

Modelamiento dinámico del proceso de gas – turbina de combustión en una planta de ciclo combinado

William Muriel Triana^a, Jesús Alberto González^{a*}, Juan Carlos Romero Salazar^b

(a) Universidad del Valle, Cali, Colombia

(b) Termovalle, Zona franca del Pacífico, Palmira, Valle

**E-mail: jgonza@univalle.du.co*

(Recibido: Abril 23 de 2008- Aceptado: Noviembre 19 de 2008)

RESUMEN

Con las metas de incrementar los valores de eficiencia en la generación y seguir el comportamiento creciente del mercado de electricidad, las plantas de ciclo combinado surgieron como una solución. Con estos tópicos en mente, es necesario tomar acciones que mejoren la seguridad y confiabilidad de los procesos de generación, siendo una de estas acciones el modelamiento dinámico. En el modelamiento del proceso que se muestra en este artículo, se explica la turbina de combustión compuesta por la turbina misma, la cámara de combustión y el compresor. Además se realiza el análisis de la termodinámica y el desarrollo del modelo. Finalmente se presentan las respuestas dinámicas y la operación de la turbina de combustión de una planta de ciclo combinado.

PALABRAS CLAVE: Ciclo Combinado, Modelamiento dinámico, Proceso de gas, Turbina de combustión, Generación de potencia, Plantas térmicas.

Dynamic modelling of the gas process – combustion turbine in a combined cycle power plant

ABSTRACT

With the goals of increase the values of efficiency in generation and follow the growing behavior of the electrical market, the combined cycle plants raise as a solution. With this topic in mind, is necessary taking actions that enhance the security and reliability of the generation process, being one of these actions the dynamic modeling. In the modeling process shows in this paper, is explain the combustion turbine; compose by the turbine itself, the combustion chamber and the compressor, also the thermodynamic analyzes and the developing of the model are made. Finally is giving a the dynamic responses and operation of the combustion turbine of a combined cycle plant.

KEYWORDS: Combyned cycle, Dinamic modelling, Gas process, Combustion turbine, Power generation, Thermal power plants.

1. INTRODUCCIÓN

Al integrar el ciclo térmico de gas con el de vapor se presenta el ciclo combinado (CC), siendo éste el uso de una misma fuente de energía en más de un proceso térmico o industrial. Aplicando este principio al estudio desarrollado, la fuente de energía es el calor obtenido de los gases de combustión, el cual es empleado primero por la turbina de combustión, para luego ser dirigido a la caldera de recuperación y la turbina de vapor.

En referencia al modelamiento de procesos, en este caso la turbina de combustión (TC) en una planta de ciclo combinado, los modelos se emplean para analizar el comportamiento dinámico de las variables de interés por medio de simulaciones, obteniendo conclusiones que ayudan a la comprensión de factores importantes en la operación de la planta y conllevan a la implementación de posibles acciones de control más acertadas.

Teniendo presente los modelos dinámicos de la literatura asociada al proceso, se ha desarrollado un modelo simplificado y de implementación flexible, evitando de esta manera las no linealidades, tal como es recomendado por diferentes autores del ámbito académico [1, 4]. Gracias a estas simplificaciones, es posible mejores análisis sobre las respuestas obtenidas, llegando a conclusiones como la dependencia en la salida de los sistemas térmicos de potencia, de variables como la frecuencia y las condiciones ambientales del sitio.

El proyecto realizado se limitó al comportamiento dinámico de la turbina de combustión en una planta de ciclo combinado, caso particular Termovalle, obteniendo aproximaciones sobre el comportamiento real del sistema, sin necesidad de manipularlo o poner en riesgo la generación de la planta.

Teniendo en cuenta todo lo anterior, el estudio describirá la turbina de combustión, además analizará la termodinámica del sistema y se calculará el modelo dinámico, obteniendo así las respuestas dinámicas de las variables de interés.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Descripción del proceso de gas en una planta de ciclo combinado

En una planta de ciclo combinado los procesos principales que interactúan entre sí son el proceso de gas, formado por el sistema de combustión y su respectiva turbina, y el proceso de vapor, formado por la caldera de recuperación de calor y la turbina de vapor. El estudio realizado tendrá como parte central el proceso de gas y las turbina de combustión.

