

# MODELADO Y SIMULACIÓN DE UN GRUPO DIESEL DE GENERACIÓN ELÉCTRICA DISTRIBUIDA

**LOYARTE, Ariel**

*Facultad Regional Santa Fe - Universidad Tecnológica Nacional*

*Lavaise 610 (3000) Santa Fe, Santa Fe, Argentina.*

[ariel.loyarte@gmail.com](mailto:ariel.loyarte@gmail.com)

**Palabras claves:** modelado, simulación, generación distribuida

## RESUMEN

*Se señalan las etapas del proceso de modelado de un generador síncrono accionado por un motor diesel, como componente elemental de una central eléctrica de generación distribuida. El desarrollo tiene por finalidad la obtención de un primer modelo para un futuro estudio de optimización en la operación de plantas generadoras de este tipo. Se incluye al motor de accionamiento, alternador, regulador automático de velocidad, excitador con control de tensión y controlador del factor de potencia. Se considera también la emisión de contaminantes y los costos de atenuación de sus impactos.*

## INTRODUCCIÓN

La generación distribuida consiste en la incorporación al Sistema Interconectado Nacional de un número relevante de centrales de generación eléctrica de potencias bajas o medias, en contraste con la implementación de un número reducido de centrales de mayor porte.

Desde 2007, el Estado argentino, por medio de la empresa estatal ENARSA, ejecuta un plan de implementación de centrales de generación distribuida, mediante pequeños grupos generadores diesel, dado el corto plazo demandado para su puesta en marcha. Ésta consiste en la forma de generación distribuida más utilizada en Argentina, justificando su elección por cuanto objeto de análisis y optimización. Diversos son los estudios que demuestran a su vez la relevancia e interés en esta forma de generación, tales como los análisis de optimización de *redes inteligentes* (o *micro-redes*) [3], que consideran al generador diesel como la fuente de generación principal y la representativa de la generación convencional no-renovable.

El estudio del funcionamiento de generadores diesel en vistas de optimizar su operación, requiere evidentemente de un modelo matemático capaz de vincular las variables y parámetros de interés. En lo que respecta al generador síncrono, el modelo en coordenadas  $dq0$  [7] ha demostrado representar satisfactoriamente la operación del alternador en régimen transitorio. Por su parte, existen numerosos estudios que proponen modelos simplificados de motores primarios diesel, en consideración de los sistemas de control de velocidad capaces de operar en controles primarios y secundarios de frecuencia [5,6].

En el presente trabajo se desarrolla el modelo dinámico íntegro de un grupo generador diesel, representativo de un sistema típico de generación distribuida argentino. La información esencial para su implementación es provista por ENARSA, y corresponde a los informes técnicos exigidos por CAMMESA [2], requeridos para la habilitación de la central eléctrica Juan José Castelli (Chaco), tomada como referencia.

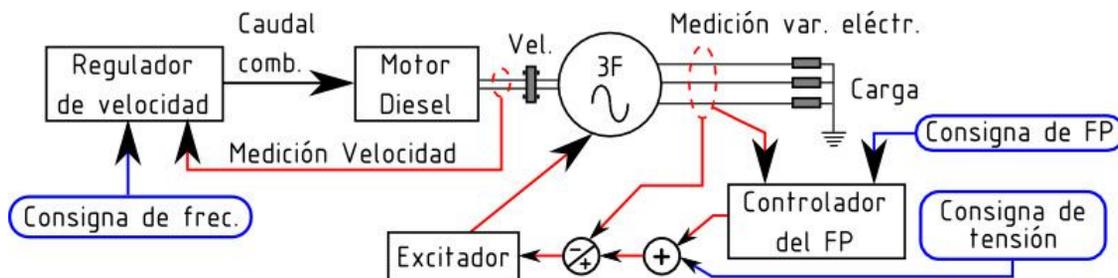
El modelo debe ser complementado con un sistema de control de excitación. Para el caso se selecciona y parametriza el más adecuado entre los estándares propuestos por la IEEE [4], combinado con un controlador del factor de potencia [1]. Se considera, además, la emisión de contaminantes y los costos de atenuación asociados [5].

Las simulaciones se realizan en Matlab/Simulink, con el toolbox SimPowerSystems.

## METODOLOGÍA

### 2.1 Esquema general del modelo

El modelo a desarrollar se resume en la Figura 1. El motor diesel acciona el generador, imprimiendo el torque motriz al sistema. El regulador de velocidad modifica automáticamente el caudal de combustible, con objeto en la satisfacción de la demanda de potencia activa, manteniendo la frecuencia en el valor de consigna.



**Figura 1.** Esquema del generador diesel y sus sistemas de control.

Por su parte, el excitador regula la tensión aplicada al devanado inductor, en un lazo de control de la tensión en bornes. A la consigna de tensión debe superponerse la salida de un controlador del factor de potencia (P+I), que permite eliminar los errores en estado estacionario (offset).

