

Comité de Estudio C6 - Sistemas de Distribución y Generación Dispersa

**ENSAYOS DE CAMPO Y DETERMINACIÓN DE MODELOS DE
MOTOGENERADORES.**

J. L. AGÜERO
IITREE-LAT FI UNLP
Argentina

F. ISSOURIBEHERE *
IITREE-LAT FI UNLP
Argentina

M. C. BEROQUI
IITREE-LAT FI UNLP
Argentina

C. E. BITEZNIK
IITREE-LAT FI UNLP
Argentina

Resumen – En este trabajo se presentan los ensayos de campo realizados por el IITREE-LAT para verificar el desempeño de motogeneradores que conforman recursos de energía distribuida (RED) en yacimientos petrolíferos y en diversas ciudades de la República Argentina. Sobre la base de los ensayos realizados se presentan modelos del generador, del sistema de control de velocidad-potencia y del sistema de control de tensión de los motogeneradores.

Palabras clave: Ensayos – Generador Sincrónico – Motogenerador – Regulador de tensión – Regulador de velocidad.

1 INTRODUCCIÓN

Una red de distribución eléctrica reestructurada que emplea un gran número de recursos de energía distribuida puede mejorar el nivel de confiabilidad del sistema y permitir la disgregación del servicio en función de la calidad de servicio requerido (cargas críticas y no-críticas).

Los RED, incluyendo a la generación distribuida y el almacenamiento distribuido, son fuentes de energía que se encuentran ubicadas en las cercanías de cargas locales y pueden proveer un beneficio significativo si son correctamente operadas. Las unidades de generación distribuida son pequeñas fuentes de energía, consistentes en celdas fotovoltaicas, turbinas eólicas, celdas de combustible, microturbinas y motogeneradores, utilizando estos últimos gas o combustible fósil como energía primaria.

Los motogeneradores están equipados con un sistema de control de velocidad-potencia para la regulación de la velocidad del motor y un regulador automático de tensión que controla la tensión interna del generador sincrónico, como se muestra esquemáticamente en la Fig. 1.

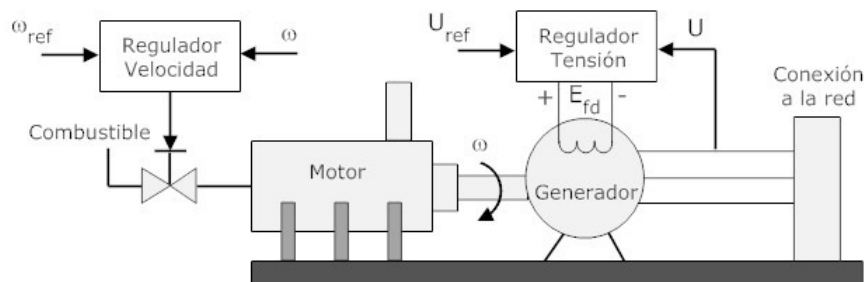


Fig. 1: Diagrama esquemático de un motogenerador y sus sistemas de control asociados.

La integración de numerosos generadores de pequeña escala en el sistema interconectado de potencia impacta sobre su operación, control y protección. Ante la proliferación de estos pequeños generadores, existe incertidumbre sobre el efecto de los mismos en el desempeño global del sistema.

Actualmente las centrales eléctricas equipadas con motogeneradores representan una proporción importante dentro de la generación total, ya que se encuentran instalados aproximadamente 1000 MW respecto de un total de generación de 23000 MW.

Es, por lo tanto, muy apropiado disponer de modelos de simulación para estos motogeneradores, incluyendo la determinación de sus características dinámicas como ser la constante de inercia y la determinación de los sistemas de control de excitación y de velocidad-potencia.

En este trabajo se presentan, a modo de ejemplo, los ensayos de campo realizados sobre dos centrales típicas equipadas con motogeneradores. Sobre la base de los ensayos realizados se presentan modelos del generador, del sistema de control de velocidad-potencia (Regulador Automático de Velocidad, RAV) y del sistema de control de tensión (Regulador Automático de Tensión, RAT) de los motogeneradores. Se comparan los resultados de las simulaciones con los registros de campo.

2 DESCRIPCIÓN DE LAS INSTALACIONES

La central 1 está compuesta por 14 motogeneradores de 2000 kVA/1600 kW cada uno y se ubica en la ciudad de La Rioja, Pcia. de La Rioja. La central 2 está compuesta por 16 motogeneradores de 1750 kVA/1400 kW cada uno y se ubica en las cercanías de la ciudad de Colonia Catriel, Pcia. de Neuquén.