El proceso de gas inicia cuando el aire es dirigido a través de una casa de filtros al compresor y con una alta presión es mezclado con el gas natural atomizado para lograr homogeneidad, obteniendo por medio de los combustores los gases de combustión, los cuales son orientados a los álabes y producen la rotación de la turbina, igualmente el turbogenerador eléctrico aprovecha el torque de rotación para generar la potencia que será transmitida a la subestación, finalmente los gases de combustión son aprovechados para el calentamiento de las paredes en la caldera de recuperación o expulsados al ambiente.

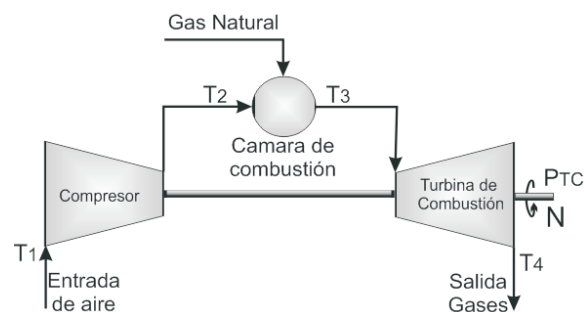


Fig. 1. Proceso de gas en una planta de ciclo combinado.

La turbina de combustión del proceso, es de un solo eje con un sistema de combustión de 16 combustores secos de bajo NOx y tiene el propósito de generar el 70% de la energía total de la planta, teniendo valores nominales a condiciones ambiente de 151 MW al ser operada

con gas natural. Un diagrama simplificado del proceso de gas – turbina de combustión, en una planta de ciclo combinado es mostrado en la figura 1.

La planta posee un sistema de control en el proceso de gas, para controlar el flujo de combustible, el flujo de aire y mantener los niveles apropiados de la temperatura en los gases de combustión, además se sensa la potencia eléctrica que se entrega al sistema por parte del generador acoplado a la turbina de combustión.

2.2 Relaciones físicas termodinámicas del proceso.

En termodinámica los procesos de gas se rigen por el ciclo Brayton, el cual opera tanto en ciclo abierto como cerrado, para el caso en estudio se enfocará el funcionamiento en ciclo abierto el cual es el implementado para la operación del ciclo combinado. En la figura 2 se observa el diagrama de Temperatura – Entropía (T-S), donde se expone el comportamiento del proceso y todas las fases que lo conforman.

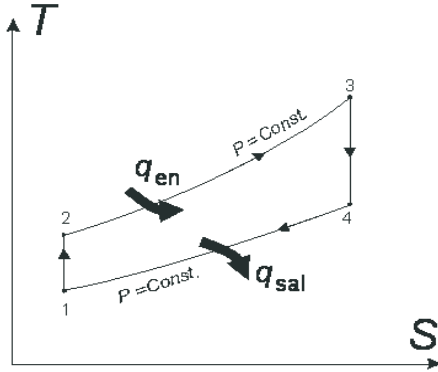


Fig.2. Diagrama Temperatura – Entropía Proceso de Gas.

Las variables principales que interactúan en el proceso de gas en una planta de ciclo combinado son:

P_{TC} :	Potencia en la turbina de combustión
T_1 :	Temperatura de entrada del compresor
T_2 :	Temperatura de salida del compresor
T_3 :	Temperatura de gases en la cámara
T_4 :	Temperatura de salida de los gases
W_f :	Flujo real de combustible
W :	Flujo de los gases de combustión
N :	Velocidad real turbina de combustión

Los ciclos de gas se caracterizan en que el fluido de trabajo permanece en la fase gaseosa, además, en el análisis es necesario determinar la temperatura a la cual salen los gases de combustión de la turbina y el torque mecánico, para obtener así, con T_4 la temperatura que seguiría a la caldera y con el torque la potencia P_{TC} .

Para determinar T_4 y P_{TC} es necesaria la parametrización, lo cual corresponde a determinar teóricamente las variables de un proceso, en función de parámetros propios del mismo [4]. De este análisis, se tiene como variable de entrada el flujo de combustible, que en este caso es gas, el cual varía ante cambios en la carga de la planta, y como variables de salida están la potencia y la temperatura de los gases de combustión, por lo tanto es necesario parametrizar las variables de salida en función de la entrada y variables internas que afecten el proceso.

Antes de realizar un análisis termodinámico, es necesario tener ciertas consideraciones.

