

# Modelado de un ciclo Brayton regenerativo para el estudio de la mejora de la eficiencia de turbinas de gas.

E. II. Castro Juárez<sup>1</sup>, N. Alvarado-Tovar<sup>2</sup>, D.A: Román Landeros<sup>3</sup>.

**Resumen**— En la generación de energía eléctrica se utiliza un ciclo Brayton regenerativo con el fin de recuperar la energía calorífica de los gases expulsados por las turbinas de gas que cubren los picos de demanda energética. En el presente artículo se presenta el estudio para corroborar la mejora de la eficiencia total del ciclo bajo el cual trabaja la turbina de gas por la implementación de un regeneradora la salida del sistema por medio del lenguaje de programación MATLAB analizando diferentes casos de estudio que impactan directamente al ahorro de energía.

**Palabras claves**— Turbina de Gas, MATLAB GUIDE, ciclo Brayton simple.

**Abstract**—In the generation of electric energy, a regenerative Brayton cycle is used in order to recover the heat energy of the gases expelled by the gas turbines that cover the peaks of energy demand. In the present article the study is presented to corroborate the improvement of the total efficiency of the cycle under which the gas turbine works by the implementation of a regenerator the output of the system through the MATLAB programming language analyzing different cases of study that impact Directly to energy saving.

**Keywords**— Gas Turbine, MATLAB GUIDE, simple Brayton cycle

## I. INTRODUCCIÓN

Una turbina de gas es un motor térmico rotativo de flujo continuo que se caracteriza por presentar una baja relación de peso potencia y una velocidad de giro muy elevada [1]. En la figura 1 se pueden observar las partes más importantes que conforman una turbina de gas, las cuales son: entrada de aire (air inlet), sección del compresor (compression), cámara de

combustión (combustion), turbina (turbine) y salida de gas (exhaust).

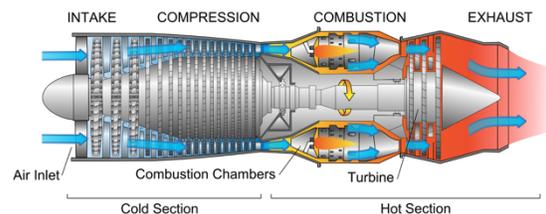


Fig. 1. Diagrama de una turbina de gas.

Las turbinas de gas actuales funcionan bajo el ciclo Brayton mostrado esquemáticamente en la Figura 2, y por las gráficas de temperatura-entropía T-s y presión-volumen específico (P-v) mostradas en las figuras 3 y 4 respectivamente, En las cuales se puede observar simultáneamente que el ciclo está formado por compresión isoentrópica (1 a 2), adición de energía a presión constante (2 a 3), expansión isoentrópica (3 a 4), y sesión de energía a presión constante (4 a 1) [3]

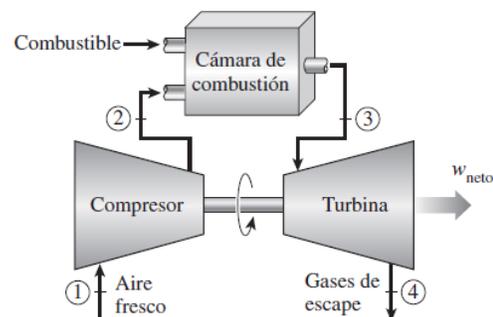


Fig. 2. Representación gráfica para el cálculo del ciclo Brayton en una turbina de gas

<sup>1</sup> Instituto Tecnológico Superior de Lerdo. Av. Tecnológico 1555 Sur, Periférico Gómez-Lerdo KM. 14.5, C.P. 35150, CD. Lerdo, Durango, México. [ecastro@itslerdo.edu.mx](mailto:ecastro@itslerdo.edu.mx)

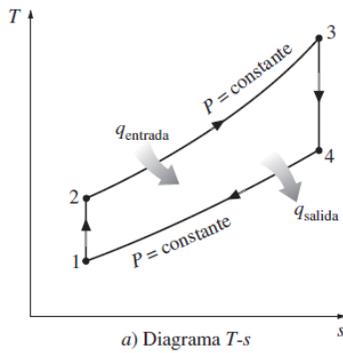


Fig. 3. Diagrama Temperatura-entropía [T-s]

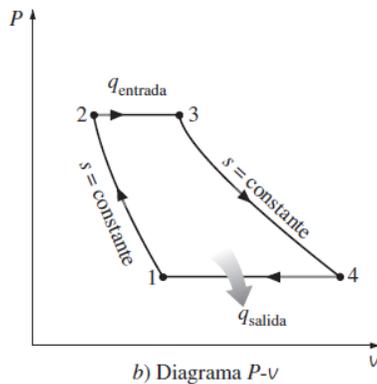


Fig. 4. Diagrama Presión - volumen específico [P-v].