En la TABLA I se presentan datos básicos de las instalaciones de dos centrales eléctricas típicas.

TABLA I: CARACTERISTICAS BASICAS DE LAS CENTRALES ELECTRICAS.

Central 1	Central 2
Motor: Marca: Caterpillar Tipo: 3516 Combustible: diesel Frecuencia: 50 Hz	Motor: Marca: Jenbacher Tipo: JGS 420 GS Combustible: gas Frecuencia: 50 Hz
Máquina sincrónica: Marca: Caterpillar Tipo: 826 Excitación: Brushless c/excitatriz rotante y excitatriz piloto bobina móvil e imán permanente Potencia aparente: 2000 kVA Potencia activa: 1600 kW Factor potencia: 0.8 Tensión línea / fase: 400/230 V Polos: 4 Eficiencia a carga nominal: 96.9 %	Máquina sincrónica: Marca: Jenbacher Tipo: PE734F2 Excitación: Brushless c/excitatriz rotante y excitatriz piloto bobina móvil e imán permanente Potencia aparente: 1750 kVA Potencia activa: 1400 kW Factor potencia: 0.8 Tensión línea / fase: 400/230 V Polos: 4 Eficiencia a carga nominal: 97.5 %
Regulador Automático de Tensión: Marca: Caterpillar Tipo: CAT digital voltage regulator (CDVR) Reguladores secundarios de Potencia Reactiva: No tiene	Regulador Automático de Tensión: Marca: STAMFORD Tipo: MX 321 Reguladores secundarios de Potencia Reactiva: STAMFORD PFC-3
Regulador Velocidad-Potencia: Marca: Caterpillar	Regulador Velocidad-Potencia: Marca: STAMFORD
Transformador: Marca: Vasile Potencia: 2000 kVA Grupo: Yd11 Tensión de CC: 5.22 % Conmutador: -2x2,5 % y +2x2,5 %	Transformador: Marca: Tadeo Czerweny S.A. Potencia: 1800 kVA Grupo: Yd11 Tensión de CC: 5 % Conmutador: -4x2,5 % y +2x2,5 %
Protecciones máquina sincrónica: Sobre-tensión: 450 V (112,5 %) / 2 segundos Sub-tensión: 320 V (80 %) / 2 segundos Sobre-frecuencia: 53 Hz / 20 segundos Sub-frecuencia: 47 Hz / 20 segundos	Protecciones máquina sincrónica: Sobre-tensión: 450 V (112,5 %) / 2 segundos Sub-tensión: 320 V (80 %) / 2 segundos Sobre-frecuencia: 53 Hz / 20 segundos Sub-frecuencia: 47 Hz / 20 segundos

3 MÁQUINA SINCRÓNICA

Para modelar el generador se utilizó el modelo GENSAL [1], correspondiente a una máquina sincrónica de rotor con polos salientes del programa Interactive Power System Simulator PSS/E. En la TABLA II se describen los parámetros empleados para el modelo de la máquina sincrónica, y en la Fig. 2 y en la Fig. 3 se presentan los diagramas P-Q de los generadores de ambas centrales eléctricas.

TABLA II : PARÁMETROS DE LA MÁQUINA SINCRÓNICA.

Parámetro	Descripción	Central 1	Central 2	Unidad
Sbase	Potencia Aparente Nominal	2.0	1.75	MVA
Cos ϕ nom.	Tensión Terminal Nominal	0.8	0.8	---
F nominal	Frecuencia Nominal	50	50	Hz
U nominal	Tensión Terminal Nominal	400	400	V
I nominal	Corriente Terminal Nominal	2886.8	2528.8	A
Xd	Reactancia sincrónica no saturada eje directo en vacío	3.069	2.76	pu
X'd	Reactancia transitoria no saturada eje directo en vacío	0.214	0.17	pu
X''d	Reactancia subtransitoria no saturada eje directo en vacío	0.133	0.12	pu
Xq	Reactancia sincrónica no saturada eje en cuadratura en vacío	1.45	1.78	pu
X'q	Reactancia transitoria no saturada eje en cuadratura en vacío	----	1.78	pu
X''q	Reactancia subtransitoria no saturada eje en cuadratura en vacío	0.124	0.25	pu
Xl	Reactancia dispersión	0.15	0.44	pu
T'd0	Constante de tiempo transitoria eje directo en vacío	3	3.9	s
T''d0	Constante de tiempo subtransitoria eje directo en vacío	0.008	0.028	s
T'q0	Constante de tiempo transitoria eje en cuadratura en vacío	----	5.08	s
T''q0	Constante de tiempo subtransitoria eje en cuadratura en vacío	0.006	0.226	s
S(1.0)	Coefficiente saturación a Tensión Terminal 1.0 pu	0.2298	1.29	---
S(1.2)	Coefficiente saturación a Tensión Terminal 1.2 pu	1.0104	1.98	---
H	Constante de Inercia de las masas rotantes:	0.5	0.44	s