- El fluido de trabajo, en la turbina de combustión, son los gases de combustión que circulan de modo continuo y serán asumidos como ideales.
- Todos los procesos que integran el ciclo son internamente reversibles.
- El proceso en el sistema de combustión es asumido como un proceso de adición de calor desde una fuente externa.
- El proceso en la turbina de combustión se asume como un proceso de rechazo de calor.

Las expresiones que determinan las temperaturas son:

$$T_4 = T_3 \left(1 - \left(1 - \frac{1}{\pi} \right) n_T \right) + T_N \quad (1)$$

$$T_3 = T_2 + \frac{W_f}{W} K_2 \quad (2)$$

$$T_2 = T_1 \left(1 + \frac{\pi - 1}{n_C} \right) \quad (3)$$

$$T_N = b_{f1}(1-N) \quad (4)$$

$$\pi = \frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_4} = r^{(\gamma-1)/\gamma} \quad (5)$$

Donde

- n_T : Eficiencia de la turbina
- n_c : Eficiencia del compresor
- W_f : Flujo del combustible
- W : Flujo base de los gases de combustión
- K_2 : Aumento de temperatura en los combustores
- T_N : Temperatura de enfriamiento por la velocidad
- b_{f1} : Factor de refrigeración por velocidad
- π : Relación de presiones isoentrópicas del proceso
- r : Relación de presiones
- γ : Relación de calores específicos
- T_{4Ref} : Temperatura base de salida de la turbina

Reemplazando 2, 3 y 4 en 1 se obtiene finalmente la temperatura de salida de los gases de combustión.

$$T_4 = T_{4Ref} - K_2 \left(1 - \left(1 - \frac{1}{\pi} \right) n_T \right) \left(1 - \frac{W_f}{W} \right) + b_{f1}(1-N) \quad (6)$$

Adicionalmente, es importante mencionar las limitaciones físicas que posee el proceso respecto a la temperatura, como son las corrosiones producidas por los gases de combustión a baja temperatura, es por esto que ésta no debe decaer a niveles corrosivos, necesitando límites dimensionales en el área de transferencia del calor [3]

Determinando el torque de la turbina, se debe expresar la potencia de generación base, lo cual ocurre al momento que la velocidad real es igual a la velocidad base de diseño.

$$P_{TC} = \tau_m \cdot n = \tau_m \cdot N \quad (7)$$

Del flujo de los gases de combustión, se despeja la potencia de la turbina de combustión

$$W = \frac{P_{TC} K_0}{\left[n_T T_3 \left(1 - \frac{1}{\pi} \right) - \frac{T_1}{n_c} (\pi - 1) \right]} \quad (8)$$

$$P_{TC} = \tau_m \cdot n = \frac{W}{K_0} \left[n_T T_3 \left(1 - \frac{1}{\pi} \right) - \frac{T_1}{n_c} (\pi - 1) \right] \quad (9)$$

Donde

$$K_0 = \frac{3413 \cdot P_{TCbase}}{W_0 \cdot T_{30} \cdot C_p}$$

Siendo

- τ_m : Torque mecánico de la turbina
- n : Velocidad base de la turbina
- K_0 : Relación entre energía real de salida e ideal
- P_{TCbase} : Potencia base turbina de combustión
- W_0 : Flujo base del compresor
- K_2 : Aumento de temperatura en los combustores
- T_{30} : Temperatura máxima en la turbina

En la operación se considera el torque de frenado por la fricción de la turbina con el aire, siendo:

$$\tau_n = c_{f2}(1-N) \quad (10)$$

Donde

- τ_n : torque de frenado por la fricción en velocidad de la turbina
- c_{f2} : Factor de fricción

De esta forma se obtiene el torque total de salida en la turbina de combustión; obedece a la siguiente expresión.

$$\tau_m = \frac{K_2}{K_0 n} W_f + (T_1 - T_{4Ref}) \frac{W}{K_0 n} + c_{f2} (1 - N) \quad (11)$$

3. RESULTADOS

3.1 Modelamiento proceso de gas – turbina de combustión.

Los modelos matemáticos a implementar en el proceso bajo estudio, permiten realizar un análisis sin la necesidad de una experimentación real, lo cual es de gran ayuda en procesos que no pueden estar bajo experimentación continua [6].

Con el modelamiento dinámico se conoce el comportamiento de las variables de salida ante maniobras en las variables de entrada [2]. En la planta Termovale, al modelo se le realizarán variaciones medibles durante la operación, siendo la entrada una variación de carga y la salida variables como la temperatura de los gases de combustión y la potencia de generación en la turbina.

