

# Curvas de Entrada – Salida y Características de Regulación de Velocidad de las Centrales Termoeléctricas de Gas – Diesel mediante Pruebas de Campo del Sistema Eléctrico Interconectado de Potencia (SEIP) de PETROPRODUCCIÓN

Ing. Waldo José Cabrera

Ing. Mario Iván Morales

Dr. Jesús Játiva Ibarra

Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Escuela Politécnica Nacional

## RESUMEN

En el presente trabajo se presentan las curvas de entrada-salida de las unidades de generación térmica con turbinas a gas del Sistema Eléctrico Interconectado de Petroproducción (SEIP). Dentro de estas curvas se encuentran: curva de costos de generación, curva de energía térmica, curva de costo incremental, curva de consumo específico y curva de eficiencia. Se presentan los resultados de las características de regulación de velocidad, como son: rapidez controlada de subida y bajada de carga, el estatismo y las bandas muertas de frecuencia y potencia.

Adicionalmente, se determina el factor de conversión de la desviación de la frecuencia B del SEIP, para el cálculo del error de control de área.

Estos parámetros fueron determinados en base a los datos obtenidos en las respectivas pruebas de campo, las cuales fueron detalladas y aplicadas en base a normas internacionalmente aceptadas. Estos valores serán utilizados en las aplicaciones de despacho económico y control automático de generación, implementados por Petroproducción como parte de su sistema SCADA.

Las pruebas de campo se realizaron en las unidades de generación TA, TB y TY, ya que estos modelos de unidades son las más representativas del SEIP.

## ABSTRACT

Input – Output curves for the thermal generating units with gas turbines of the Interconnected Electric System of Petroproducción (SEIP) are presented in this work. Among them, generation cost curves, thermal energy curves, incremental cost curves, heat rate cost curves and efficiency curves can be found. Speed regulation characteristics, such as: up and down ramp rates, speed droop, frequency and power dead bands are determined.

Additionally, the frequency bias (conversion frequency factor) B is found for the area control error calculation.

In order to determine the input – output and speed regulation characteristics parameters, results obtained from field test are used, which were developed based on internationally accepted norms. These data will be used in the Petroproducción SCADA applications: economic dispatch and generation automatic control. Field test were realized on the generating units TA, TB and TY, which are the most representative of SEIP. Such a methodology may be used as reference for similar units.

## 1. INTRODUCCIÓN

Debido a la necesidad de incrementar la producción petrolera y aumentar la eficiencia en la operación de las centrales termoeléctricas, Petroproducción ha iniciado la implementación de un sistema de administración de energía PMS en su sistema eléctrico.

Entre las aplicaciones del PMS se encuentran el despacho económico DE y el control automático de generación AGC.

Con estos programas implementados en línea, se podrá monitorear, supervisar y controlar en tiempo real la generación eléctrica utilizada en la operación de los campos de explotación petrolera ubicados en la zona oriental de Ecuador y bajo la administración de Petroproducción.

## 2. CENTRALES TÉRMICAS A GAS

Estas centrales de generación termoeléctrica utilizan gases de combustión como fluido de trabajo, los cuales se expanden en una turbina a gas y ocasionan el movimiento de un eje que a su vez mueve el generador eléctrico asociado, el proceso de generación está regido por el ciclo abierto de Brayton. Los componentes principales forman parte de este tipo de centrales son: un compresor axial, uno o varios quemadores de gas y/o diesel, una turbina a gas y un conjunto de sistemas auxiliares y el generador eléctrico; tal como se presenta en la figura 1.

## 3. CURVAS DE ENTRADA-SALIDA

Estas características dependen de la relación entre la entrada total y la salida neta. La entrada total representa la energía térmica aportada por el volumen de combustible inyectado por un determinado tiempo, el cual puede estar expresado en galones por minuto o en pies cúbicos por minuto. Si a este valor se multiplica por su precio unitario se obtiene un resultado en unidades monetarias por hora, o si se multiplica por el poder calórico inferior se obtiene la energía térmica aportada en una hora. Mientras que la salida neta de la planta de generación corresponde a la potencia eléctrica que entrega al sistema eléctrico. Esto se representa esquemáticamente en la Figura 2.