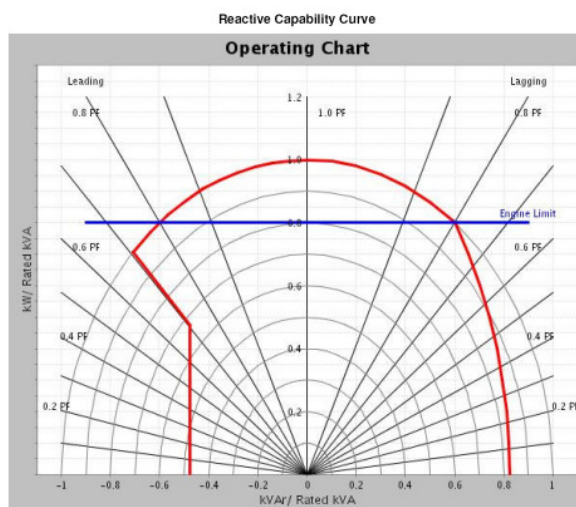


Fig. 2: Central 1. Diagrama P-Q del generador.

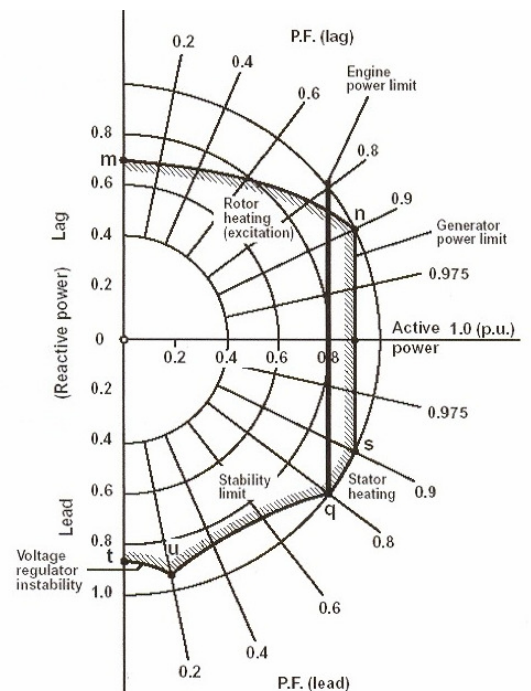


Fig. 3: Central 2. Diagrama P-Q del generador.

4 REGULADOR DE TENSIÓN (RAT)

4.1 Principio de funcionamiento del regulador de tensión.

Para ambas centrales, el sistema de excitación es rotante, eliminando la necesidad de anillos rozantes y escobillas, y la tensión de continua se suministra directamente al bobinado de campo del generador. La Fig. 4 muestra un diagrama en bloques simplificado del sistema de excitación de la central 2.

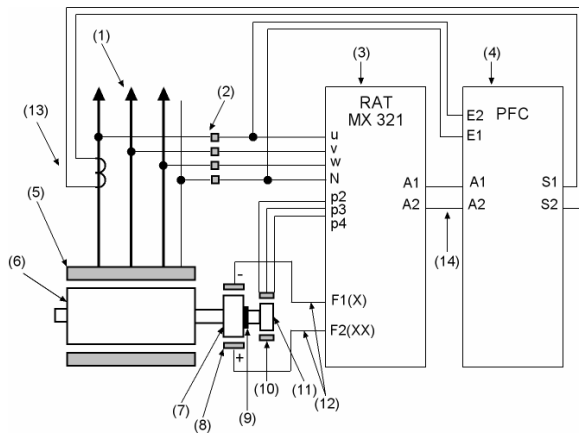


Fig. 4: Sistema de excitación Brushless.