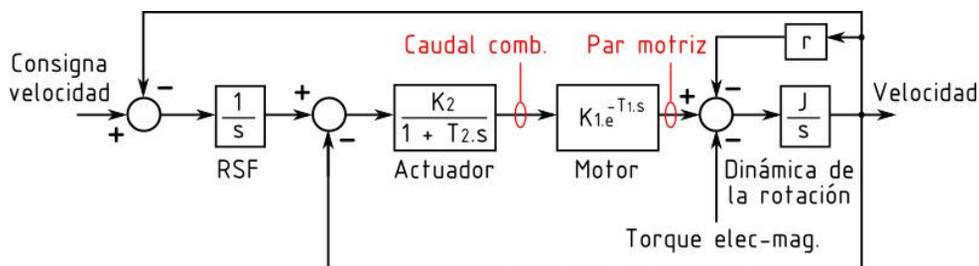
### 2.2 Modelo del alternador

El generador es modelado a partir de sus datos de placa, mediante el modelo de transformadas de Park [7]. Las no-linealidades del circuito magnético son consideradas a partir de la correspondiente característica de vacío.

De acuerdo a [5], la potencia activa instantánea generada puede relacionarse proporcionalmente con los caudales de los contaminantes liberados al medio; allí también se proveen costos horarios aproximados para su atenuación.

### 2.3 Modelo del motor diesel y lazo de control de velocidad

El esquema de la Figura 2 corresponde al motor diesel controlado por un sistema regulador automático de velocidad (y por ende de frecuencia). El motor puede simplificarse en una relación de proporcionalidad entre el caudal de combustible y el torque motriz, a partir de la ganancia  $K_1$ , más un retardo puro  $T_1$ . La constante  $J$  contempla el momento de inercia de las masas rotantes, y  $r$  representa un coeficiente de fricción. El torque electromagnético es obtenido del modelo del generador.



**Figura 2.** Esquema en bloques del regulador automático de velocidad.

En [5] se sugieren valores típicos para los parámetros  $r$ ,  $T_1$  y  $T_2$ .  $J$  y  $K_1$  se obtienen de los ensayos de *rechazo de carga* y *consumo de calor*, respectivamente, provistos por ENARSA. Mientras que  $K_2$ , alterable por el operador, define el *Droop* del regulador. El bloque integrador de la izquierda elimina el error de frecuencia en estado estacionario (Regulación Secundaria de Frecuencia).

## 2.4 Modelo del excitador

La norma IEEE Std 421.5 estandariza 19 modelos de excitadores (excitatrices y reguladores automáticos de tensión), de los cuales sólo el AC5A es aplicable al caso de los utilizados por ENARSA (excitadores de c.a. con generador piloto de imán permanente). El modelo fue parametrizado de acuerdo a información de ensayos y simulaciones realizadas por la empresa, con fines en el cumplimiento de los Procedimientos Técnicos de CAMMESA. La no-linealidad del sistema de excitación fue modelada a partir de valores típicos sugeridos por la misma norma.

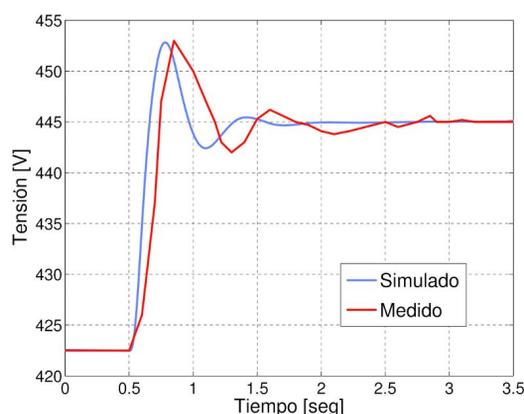
## RESULTADOS

Son muy variadas las posibilidades de análisis del modelo desarrollado. Sin embargo, la información disponible es utilizada para la estimación de parámetros desconocidos; no disponiéndose de datos extras que permitan la validación de los modelos.

No obstante, como componentes fundamentales del modelo, es interesante demostrar un desempeño correcto (coherente) de los sistemas de control implementados: excitador y regulador de velocidad.

En cuanto al excitador, se propuso reproducir el ensayo de *homologación en vacío* de la máquina, consistente en el análisis de estabilización de la tensión en bornes del alternador sin carga, ante un salto escalón de la correspondiente consigna.