En las máquinas de turbinas de gas la temperatura de los gases de escape que salen de la turbina suele ser considerablemente mayor que la del aire que sale

del compresor, lo cual representa una pérdida considerable de energía que se ve reflejada en la eficiencia del ciclo. Para mejorar esta situación se puede calentar el aire de alta presión que sale del compresor transfiriéndole calor desde los gases de escape calientes mediante un intercambiador de calor a contraflujo, el cual se conoce también como regenerador o recuperador.

El presente trabajo pretende ofrecer una herramienta para ver el comportamiento de la eficiencia del ciclo de la turbina de gas al

modificar las variables de funcionamiento, de una manera directa.

Un esquema de la máquina de turbina de gas que usa un regenerador, así como el diagrama T-s del nuevo ciclo se muestra en la figura 5 y 6 respectivamente.

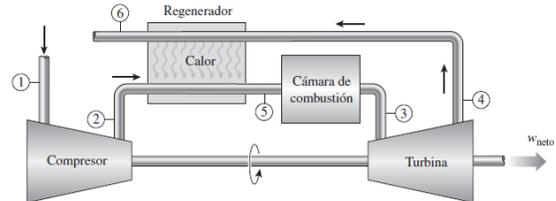


Fig. 5. Una máquina de turbina de gas con regenerador

Con lo anterior queda descrito el modelo del ciclo Brayton simple para su consideración en la programación del algoritmo en Matlab

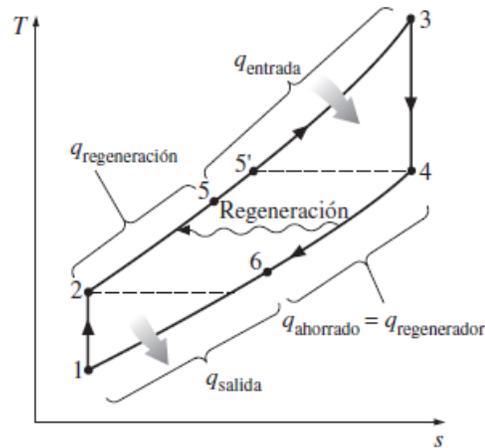


Fig. 6. Diagrama Temperatura-entropía [T-s] de un ciclo Brayton regenerativo

## II. PARTE TÉCNICA DEL ARTÍCULO

Desarrollo general del algoritmo del ciclo Brayton regenerativo

Las ecuaciones para desarrollar los procesos que conforman el ciclo Brayton simple son en general las siguientes:

La eficiencia es la relación entre el trabajo neto (kJ/kg) y el calor de entrada.

$$\eta = \frac{w_{neto}}{q_{entrada}} \times 100\% \quad (1)$$

En donde:

$$w_{neto} = q_i - q_o \quad (2)$$

También el trabajo neto  $w_{neto}$  se puede determinar como:

$$w_{neto} = w_{turbina} - w_{compresor} \quad (3)$$

donde:

$$w_{turbina} = h_3 - h_4 \quad (4)$$

$$w_{compresor} = h_2 - h_1 \quad (5)$$

El calor de entrada está definido por la diferencia de las entalpías a la entrada de la turbina y a la salida del compresor:

$$q_i = h_3 - h_2 [kJ/kg] \quad (6)$$

Y el calor de salida se describe como la diferencia de las entalpías a la salida de la turbina y a la entrada del compresor:

$$q_o = h_4 - h_1 [kJ/kg] \quad (7)$$

Por último, la potencia que entrega el ciclo queda determinado por:

$$\dot{w}_{neto} = \dot{m}w_{neto} \quad (8)$$

En donde  $\dot{m}$ , es el flujo másico de gases que pasan a través de la turbina y sus unidades están dadas en kg/s.

El alcance al que un regenerador se aproxima a un regenerador real se llama **eficacia o efectividad**

Considerando que el calor regenerativo real es igual a:

$$q_{reg\ real} = h_5 - h_2 \quad (9)$$

Y el calor regenerativo máximo a obtener:

$$q_{reg\ max} = h_4 - h_2 \quad (10)$$

El alcance que un regenerador pueda tener al aproximarse al ideal se puede considerar como eficacia o efectividad:

$$\epsilon = \frac{q_{reg\ real}}{q_{reg\ max}} = \frac{h_5 - h_2}{h_4 - h_2} \quad (11)$$

### III. RESULTADOS

Para describir el procedimiento general del algoritmo del ciclo Brayton regenerativo se utilizan se considerarán los siguientes datos:

Los datos considerados para el análisis se tomaron de los datos de una Turbina de Gas General Electric LM 2500, los cuales son : Temperatura ambiente  $T_A = 25^\circ C$ , relación de presión  $r_p = 22.5$ , Temperatura de salida  $T_o = 515^\circ C$ , flujo másico de aire  $\dot{m} = 87.2 \frac{kg}{s}$ , la eficiencia de la turbina y compresor 85%.