- 1: Salida de tensión del generador.
- 2: Medición de tensiones del generador.
- 3: Regulador de tensión MX321.
- 4: Controlador de factor de potencia PFC-3.
- 5: Estator del generador.
- 6: Rotor del generador.
- 7: Rotor de la excitatriz principal.
- 8: Estator de la excitatriz principal.
- 9: Puente rectificador rotante a tiristores.
- 10: Estator de la excitatriz piloto (máquina de imán permanente, PMG).
- 11: Rotor de la excitatriz piloto (máquina de imán permanente, PMG).
- 12: Salida del RAT.
- 13: Medición de corriente del generador para el PFC.
- 14: Salida del PFC.

Como se observa en la Fig. 4, el bobinado de armadura (rotor) de la excitatriz principal y el rectificador a diodos rotan junto con el bobinado de campo (rotor) del generador. También rota junto con ellos el rotor de imán permanente de la excitatriz piloto.

La salida rectificada del estator de la excitatriz piloto energiza el bobinado de campo estacionario de la excitatriz principal. El regulador automático de tensión modula la tensión continua aplicada al bobinado de campo de la excitatriz principal, lo que a su vez determina la tensión del bobinado de campo del generador. Este sistema de excitación se conoce como “Sistema de excitación brushless”.

El RAT mide la tensión trifásica del generador mediante un transformador de aislamiento conectado directamente a los arrollamientos del estator del generador. La tensión medida se compara con una tensión de referencia. El valor de la tensión de referencia se puede ajustar en forma interna o externa.

El PFC (Power Factor Controller) compara la corriente reactiva con una proporción de la corriente activa medida. Dicha proporción puede ser ajustada mediante un potenciómetro de control. Si la corriente reactiva medida se encuentra por encima del valor de referencia, el PFC actúa reduciendo la tensión interna de referencia del RAT (a través de los terminales A1 y A2) logrando así reducir la potencia reactiva generada (y por lo tanto el factor de potencia) al nivel deseado. Si la corriente reactiva medida se encuentra por debajo de la referencia se realiza la acción inversa, es decir, se incrementa la referencia interna del RAT de forma tal de aumentar el factor de potencia. De esta forma el PFC realiza un control a lazo cerrado del factor de potencia del generador.

4.2 Ensayos realizados en el regulador de tensión.

Se presentan a continuación los ensayos realizados en una máquina de cada central.

4.2.1 Variación de tensión de pequeña amplitud. Unidad en vacío.

Este ensayo tiene por finalidad identificar la respuesta dinámica del regulador automático de tensión. Este ensayo se realizó con el generador desvinculado del sistema de potencia (en vacío), excitado, girando a velocidad nominal, y con tensión terminal nominal. La perturbación consistió en la aplicación de pulsos en la referencia de tensión, de forma tal que la tensión terminal del generador varíe entre un 1% y un 10% respecto de su valor nominal. La duración de estos pulsos fue de 20 segundos.

4.2.2 Variación de tensión de pequeña amplitud. Unidad en carga.

Este ensayo tiene por finalidad verificar el desempeño del regulador automático de tensión con la unidad en carga. Este ensayo se realizó con el generador operando a una potencia cercana a la nominal. La perturbación consistió en la aplicación de pulsos en la referencia de tensión, de forma tal que la tensión terminal del generador varíe entre un 0.5% y un 1% respecto de su valor nominal. La duración de estos pulsos fue de 20 segundos.

4.3 Modelo del regulador de tensión.

El modelo del regulador de tensión utilizado para las simulaciones corresponde modelo EXAC4 [1-2] del manual del programa PSS/E. En la Fig. 5 se muestra el diagrama en bloques del modelo del regulador de tensión EXAC4. En la TABLA III se proporcionan los parámetros de ajuste de los

reguladores de tensión de ambas centrales eléctricas y en la TABLA IV se presentan los índices de desempeño que caracterizan a la regulación de tensión en vacío del sistema de excitación.

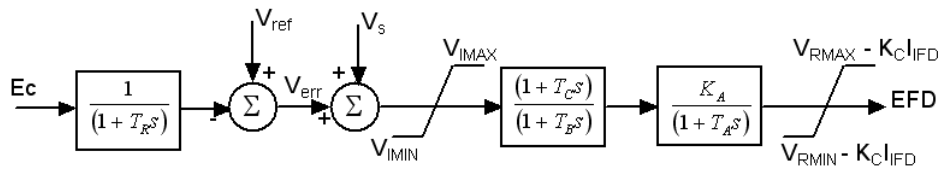


Fig. 5: Modelo EXAC4 del regulador de tensión.