En el proceso de modelamiento, deben tenerse consideraciones que simplifiquen el análisis, siendo algunas de ellas:

- El modelo es para fines de análisis de pequeña señal, por ello serán descartadas las no linealidades.
- El flujo de aire que entra al sistema, es asumido como constante, de esta forma la variación de alimentación será en el flujo de combustible.

En el proceso de gas y la turbina de combustión, la mayoría de las dinámicas son modelos de primer orden, correspondientes a retardos obtenidos a partir de datos propios del sistema. Entre las dinámicas de primer orden se encuentran la cámara de combustión compuesta por el sistema de combustión y la válvula de paso del combustible, la dinámica de turbina denominada de esta forma por la oposición de los álabes contra el flujo de los gases de combustión, y la termocupla que genera el valor medido de la temperatura de los gases de combustión.

Los retardos son modelados como sistemas de primer orden, y su función de transferencia es la siguiente:

$$FdT = \frac{1}{\tau_{Sistema} \cdot S + 1} \quad (12)$$

Siendo $\tau_{Sistema}$ la constante de tiempo de la función de transferencia del elemento.

En lo pertinente a dinámicas más complejas de la planta, se establece la radiación térmica en la combustión, siendo el proceso por el cual la termocupla recibe los valores de temperatura; la ecuación mecánica Torque/Velocidad, está con el fin de simular la variación de velocidad del rotor ante cambios en la carga, y por último el flujo de combustible sin carga, lo cual determina el combustible empleado en las pérdidas de vacío.

En la radiación térmica, los balances de energía determinan la siguiente función de transferencia:

$$FdT_{CR} = \frac{\tau_{CR3} \cdot S + 1}{\tau_{CR4} \cdot S + 1} \quad (13)$$

Donde

- τ_{CR3} : Constante de tiempo después de la cámara
- τ_{CR4} : Constante de tiempo después de la turbina

Respecto a la ecuación Torque/Velocidad se define mediante la función de transferencia:

$$N(s)_{mPU} = \frac{\tau_{mPU} - \tau_{ePU}}{2 \cdot H \cdot S} \quad (14)$$

Donde

- τ_{mPU} : Torque en p.u. de la turbina de combustión
- τ_{ePU} : Torque en p.u. producido por la carga
- H: Constante de inercia del sistema

La operación en vacío en el proceso genera consumos alrededor del 25% de acuerdo con la operación real del proceso, siendo mostrados en la figura 3.

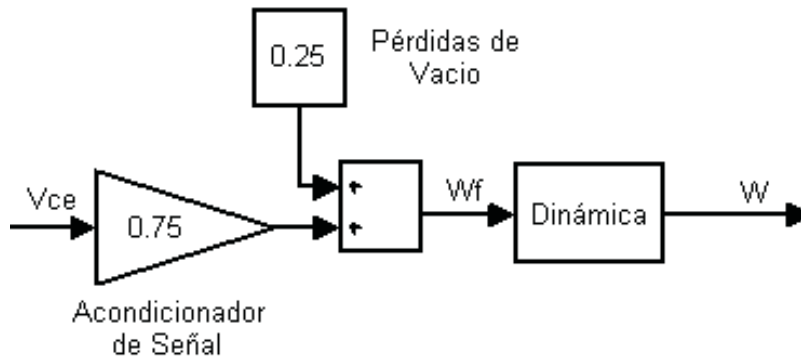


Fig. 3. Operación en vacío de la planta

Respecto al control de la planta, éste se enfoca en las variables de potencia/velocidad y temperatura. El control PID de Potencia/Velocidad es el responsable de limitar la velocidad al valor deseado de 3600 RPM cuando se está operando en vacío y de mantener los valores de potencia en los rangos específicos de operación al tener la planta conectada a la red, mientras que el control de temperatura PID es empleado para limitar la potencia de salida ante incrementos indeseados de temperatura y cuando se inhibe el regulador de velocidad [5].

Al Realizar un análisis con base en el rango de operación del estudio, cuando la turbina de combustión pasa del control de Potencia/Velocidad al de temperatura, las salidas

de los controladores se encuentran en un valor cercano entre sí, por esta se inhibirá el controlador de temperatura [6].