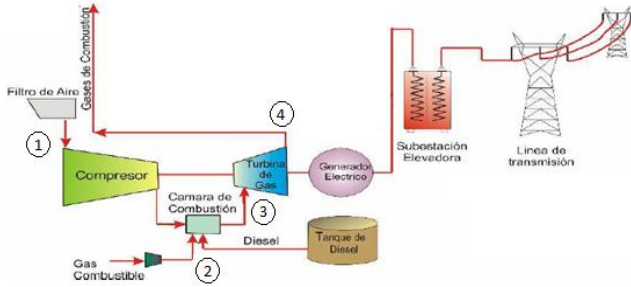


Figura 1: Esquema de una Unidad Térmica con Turbina a Gas

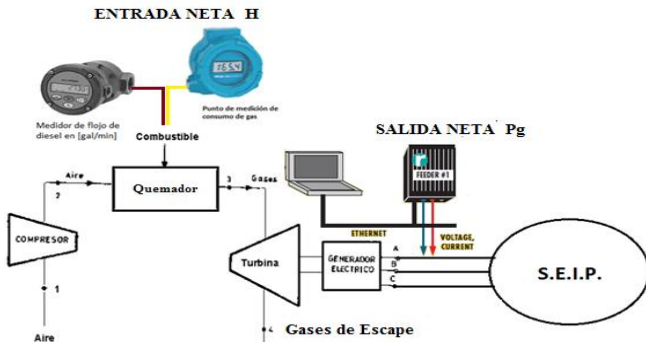


Figura 2: Esquema de Entrada-Salida para una Central Térmica a Gas

Los datos de la característica de entrada - salida pueden ser obtenidos por cálculos de diseño de las máquinas, por pruebas en la máquina instalada o mediante registros de operación en unidades que se dispongan de equipos de registro.

El método más recomendado para determinar las características de entrada salida, es mediante pruebas en campo ya que reflejan las condiciones reales de las unidades y no las condiciones teóricas. Esta prueba consiste en medir el ingreso de combustible (gas y/o diesel) en la línea de entrada de los quemadores y al mismo tiempo registrar la potencia eléctrica de salida que entrega al SEIP. Esto se realiza para diferentes puntos del rango de operación desde la potencia mínima hasta la potencia máxima, por un tiempo determinado, es recomendable de 8 a 13 puntos por un tiempo de 15 minutos en cada uno de ellos. Con esto se obtiene puntos discretos de una curva que mediante técnicas matemáticas de regresión, calcula los coeficientes del modelo de una curva polinomial que puede ser de segundo o tercer orden dependiendo del índice de ajuste de la curva, como la que se presenta en la ecuación (3.1).

$$F = a + b * P_g + c * P_g^2 \frac{BTU}{h} \quad (3.1)$$

Esta formulación también puede representar una función de costos, que es la más usada en despacho económico, quedando como la ecuación (3.2).

$$Costo = a' + b' * P_g + c' * P_g^2 \frac{US\$}{h} \quad (3.2)$$

En la figura 3 se muestra la característica de entrada - salida idealizada de una unidad térmica a gas.

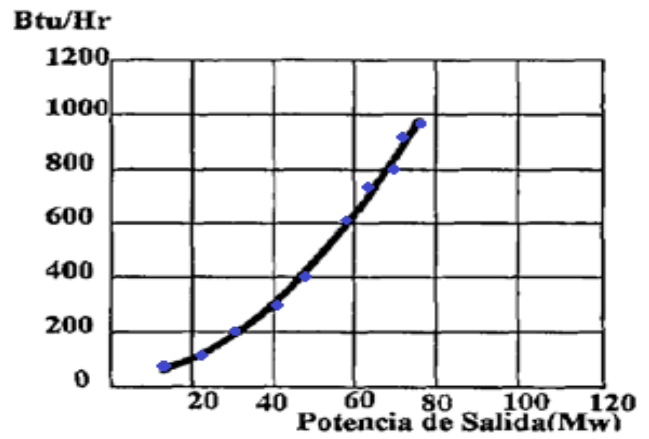


Figura 3: Curva Entrada - Salida

El método de ajuste de curva más recomendable es el método de regresión lineal general y se puede utilizar la técnica de estimación por mínimos cuadrados.

### 3.1 CURVA DE CONSUMO ESPECÍFICO

Una característica importante en las unidades termoeléctricas es la curva de consumo específico (heat - rate), esta característica resulta de la energía de entrada sobre la energía de salida, versus la potencia de salida, como se presenta en la ecuación (3.3). Esta se expresa en BTU/MWh versus MW. Esta característica es el inverso de la característica de eficiencia desarrollada por la unidad.

$$Heat\ Rate = \frac{F}{P_g}$$

$$Heat\ Rate = \frac{a'}{P_g} + b' + c' * P_g \frac{MBTU/MW}{MW} \quad (3.3)$$

La figura 4 muestra una curva de consumo específico propia de una central termoeléctrica a gas.