TABLA III: PARÁMETROS DEL MODELO DEL RAV.

Parámetro del RAT	Central 1	Central 2
T_R	0.02 s	0.02 s
T_C	1.4 s	2 s
T_B	100 s	10 s
K_A	300	200
T_A	0.1 s	0.1 s
K_C	0	0
V_{IMIN}	-10	-10
V_{IMAX}	10	10
V_{RMIN}	0	0
V_{RMAX}	5	5

TABLA IV. PARÁMETROS DE DESEMPEÑO.

Parámetro	Central 1	Central 2
Tiempo crecimiento (10 % a 90 %)	0.25 s	0.16
Tiempo establecimiento (Ingreso en banda $\pm 5\%$)	1.03 s	0.85 s
Sobrepaso	18.5 %	14 %

En la Fig. 6 para una unidad de la central 1 y en la Fig. 8 para una unidad de la central 2 se muestran los registros de los ensayos, realizados sobre el regulador de tensión con las unidades en vacío, y las correspondientes simulaciones. En la Fig. 7 y en la Fig. 9 se presentan los registros de ensayos en carga realizados en unidades de ambas centrales.

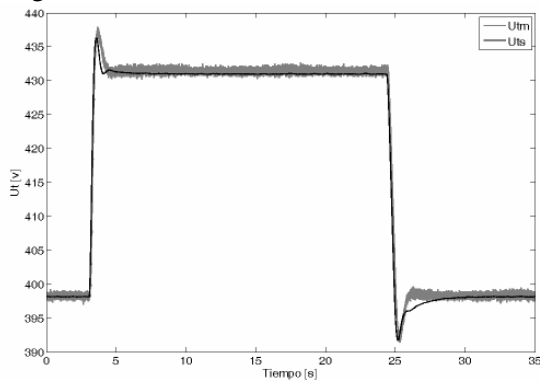


Fig. 6: Medición y simulación en vacío.

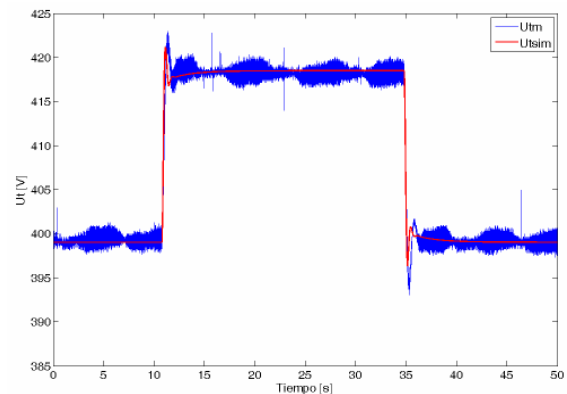


Fig. 8: Medición y simulación en vacío.

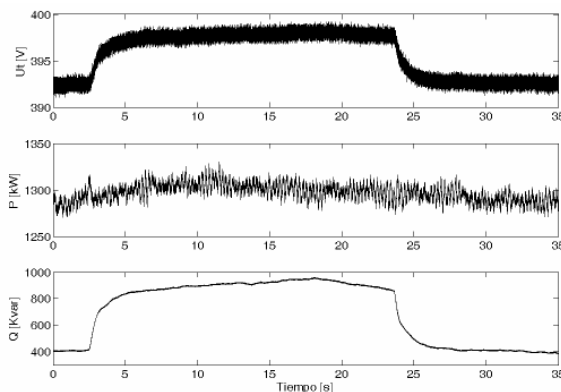


Fig. 7: Medición con unidad en carga.

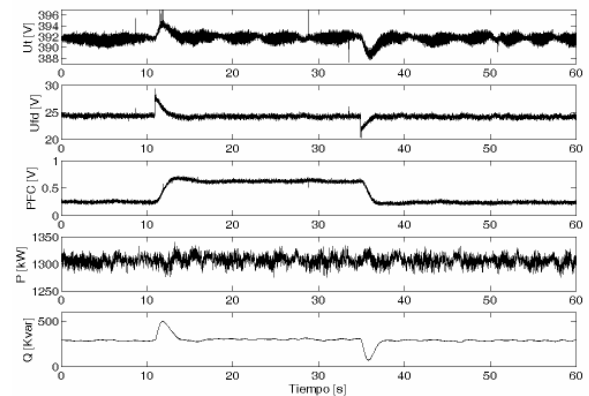


Fig. 9: Medición con unidad en carga.