El modelo en diagrama de bloques de la figura 4, muestra cómo el flujo de combustible es obtenido como función Vce del controlador, obteniendo el flujo de los gases después de pasar por las dinámicas de operación sin carga, regulación de la válvula, el sistema de combustión y la dinámica de turbina. El flujo de los gases en conjunto con la variación de velocidad, entran a las parametrizaciones de temperatura y torque, obteniendo la potencia de salida de la turbina y la temperatura de los gases de combustión, esta última afectada por el campo de radiación y medida a través de la termocupla.

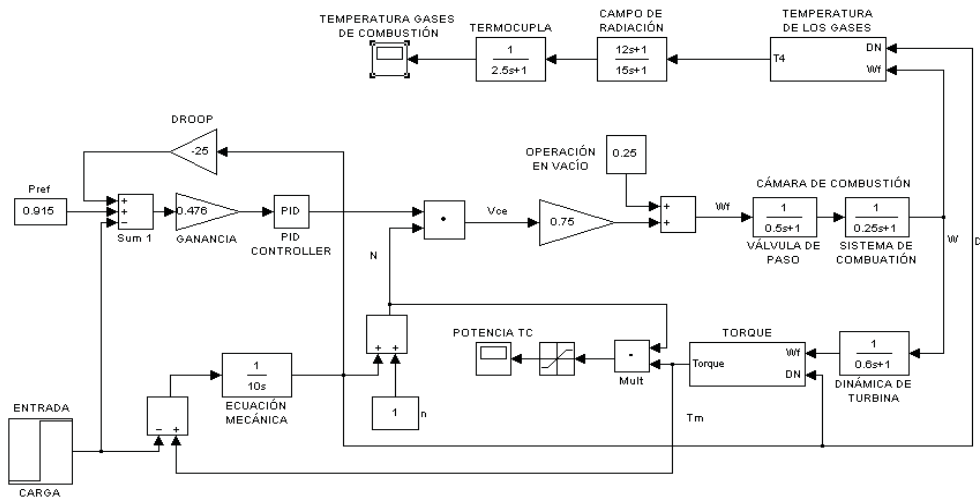


Fig.4. Modelo del Proceso de Combustión en una Planta de Ciclo Combinado Termovalle

3.2 Simulación, análisis y validación del modelo desarrollado.

Pasando a la fase de simulación, se emplea un programa especializado, en este caso el Matlab. Las dinámicas simuladas corresponden a las variaciones en la potencia de la turbina de combustión y en la temperatura de los gases de combustión.

Primero se presentarán las tendencias de comparación aportadas por la operación real de la planta, las cuales corresponden a una perturbación de carga en la planta de ciclo combinado, con una variación entre los 195,79 MW y 201,26 MW, mostrando en la tabla 1 los aportes de potencia y temperatura correspondientes a la turbina de combustión.

Tabla 1. Datos Reales Turbina de Combustión Termovalle

Variación de carga CC [MW]	Potencia TC [MW]	Temp. Gases Combustión [°C]
195,79	136,79	592,78
201,26	141,16	600,56

En el proceso de simulación, la carga base a generar es 214 MW correspondiente a 1 p.u. en todo el ciclo combinado. Para la simulación, se empleará la perturbación, correspondiente a una variación de carga, entre los 195,79 MW y 201,26 MW, teniendo valores en por unidad de 0,915 p.u. y 0,94 p.u. Para el proceso de combustión estos

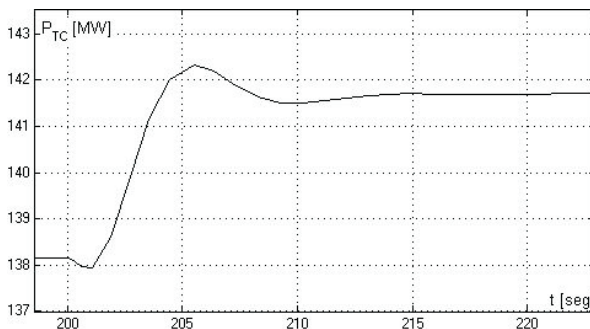


Figura 5. Potencia Simulada Proceso de Gas

valores en por unidad se mantienen y corresponden a una variación entre los 137 MW y 141 MW.

En las figuras 5 y 6 se muestra el comportamiento de las variables de interés, y puede observarse que la potencia de la turbina presenta una respuesta subamortiguada y comprende un pequeño comportamiento de contraposición al cambio, el cual corresponde a un cero inestable, aportado por la velocidad de la turbina, el cual es superado por el control implementado. Ante una entrada escalón con variación de carga, la temperatura medida de los gases de combustión se comporta de una manera amortiguada, y esto se debe a que la termocupla aporta un retardo de señal, el cual amortigua la dinámica de respuesta.