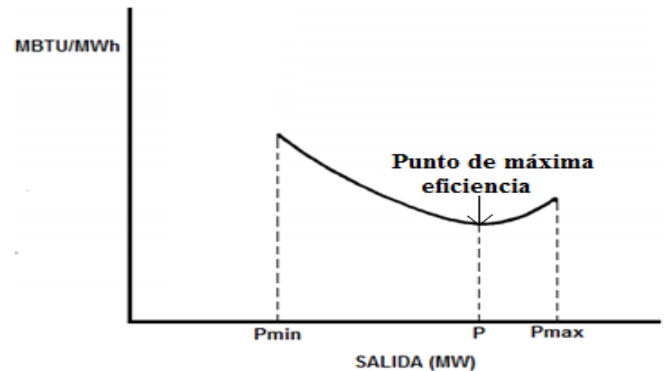


Figura 4: Consumo Específico (Heat Rate) de una Central con Turbina a Gas

### 3.2 CURVA DE COSTO INCREMENTAL

La función matemática de esta curva se la obtiene al derivar la ecuación (3.2). Con esta curva se puede

realizar una coordinación de un grupo de unidades de generación para determinar la potencia que debe entregar cada unidad y con ello abastecer una carga eléctrica demanda para todo grupo de generación. A esta coordinación basada en la curva de costo incremental se denomina Despacho Económico DE.

$$\text{Costo Incremental} = \frac{d\text{Costo}}{dP_g}$$

$$\text{Costo Incremental} = b' + 2 * c' * P_g \frac{\text{US\$}}{\text{MWh}} \quad (3.4)$$

#### 4. CARACTERÍSTICAS DE REGULACIÓN DE VELOCIDAD

##### 4.1 ESTATISMO (Speed Droop)

El estatismo es la variación porcentual de la frecuencia por cada unidad de variación porcentual de la carga en un generador, esta afirmación se la puede expresar matemáticamente con la ecuación (4.1).

$$R = \frac{\Delta f}{\Delta P} = \frac{\%Hz}{puMW} \quad (4.1)$$

Este parámetro se puede determinar mediante una prueba de rechazo de carga, una prueba de toma de carga o mediante los registros de frecuencia y potencia de la unidad operando fuera de línea y con una carga eléctrica exclusiva.

##### 4.2 BANDAS MUERTAS DE REGULACIÓN

Las bandas muertas presentes en los sistemas de regulación de velocidad se proveen para evitar su respuesta ante cambios muy rápidos y pequeños de velocidad, y su aumento se debe al desgaste de las partes mecánicas tanto del regulador como de las servo-válvulas. Existen también reguladores de velocidad con banda muerta ajustable a ciertos fines específicos.

##### 4.2.1 BANDA MUERTA DE FRECUENCIA

En un regulador de velocidad las bandas muertas de frecuencia, pueden ser configuradas por el operador del sistema, cuyo valor es producto de un análisis de sensibilidad del grupo de unidades que realizan la regulación primaria de frecuencia. Un valor demasiado pequeño de banda muerta de frecuencia puede ocasionar frecuentes oscilaciones de frecuencia del sistema. Este valor define el intervalo de cambio de frecuencia en el cual no se cumple la característica de estatismo, es decir que el regulador de velocidad no realiza el control de velocidad y por ende la unidad no puede participar en la regulación primaria en esta banda de frecuencia, esto se puede observar en la Figura 7.