Con los resultados obtenidos del ciclo Brayton Simple utilizando la interfaz en MATLAB generada previo a este trabajo ideal se obtienen los valores de entalpia y presión relativa utilizando las propiedades del gas ideal del aire, los cuales se muestran en la tabla 1 y en la figura 7.

**Tabla 1. Entalpías y presiones relativas de un ciclo Brayton simple con las condiciones iniciales**

Estado	Temperatura(°C)	Entalpia(kjoul/kg)	Pr
1	25	298.18	1.3543
2	710.54	724.63	30.4717
3	1710.87	1893.47	1054.57
4	515	817.56	46.87

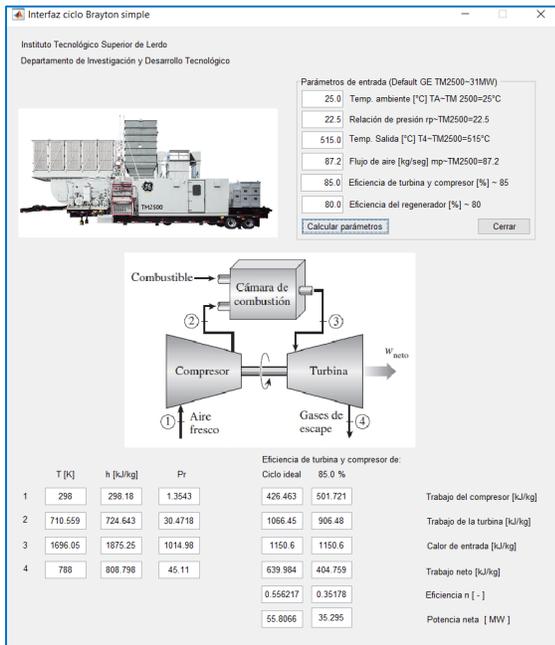


Fig. 7. Interfaz para el análisis del ciclo Brayton Simple

Analizando ahora el ciclo regenerativo, se considera una eficacia del regenerador del 80%. Se realizan los siguientes pasos para obtener la eficiencia del ciclo Brayton regenerativo:

Paso 1:

Despejando de (11),  $h_5$  se obtiene:

$$h_5 = \epsilon(h_4 - h_2) + h_2$$

$$h_5 = 0.8(817.56 - 724.63) + 724.63 = 798.97 \text{ kJoul/Kg}$$

Paso 2:

Con el valor de  $h_5$  se obtiene la temperatura 5 utilizando la tabla A-17

$$T_5 = 506 \text{ }^\circ\text{C} = 779 \text{ K}$$

Paso 3:

Considerando el balance de energía en el regenerador:

$$h_4 - h_6 = h_5 - h_2$$

Se despeja  $h_6$ :

$$h_6 = h_4 - h_5 + h_2 = 743.22 \text{ kJoul/kg}$$

Y finalmente con este valor utilizando la tabla A-17 se obtiene la temperatura 6

$$T_6 = 727.77 \text{ K} = 454.77 \text{ }^\circ\text{C}$$

Paso 4:

Es fácil observar que se reduce el calor de entrada y aunque el trabajo y la potencia siguen siendo los mismos valores, la eficiencia será mayor:

$$q_o = 1094.5 \text{ kJoul/kg}$$

Utilizando las ecuaciones (4),(5) y (3) respectivamente se obtiene el trabajo en el compresor y la turbina, además del trabajo neto:

$$w_{compresor} = h_2 - h_1 = 426.4515 \text{ kJoul/kg}$$

$$w_{turbina} = h_3 - h_4 = 1075.913 \text{ kJoul/kg}$$

Considerando la eficiencia del compresor y la turbina en 85 % entonces:

$$w_{compresor, real} = 426.45/0.85 = 501.7 \text{ kJoul/kg}$$

$$w_{turbina, real} = 1075.91(0.85) = 914.52 \text{ kJoul/kg}$$

$$w_{neto, real} = w_{turbina, real} - w_{compresor, real} = 412.82 \text{ kJoul/kg}$$

Paso 5:

Finalmente se obtiene la eficiencia con (1). Recuerde que la potencia y el trabajo neto sigue siendo el mismo valor, lo único que se modifica es el calor de entrada

$$\eta = \frac{w_{neto}}{q_{ent}} = \frac{412.82}{1094.5} = 37.71 \%$$

En este punto, es posible desarrollar interfaces con el software Matlab para obtener con rapidez y exactitud el estado que presenta una turbina de gas bajo los diferentes valores de las

variables que intervienen en el mismo. Un ejemplo de ésta aplicación puede observarse en la figura 8.