En estas figuras se observa una buena concordancia entre las mediciones y las simulaciones con el modelo y los parámetros indicados.

5 SISTEMA DE CONTROL VELOCIDAD-POTENCIA

5.1 Determinación de la constante de inercia de los motogeneradores.

El fabricante suministra el valor del momento de inercia del conjunto de la máquina síncrona, su sistema de excitación y su acoplamiento a la máquina de impulso. Con este valor puede obtenerse una aproximación a la constante de inercia, la cual no tiene en cuenta la masa de la máquina de impulso (motor).

Dado que la constante de inercia de las unidades es muy pequeña, resulta conveniente la determinación de la misma a partir de un ensayo de rechazo de carga. El modelo de masas rotantes del motogenerador representa la relación existente entre el torque acelerante y la velocidad angular del rotor según la siguiente relación:

$$\omega_r(t) = \frac{1}{2H} \int T_a(t) dt = \frac{1}{2H} \int [T_{mech}(t) - T_{elec}(t)] dt$$

Expresada en por unidad, en la anterior expresión puede cambiarse la velocidad angular del rotor por la frecuencia eléctrica. Abriendo el interruptor de máquina se produce un cambio, tipo escalón, en el torque eléctrico desde su valor inicial a cero. El regulador de velocidad no responde de manera instantánea, y por lo tanto en los primeros instantes el torque mecánico se mantiene constante. Por lo tanto, inicialmente la velocidad angular del rotor crecerá en forma de rampa hasta que comience a actuar el regulador de velocidad. En la Fig. 10 y la Fig. 12 se muestran registros de ensayos de rechazo de carga sobre una unidad de la central 1 y otra unidad de la central 2. En la Fig. 11 y la Fig. 13 se muestra el desvío de frecuencia eléctrica medido y simulado en los primeros instantes posteriores al rechazo de carga.

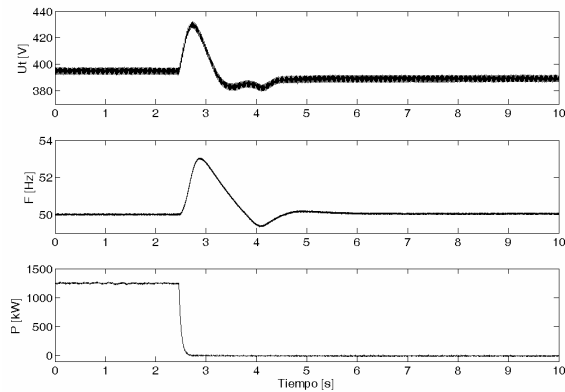


Fig. 10: Central 1. Rechazo de carga.

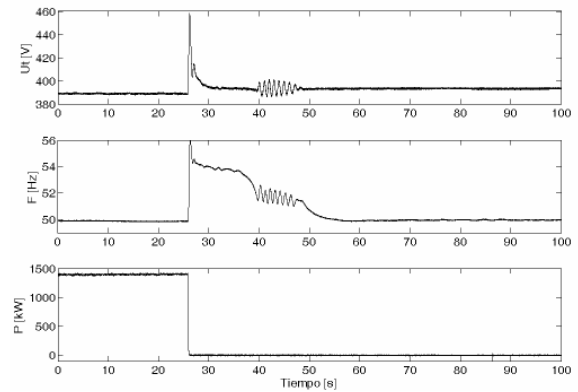


Fig. 12: Central 2. Rechazo de carga.