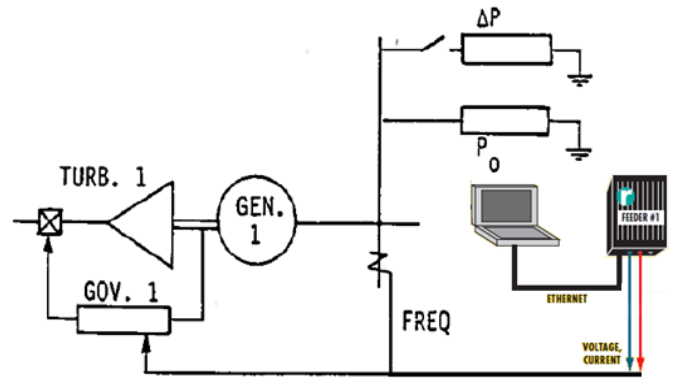


Figura 5: Esquema de componentes de la prueba de toma o rechazo de carga

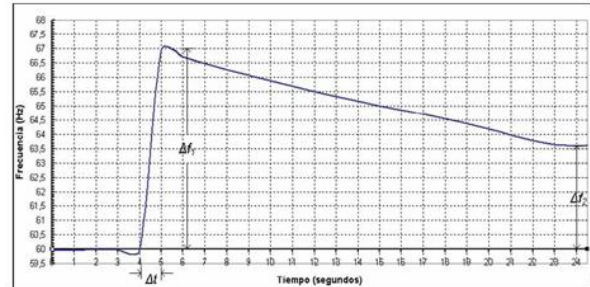


Figura 6: Respuesta de la frecuencia frente a la prueba de rechazo de carga

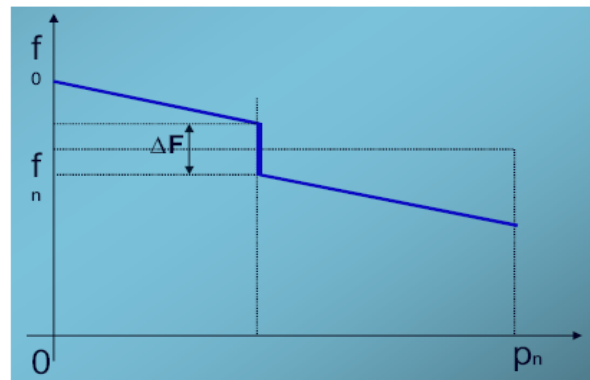
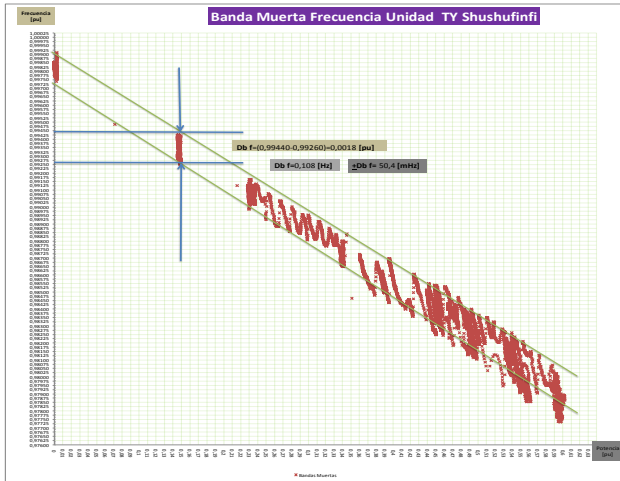


Figura 7: Banda Muerta de Regulación de frecuencia

En caso de que en el regulador de velocidad no exista la posibilidad de configurar su banda muerta de frecuencia, tendrá el valor dado por su característica intrínseca de sensibilidad de frecuencia propia de todo el sistema de regulación de velocidad.

Para determinar este valor de la Banda Muerta de frecuencia se puede realizar una prueba con la unidad fuera de línea y con carga de prueba en sitio. Aquí se debe registrar la frecuencia en [pu] y la posición del servomotor principal o potencia eléctrica de salida en [pu], en un gráfico tipo X-Y. De este gráfico se determina directamente la banda muerta como la mayor longitud del trazo que muestre una variación de frecuencia sin ninguna variación en la potencia de salida, como se presenta en la figura 8.



**Figura 8:** Resultados de Prueba de Banda Muerta de Frecuencia

#### 4.2.2 BANDA MUERTA DE POTENCIA

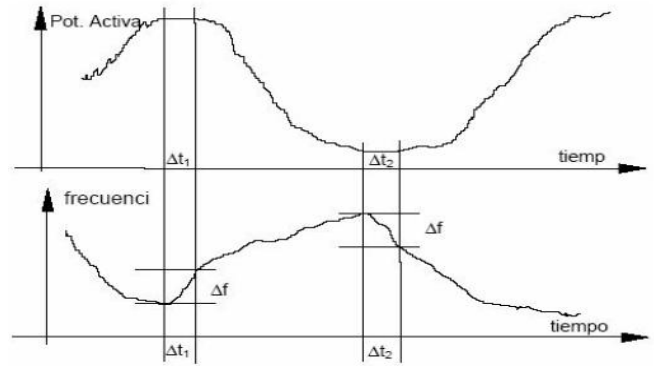
Este parámetro se puede determinar con los datos de potencia y frecuencia en función del tiempo, que se obtienen en una prueba con la unidad fuera de línea y con carga de prueba en sitio. Con la interpretación de estos datos en base a la ecuación de oscilación para una máquina sincrónica (4.2), tomando el criterio de que la frecuencia permanece constante siempre que se mantenga la igualdad de la potencia eléctrica y mecánica de la unidad.