En todas las variables bajo estudio, es de observar que ante un incremento en la carga conectada a la planta, éstas tienden a seguir el mismo comportamiento, siendo en cierta forma proporcionales a las variaciones de potencia, con la excepción de la variación de velocidad del sistema, mostrando en sí, que el aumento de carga tiende a detener el proceso de rotación de la turbina. Claro está que aunque los comportamientos de las variables presenten una tendencia similar, existen características propias en cada una de ellas.

Se presentan los resultados de simulación en la tabla 2, para proceder a la respectiva validación de resultados.

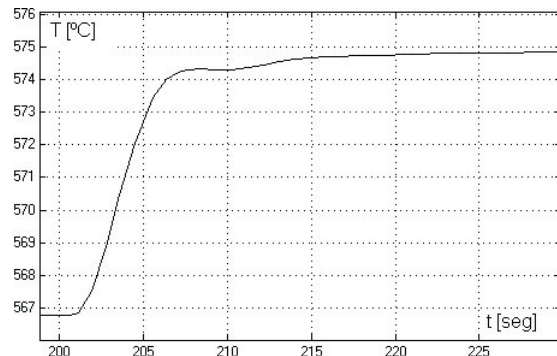


Figura 6. Temperatura Simulada Gases de Combustión

Tabla 2. Datos Simulados Turbina de Combustión Termovalle

Variación de carga CC [MW]	Potencia TC [MW]	Temp. Gases Combustión [°C]
195,79	132,00	566,70
201,26	135,00	575,00

Ya con las simulaciones se procede a las respectivas comparaciones con los históricos de la planta, con el fin de realizar el proceso de validación de acuerdo al manejo estadístico de los datos.

Para el proceso de validación del modelo se emplean los valores de las tablas 1 y 2 de la siguiente forma.

$$\%Error = \left| \frac{Valor_{REAL} - Valor_{SIMULADO}}{Valor_{REAL}} \right| \times 100 \quad (15)$$

%Error: porcentaje de error de la validación

Valor_{REAL}: Valor de la variable obtenida por la tendencia en la operación

Valor_{SIMULADO}: Valor de la variable obtenida por la simulación

Finalmente se obtuvo que en las variables de respuesta se genera un porcentaje de error con varianza o desviación inferior al 10%, garantizando de esta forma un alto grado de confiabilidad en el modelo desarrollado [2].

4. CONCLUSIONES

- Fueron obtenidos los análisis descriptivos y termodinámicos del proceso de gas, los cuales pueden emplearse ante dudas en la operación.
- Con la parametrización de variables del proceso, se logró observar el comportamiento de las variables en función de los procesos internos de la planta.
- En el modelo desarrollado se obtuvo como variable de control la velocidad en la turbina, como variable manipulada el flujo de combustible y como variables de salida la potencia en la turbina y la temperatura de los gases de combustión.

- Al validar el modelo, se obtuvieron varianzas de error inferiores al 10%, lo cual genera una gran confiabilidad sobre las respuestas a obtener en las simulaciones.

De manera general, el modelo desarrollado permite la realización de análisis de desempeño en la planta, visualizando el consumo de combustible con respecto a la potencia generada, además tiene aplicaciones prácticas como el entrenamiento de operarios de una planta de ciclo combinado.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] L. N. Hannett and A. Khan, *Combustion turbine dynamic model validation from test*. IEEE Trans, February 1993, Vol. 8, pp 152-158.
- [2] L. Jung, T. Glad, *Modeling of Dynamic Systems*. Prentice Hall, 1994.
- [3] R. Kehlhofo, *Combined-cycle gas & steam turbine power plants*. Prentice Hall, 1991.
- [4] W. I. Rowen, *Simplified mathematical representations of heavy-duty gas turbines*. ASME, Vol. 105(1) 1983 (Journal of Engineering for Power, Series A, October 1983), pp 865-869.
- [5] H. I. H. Saravanamuttoo, G. F. C. Roger, H. Cohen, *Gas Turbine Theory*. Pearson Education, 5ªEd. 2005.
- [6] W. Muriel, *Modelos dinámicos de una planta de ciclo combinado, caso: Termovalle*. Tesis de Grado. Universidad del Valle. 2006.