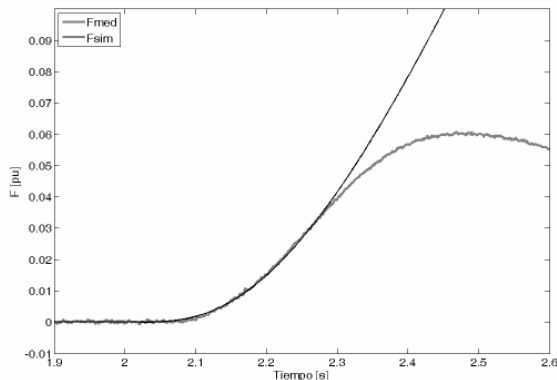


Fig. 11: Central 1. Medición y simulación de frecuencia ante el rechazo de carga

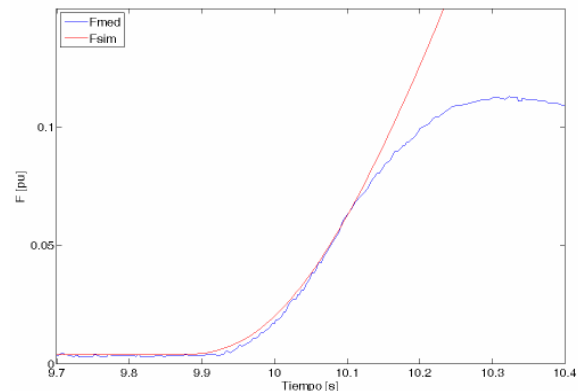


Fig. 13: Central 2. Medición y simulación de frecuencia ante el rechazo de carga.

El valor simulado del desvío de frecuencia se obtuvo con la siguiente expresión:

$$\Delta f_{sim}(t) = \frac{1}{2H} \int [-\Delta T_{elec}(t)] dt$$

Debido a la dinámica asociada a la medición, las variaciones de frecuencia no son rampas. En las simulaciones fue tenido en cuenta este efecto. Ajustando en la simulación la constante de inercia para que coincida la medición con la simulación, se obtienen los siguientes valores para las constantes de inercia: Central 1: $H = 0.5$ s y Central 2: $H = 0.44$ s.

5.2 Modelo del regulador de velocidad-potencia.

La Fig. 14 muestra el diagrama de bloques del modelo DEGOV1 del Regulador de Velocidad (Woodward Diesel Governor) del programa PSS/E, mientras que la TABLA V muestra los ajustes de este modelo correspondiente al funcionamiento en carga.

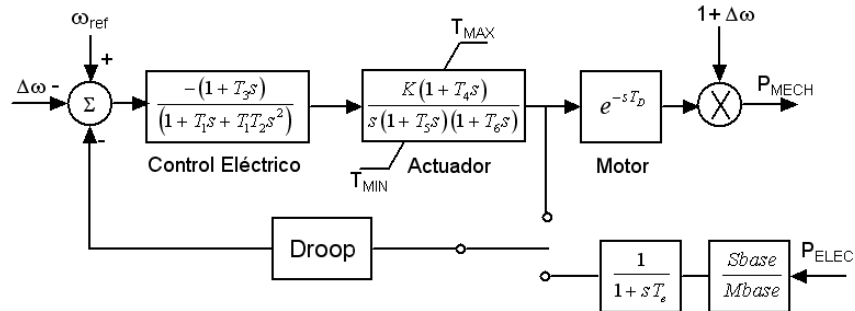


Fig. 14: Modelo DEGOV1 del regulador de velocidad.

TABLA V: AJUSTE DEL MODELO DEGOV1.

Parámetro	Central 1	Central 2
T1	0.03 s	0.03 s
T2	0.01 s	0.01 s
T3	1.60 s	1.60 s
K	3.31	3.31
T4	0.14 s	0.14 s
T5	0.28 s	0.28 s
T6	0.6 s	0.6 s
Droop	0.03	0.05
TD	0.03 s	0.03 s
T _{max}	1.1	1.1
T _{min}	0.0	0.0

El regulador de velocidad de las dos centrales puede operar en dos modos de funcionamiento: El primero de ellos se denomina carga preseleccionada, en el cual la potencia entregada por la unidad se mantiene invariable frente a las variaciones de frecuencia del sistema.

El segundo modo de funcionamiento se denomina droop, y en este caso la potencia eléctrica entregada por la unidad varía con las variaciones de frecuencia del sistema. Si la frecuencia del sistema aumenta, la potencia eléctrica generada disminuye y viceversa. Por consiguiente, operar en el modo “droop” implica contribuir a la regulación primaria de frecuencia.

El droop o estatismo representa el porcentaje de cambio de velocidad o frecuencia respecto del porcentaje de cambio de la potencia de salida. Por ejemplo un estatismo del 5 % significa que un 5 % de cambio en la frecuencia causa un 100 % de cambio en la potencia de salida. El valor de estatismo ajustado en los motogeneradores de la central 1 es del 3 % y en la central 2 es del 5 %.

Para ambas centrales, los ensayos consistieron en el registro de la potencia ante variaciones importantes en la frecuencia del sistema. En la respectiva simulación se ingresa al modelo con el registro de frecuencia medido.

Los registros de ensayos y las respectivas simulaciones para motogeneradores de ambas centrales eléctricas en el modo de funcionamiento droop se presentan en la Fig. 15 a la Fig. 18.