$$\frac{H}{30} \frac{\partial \Delta f}{\partial t} + D \cdot \Delta f + \frac{\Delta f}{R} = P_m - P_e = P_a \quad (4.2)$$

Donde:

- $H$  Constante de inercia de la máquina sincrónica
- $\Delta f$  Variación de frecuencia
- $R$  Estatismo permanente
- $D$  Amortiguamiento de la carga
- $P_m$  Potencia Mecánica
- $P_e$  Potencia Eléctrica
- $P_a$  Potencia Acelerante

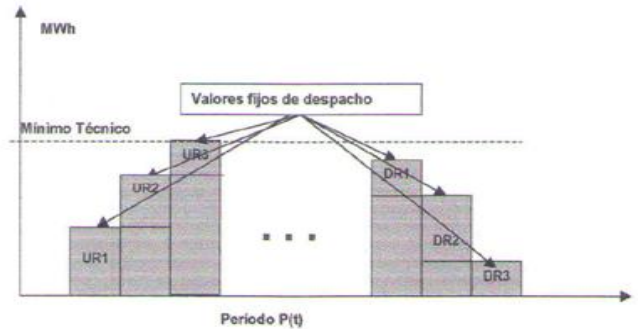
Al producirse una variación en la potencia eléctrica, ocurrirá una variación en la frecuencia, si esta variación de potencia eléctrica no es lo suficientemente grande como para producir un paso de cambio en la potencia mecánica, la frecuencia tiene que seguir variando hasta el punto en que el regulador pueda provocar un cambio mínimo en la potencia mecánica. A este paso mínimo de potencia que pudo dar el regulador se le conoce como Banda Muerta de Potencia, como se muestra en la figura 9.



**Figura 9:** Método Y1, Y2 para la Determinación de la Banda Muerta de Potencia

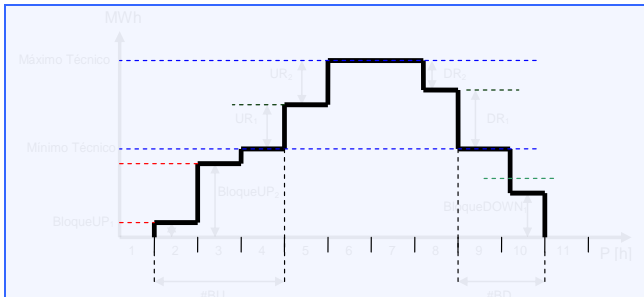
#### 4.3 RAPIDEZ CONTROLADA DE SUBIDA Y BAJADA DE CARGA

La característica de rapidez de toma de carga y descarga son propiedades intrínsecas de todos los componentes de una unidad de generación, es decir dependen del tipo (térmica, hidráulica, solar, geotérmica, etc.), del tamaño de la unidad, del proceso de generación, de las partes mecánicas rotativas, entre otras. Este parámetro es necesario que se determine para que una unidad pueda ingresar en un grupo de unidades que posean un control automático de generación AGC, ya que con este valor el operador del sistema programa la velocidad del cambio de potencia de cada unidad para ir de un despacho a otro consecutivo, tal como se muestra en la figura 10.



**Figura 10:** Asignación Despacho Económico Horario

La rapidez con que una unidad de generación toma carga puede variar a lo largo de su rango de operación. En el rango de potencias cercano a la mínima potencia de generación la unidad tiene mayor facilidad para tomar carga y con ello tener una mayor rapidez de toma de carga, no así en el rango de potencias cercanas a la potencia máxima donde la unidad presenta menor facilidad para tomar carga, lo contrario ocurre con la rapidez de descarga. Por ende se debe discretizar el rango de operación de la unidad y determinar la rapidez en cada uno de los intervalos designados, tal como se presenta en la figura 11.



**Figura 11:** Rapidez de Toma de Carga y Descarga (Ramp rate UP/Down)

Estos valores se los obtiene mediante una prueba de subida y bajada de carga realizada por el operador de la unidad, en la cual se registra en un equipo de medición apropiado (que puede ser un analizador de calidad de energía) los diferentes niveles de potencia y tiempos correspondientes que conlleva a llegar a cada uno de ellos.

Si el algoritmo de despacho económico utilizado incluye un modelo de rampas dinámicas, se debe utilizar cada uno de los valores de la figura 11. De no ser así, se debe tomar el menor valor de los que se indica en la figura 11. De igual manera se debe aplicar para la rapidez de descarga.

#### 4.4 FACTOR DE CONVERSIÓN DE DESVÍO DE FRECUENCIA (B)

Para determinar este factor se toma en cuenta los estadismos de las máquinas del parque generador, con lo que el factor B puede ser calculado mediante la ecuación (4.3).

$$B = \frac{1}{R_{eq}} + D = \frac{MW}{Hz} \quad (4.3)$$

En donde:

R: es el estadismo equivalente del sistema, considerando todas las unidades del parque generador en línea en el instante de la falla [p.u.]

$$R_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}} \quad (4.4)$$

D: amortiguamiento de la carga p.u., que para estas pruebas no fue considerado.

## 5 RESULTADOS

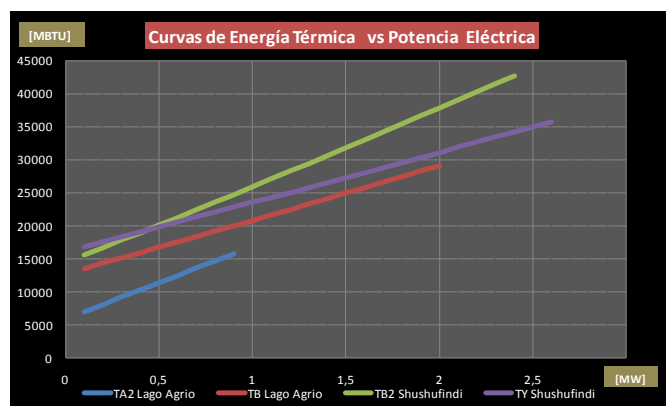
Los resultados obtenidos en cada una de las pruebas aplicadas a las unidades representativas de los centros de generación Lago Agrio y Shushufindi de Petroproducción: TA, TB y Typhoon (TY), se detallan en las tablas 5.1 y 5.2 y en las figuras 12, 13, 14 y 15.

**Tabla 5.1** Rapidez de Toma de Carga y Descarga

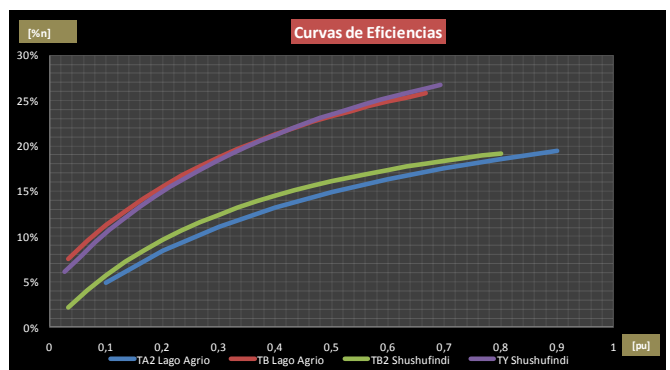
Tabla de Resultados de las Pruebas de Rapidez de Subida y Bajada de Carga					
Campo	Unidad	Rapidez de Subida de Carga Nominal	Rapidez de Bajada de Carga Límite	Rapidez de Bajada de Carga Nominal	Rapidez de Bajada de Carga Límite
		[kW/seg]	[kW/seg]	[kW/seg]	[kW/seg]
Lago Agrio	TA1	17,6	20,1	20,2	22
Shushufindi	TB2	38,6	63,1	38,1	60,8
	TY	83,698	90,274	93,6	120,17

**Tabla 5.2:** Bandas Muertas de Frecuencia y Potencia

Características de Regulación de Velocidad					
Campo	Unidad	Banda Muerta de Frecuencia		Banda Muerta de Potencia	
		"±DBF" [mHz]	[pu]	"±DBP" [W]	[pu]
		Lago Agrio	TA1	-	-
	TB	-	-	-	-
Shushufindi	TB1	108	0,0018	19,31	6,43667E-06
	TY	60	0,0010	45,125	1,20333E-05



**Figura 12:** Gráfica Resumen de la Curva Entrada-Salida de Energía Térmica



**Figura 13:** Eficiencia de las Unidades TA, TB, TY

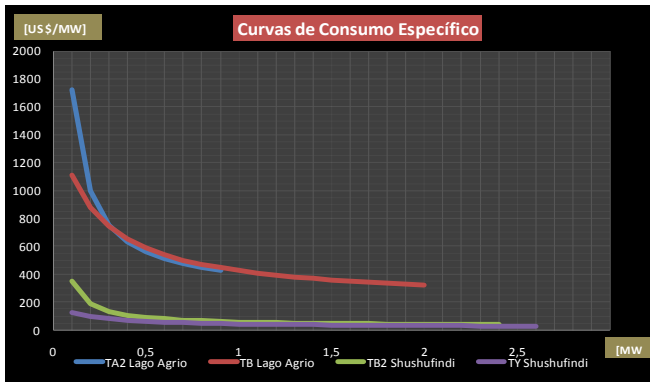


Figura 14: Gráfica Resumen de Consumo Específico

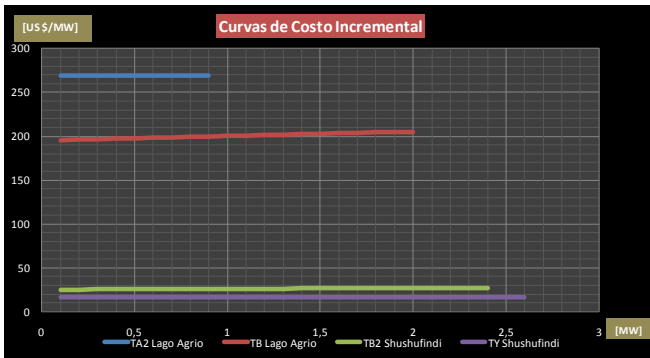


Figura 15: Gráfica Resumen de Costo Incremental

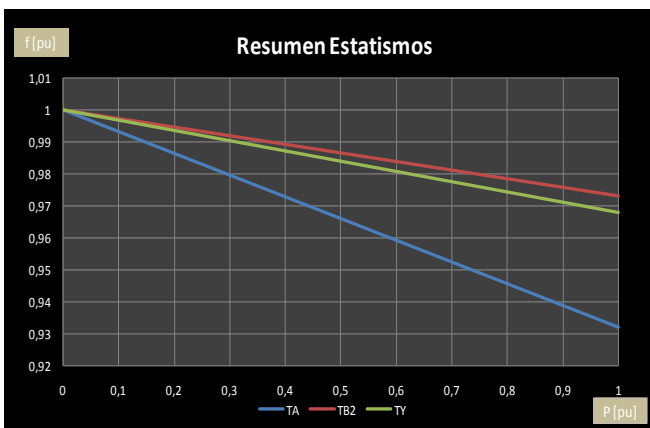


Figura 16: Estadísticos de las Unidades TA, TB y TY

Al disponer de los resultados de los estadísticos se puede calcular el factor de conversión de desvío de frecuencia usando la ecuación 4.3.

Para el caso de las unidades en las que no se pudo realizar las pruebas se considera un estatismo del 5%, puesto que todas las unidades participan en la regulación primaria de frecuencia. El resumen del valor del estatismo de cada unidad se detalla en la tabla 5.3.

Aplicando la ecuación 4.4, se tiene que:

$$R_{eq} = 0,047888 \frac{Hz}{MW}$$

Luego aplicando la ecuación 4.3, se tiene que el factor de conversión de desvío de frecuencia B es igual a 2,088 MW/dHz.

$$B = \frac{1}{R_{eq}} + D = \frac{1}{0,047888} + 0 = 20,88188 \frac{MW}{Hz}$$

Tabla 5.3: Resumen de estadístico de las unidades

		# DE UNIDADES	R POR CADA UNIDAD %	POTENCIA BASE MW	R POR UNIDAD Hz/MW
PETROPRODUCCIÓN	TA	3	6,79	1	4,074
	TB	3	2,27	3	0,454
	TYPHOON	1	3,19	3,75	0,5104
	WARTSILA	1	5	5,5	0,545454545
	GEN	2	5	0,8	3,75
CELEC	UND	3	5	2,865	1,047120419
JUSTICE	GEN	14	5	1,36	2,205882353

## 6 CONCLUSIONES

- Las metodologías de cada una de las pruebas se desarrollan en base a normas similares emitidas por el Consejo Nacional de Operaciones CNO de Colombia, así como también a las recomendaciones establecidas por el Instituto Americano del Petróleo API y a las normas vigentes de seguridad establecidas en el Reglamento Interno de Seguridad e Higiene Industrial de EP PETROECUADOR.
- Los resultados de las pruebas de rapidez de toma de carga y descarga muestran que el generador TY tiene la mayor rapidez de subida de carga en kW/s. Sin embargo, las unidades TB tienen mayor rapidez de subida de carga por unidad de su potencia base, puesto que disponen de un mecanismo de apertura de álabes, que a la mitad la potencia nominal permite aumentar rápidamente hasta su máxima potencia. De igual manera ocurre al momento de la bajada de carga, es decir al reducir la potencia eléctrica de salida.
- Los resultados obtenidos de las pruebas de las características de regulación de velocidad o estatismo (R) indican que la unidad TA1 de Lago Agrio tiene el mayor estatismo 6,79%, es decir, tiene la menor sensibilidad a los cambios en la frecuencia de sistema. Esto se debe a las características tecnológicas de construcción mecánico-hidráulicas del regulador de velocidad. El estatismo de los modelos de las unidades restantes son menores a 3,2% y similares entre ellas. El estatismo de la unidad TB1 del campo Shushufindi es la posee el menor valor 2,27%.

## APÉNDICE: Nomenclatura

- Pg** Potencia Eléctrica de Salida (kW)
- a, b** Coeficientes de las curvas de Entrada-salida
- c** Coeficiente independiente de las curvas de entrada-salida
- R** Estatismo de la unidad térmica (Hz/MW)
- R<sub>eq</sub>** Estatismo equivalente del área térmica (Hz/MW)
- H** Constante de inercia de la máquina síncronica

$\Delta f$	Variación de frecuencia
<b>D</b>	Amortiguamiento de la carga
<b>P<sub>m</sub></b>	Potencia mecánica
<b>P<sub>e</sub></b>	Potencia eléctrica
<b>P<sub>a</sub></b>	Potencia acelerante
<b>B</b>	Factor de conversión de desvío de Frecuencia (MW/Hz)

## REFERENCIAS

1. Optimal Power Dispatch. A Comprehensive Survey IEEE TALAQ , J. H, F. El-Hawary, M. E. El-Hawary, "A
2. Summary of Enviromental / Economic Dispatch Algorithms". IEEE Transactions on Power Systems, vol.9, N°3, Agosto 1994, páginas 1508-1516
3. GIAMPAOLO, Anthony. Gas Turbine Handbook Principles And Practices, Third Edition.
4. WOOD Allen  $\delta$  WOLLENBERG Bruce, "Power Generation, Operation, and Control" .A Wile-Interscience Publication John Wiley  $\delta$  Sons, Inc. 1996
5. KUNDUR, Prabha, "Power System Stability and Control". McGraw-Hill Inc 1994 1.776p. (ISBN: 0-07-035958-X).
6. BOSE, Anjan, "Power System Stability: New Opportunities for Control" [en línea],
7. DY-LYACCO, Tomas E., "Real-Time Computer Control of Power Systems", Proceedings of The IEEE, Vol. 62, N°7, pp 884-891, Julio 1974.
8. COHN, Nathan, "The Way We Were", IEEE Computer Applications in Power, Vol.1.
9. "Metodología para la determinación de los parámetros para la sintonización del A.G.C. en sistemas Multiárea"
10. Control Automático de Generación (AGC) y Despacho Económico (DE) Telvent
11. MANUAL DE LA TURBINA RUSTON TA – 1750, Regulación de Velocidad.
12. MANUAL TRAINING "TC2000 Plus Gas Turbine Generating Unit Control System" Project No.: 05-517

## BIOGRAFÍAS



**Dr. Jesús Játiva** Ingeniero Eléctrico, en 1981, de la Escuela Politécnica Nacional, Master of Science in Electrical Engineering en 1988 y Doctor of Philosophy Ph.D. en 1991 de la Universidad de Texas en Arlington Estados Unidos de Norteamérica. Cursos de postgrado en Energy Conservation in Industry realizado en Suecia en 1995 y en Development Planning Techniques with Computer Applications efectuado en los Países Bajos en 1998. Profesor Titular de la Escuela Politécnica Nacional.



**Mario Morales Pazmiño.** Nació el 18 de enero de 1987 en la ciudad de Ambato, realizó sus estudios de bachillerato en Instituto Tecnológico Superior Bolívar, sus estudios superiores los realizó en la carrera de Ingeniería Eléctrica de la Escuela Politécnica Nacional, en la cual fue representante ante Consejo de Facultad (2009- 2010), Presidente Capítulo PES-IEEE-EPN Ecuador (2010) y obtuvo el título de Ingeniero Eléctrico en 2011.



**Waldo José Cabrera Pazmiño.** Nació el 11 de agosto en la ciudad de Quito, realizó sus estudios de bachillerato en el Instituto Tecnológico Superior Luis Rogerio Gonzales en la ciudad de Azogues, sus estudios superiores los realizó en Ingeniería Eléctrica en la Escuela Politécnica Nacional, basando su proyecto de titulación en curvas de entrada-salida y características de regulación de velocidad de centrales termoeléctricas.