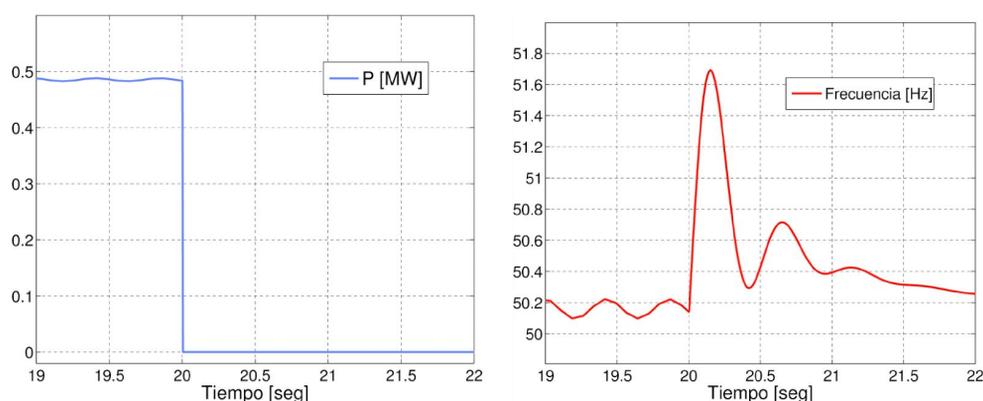
Siendo que se dispone sólo de información parcial de la parametrización de dicho excitador, para los parámetros desconocidos fueron considerados los recomendados por la IEEE Std 421.5, obteniéndose una respuesta no coincidente con la medida. De esta manera, se recurrió al re-ajuste de la ganancia de efecto derivativo, que penaliza las variaciones abruptas de la excitación, de modo de reproducir el mismo número de oscilaciones y el mismo sobrepico que la curva real medida. La ganancia principal del excitador se mantuvo en la especificada en los informes técnicos de ENARSA. Los resultados se muestran en la Figura 3, donde se observa un ajuste al menos bueno.



**Figura 3.** Respuesta del modelo ante un cambio escalón en la consigna de tensión.

Por otra parte, si bien otras simulaciones demuestran que la respuesta del excitador cambia cuando se modifica la sintonización del controlador del factor de potencia, no es posible obtener conclusiones más precisas. Esto se debe a que en el SimPowerSystems de Matlab no es posible representar una carga como una red de potencia infinita, que absorba cualquier potencia generada. De este modo, el factor de potencia no puede ser controlado, ya que queda definido por la impedancia de carga. Respecto al regulador de velocidad, su ensayo más exigente corresponde al ensayo de *rechazo de carga*. En éste, operando el generador en forma estable a 50 Hertz (nominales), se desconecta en forma abrupta su carga, analizándose la evolución de la frecuencia, que deberá estabilizarse nuevamente en su valor nominal.

Pese a disponerse de los resultados de un ensayo de rechazo de prácticamente el 50% de carga nominal (provisto por ENARSA), la referencia [1] aclara que no es posible reproducirlo con buena exactitud a partir de simulaciones. Esto responde a que la respuesta del regulador de velocidad es suficientemente rápida como para que los retardos de los sensores (desconocidos) tengan una sensible influencia en el resultado final. Sin embargo, las simulaciones deben demostrar ciertas premisas que, aunque no sean cuantitativas, aseguran un correcto desempeño del regulador. Así, ante un rechazo de carga, la frecuencia debe en primera instancia elevarse rápidamente (Regulación Primaria), y transcurrido un transitorio habitualmente de entre 1 y 3 segundos, estabilizarse nuevamente en el valor de consigna (Regulación Secundaria). El resultado de estas simulaciones puede verse en la Figura 4. En su ejecución se utilizó un Droop típico del 5%.



**Figura 4.** Simulación de un ensayo de rechazo de carga (casi el 50% de la nominal).

## CONCLUSIONES

El modelo presentado incorpora el máximo grado de detalle posible en cuanto a complejidad y parametrización de sus sub-sistemas. Esto permite la disposición de todos los parámetros factibles de ser alterados ante un futuro estudio de optimización. Más allá de los datos técnicos y ensayos realizados sobre la planta real, y que fueron utilizados para la parametrización del modelo, no se dispone de información extra y suficiente para la validación del mismo ante condiciones de operación diferentes a las de ajuste. Sin embargo, el objetivo inicial propuesto se satisface por cuanto no se pretende modelar con exactitud un generador diesel en particular, sino el equipamiento típico de una central de generación distribuida argentina. En ese caso, el modelo se sustenta en la validez ya comprobada de los sub-modelos componentes referenciados y en algunos casos estandarizados por normas internacionales. Por otra parte, en todos los ensayos simulados realizados, se obtuvieron respuestas esperadas y racionales de cada una de las variables estudiadas.

## REFERENCIAS

- [1] Agüero, J.L.; Issouribehere, F.; Beroqui, M.C.; Biteznik, C.E. (2009). Ensayos de campo y determinación de modelos de motogeneradores. XIII ERIAC 2009, 1-8.
- [2] CAMMESA. (2011). Recopilación No Oficial de los Procedimientos Técnicos - P.T. 4.
- [3] Chowdhury, S.; Chowdhury, S.P.; Crossley, P. (2009). Londres: Athenaem Press Ltd.
- [4] IEEE Power Engineering Society. (2005). IEEE Std 421.5 Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies.
- [5] Mohamed, F.A. (2008). Microgrid modelling and online management (Tesis).
- [6] Mohamed, F.A. (2010). System modelling and online optimal management of MicroGrid using Mesh Adaptive Direct Search. Electrical Power and Energy Systems, Vol. 32, 398-407.
- [7] Park, R. H. (1929). Two-Reactance Theory of Synchronous Machines. Generalized Methods of Analysis, Pt. I. AIEE Trans., Vol. 48, 716-730.