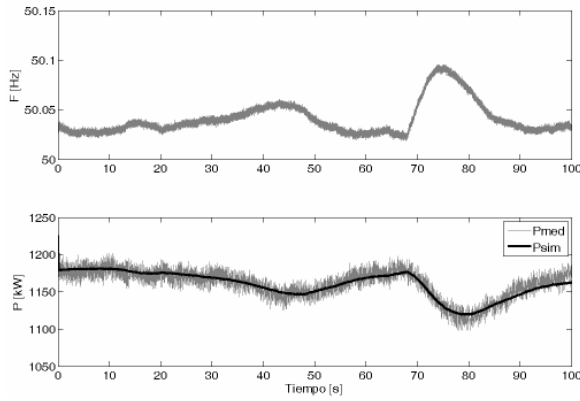


Fig. 15: Central 1. Frecuencia medida y Potencia medida y simulada.

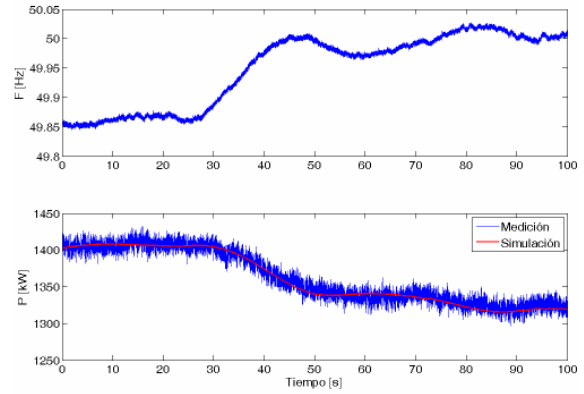


Fig. 17: Central 2. Frecuencia medida y Potencia medida y simulada.

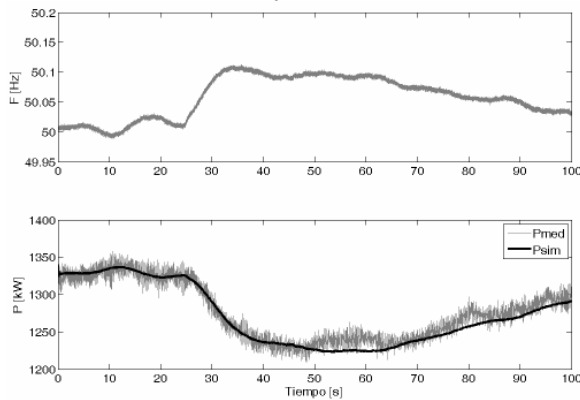


Fig. 16: Central 1. Frecuencia medida y Potencia medida y simulada.

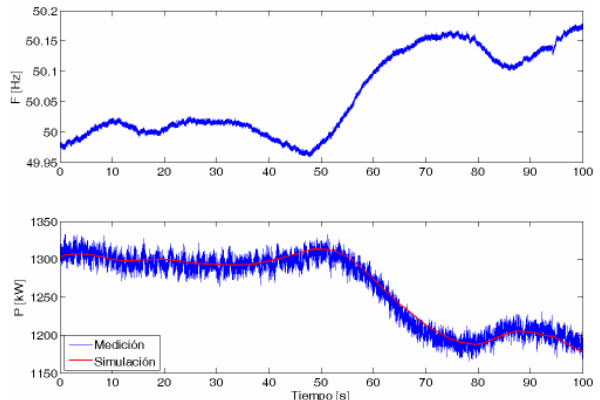


Fig. 18: Central 2. Frecuencia medida y Potencia medida y simulada.

6 CONCLUSIONES

De los ensayos realizados y de las posteriores simulaciones se observa que los motogeneradores de ambas centrales tienen similares parámetros de desempeño para los sistemas de control de excitación y de control velocidad-potencia, aún siendo de distintos fabricantes y utilizando distinto tipo de combustible.

Los modelos propuestos del generador, del sistema de control de velocidad-potencia (Regulador de velocidad) y del sistema de control de tensión (Regulador de tensión) de los motogeneradores presentan una muy buena concordancia con los resultados de los ensayos de campo y han sido incluidos en la base de datos de CAMMESA para su uso en estudios del sistema eléctrico Argentino.

7 REFERENCIAS

- [1] Programa PSS/E. Program Application Guide: Volume II. Power Technologies, Inc.
- [2] IEEE Std. 421.5-1992. IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies.