ac and dc power applications,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 43, no. 6, pp. 1465–1474, 2007.
- [7] P. Ioannou and K. Tsakalis, “A robust direct adaptive controller,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 31, no. 11, pp. 1033–1043, 1986.
- [8] K. Åström and B. Wittenmark, *Adaptive control*. Courier Corporation, 2013.
- [9] J. Kanieski, R. V. Tambara, H. Pinheiro, R. Cardoso, and H. Gründling, “Robust adaptive controller combined with a linear quadratic regulator based on kalman filtering,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 61, no. 5, pp. 1373–1378, 2016.
- [10] K. Idjdarene, D. Rekioua, T. Rekioua, and A. Tounzi, “Performance of an isolated induction generator under unbalanced loads,” *IEEE Transactions on energy conversion*, vol. 25, no. 2, pp. 303–311, 2010.
- [11] B. Singh, S. Murthy, and R. Chilipi, “Statcom-based controller for a three-phase self feeding single-phase loads,” *IEEE transactions on energy conversion*, vol. 29, no. 2, pp. 320–331, 2014.
- [12] L. G. Scherer, R. V. Tambara, and R. F. de Camargo, “Voltage and frequency regulation of standalone self-excited induction generator for micro-hydro power generation using discrete-time adaptive control,” *IET Renewable Power Generation*, vol. 10, no. 4, pp. 531–540, 2016.
- [13] L. G. Scherer, C. B. Tischer, F. C. Posser, C. M. Franchi, and R. F. de Camargo, “Hybrid topology for voltage regulation applied in three-phase four-wire micro hydro power station,” in *Industrial Electronics Society, IECON 2013-39th Annual Conference of the IEEE*. IEEE, 2013, pp. 7169–7174.
- [14] Kurtz, V.H. (2016). *Distintas Alternativas para El Control Automático de La Generación en Pequeñas Centrales Hidroeléctricas*. III CADI, IX CAEDI 2016 – Resistencia Chaco.
- [15] Víctor H. Kurtz; Orlando A. Audisio; Ariel R. Marchegiani, Fernando Botterón, “Ensayo de una picoturbina Pelton compacta de fabricación local”. XIII Encuentro Latinoamericano Y Del Caribe Sobre Pequeños Aprovechamientos Hidroenergeticos ELPAAH – Cajamarca – Perú.
- [16] R. Khanna, Q. Zhang, W. Stanchina, G. Reed, and Z. Mao. Maximum power point tracking using model reference adaptive control. *IEEE Transactions on power electronics*, 29(3): 1490-1499, 2014.
- [17] Y. Yang, S. Balakrishnan, L. Tang, and R. Landers. Electrohydraulic control using neural mrac based on a modified state observer. *IEEE/ASME Transactions On Mechatronics*, 18(3): 867-877, 2013.
- [18] F. R. Gentile, R. F. De Camargo, V. H. Kurtz, and L. G. Scherer. “Comparison of Zero Axis Controllers for phase voltage unbalance control on standalone self-excited induction generator”. Article on 10<sup>th</sup> Seminar on Power Electronics and Control (SEPOC), UFSM, Santa Maria – RS, Brasil, 2017.