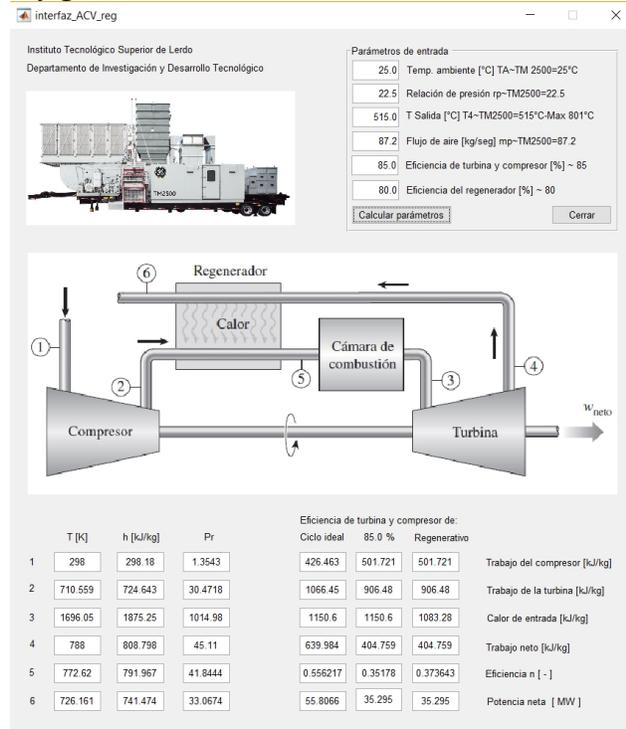


Fig. 8. Interfaz para el análisis del ciclo Brayton simple ideal, real y regenerativo

#### IV. DISCUSIÓN, CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES

Un área de oportunidad para aumentar la eficiencia del ciclo Brayton, bajo el cual funcionan las turbinas gas, es disminuir la temperatura del aire a la entrada del compresor, adicionalmente el utilizar un regenerador para recuperar la energía de los gases a la salida lleva consigo un aumento en la eficiencia del ciclo como se observa en la figura La utilización del software del MATLAB presenta las ventajas del lenguaje de programación en donde se pueden manejar directamente las matrices que se presenta en este proyecto, por ejemplo la gestión del algoritmo de interpolación lineal de la tabla A-17 lo que conlleva poder analizar diferentes

modelos de turbina de gas y sus condiciones que impactan la eficiencia de la misma

#### V. REFERENCIAS

[1] Álvarez J, Callejón I. (2005) "Máquinas Térmicas motoras", Alfa Omega, México, 1 Ed

[2] Cengel Y. Boles M. (2012) "Termodinámica", Mc Graw Hill, México, 7 Ed.

[3] Severns W. Degler H. Miles J. (2002) "Energía mediante vapor, aire o gas", Reverté, España, 5 Ed, 2002.

[4] Chapman S. (2013) "Mat lab programming with applications for engineers", Cengage Learning, USA, 1st Ed

[5] Tesis para obtener el grado de maestro en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica con especialidad en Potencia.  
Título: Modelado y simulación dinámica de esquemas de cogeneración.  
Presenta: Miguel Angel Otega Vázquez.  
Institución : Universidad Autonoma de Nuevo León , Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.  
Año: 2001

[6] Tesis para obtener el grado de Ingeniero Mecánico.  
Título: Desarrollo del programa BRAYTONPROG para el análisis termodinámico del ciclo Brayton con etapas.  
Presenta: Manuel de Jesús Velázquez Andrade.  
Institución : Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.  
Año: 2014

[7] Tesis para obtener el grado de Ingeniero Mecánico.  
Título: Modelado de un simulador de ciclos combinados y optimización de los niveles de presión de la turbina de vapor en la caldera de recuperación de calor.  
Presenta: Joaquin Corredoyra Alcaraz.  
Institución : Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales..  
Año: 2016

[8] Artículo: ANALISIS DE SENSIBILIDAD REALIZADO A UNA PLANTA DE CICLO COMBINADO  
Memorias de Congreso: Memorias del XVI Congreso Internacional Anual de la SOMIM.  
Fecha: 22 al 24 de septiembre, 2010  
Lugar: Monterrey, Nuevo León, México.

#### VI. BIOGRAFÍA



**Castro Juárez Ernesto II.** Peñon Blanco Durango, México. Ingeniero Industrial Mecánico. Instituto Tecnológico de la Laguna. Torreón, Coah. México (1994). Maestría en Ciencias de ingeniería Eléctrica Instituto Tecnológico de la Laguna. Torreón, Coah., México (1999).  
Docente de la División de Electromecánica y Posgrado en Mecatrónica del Instituto Tecnológico Superior de Lerdo, Cd. Lerdo. Durango, México.



**M.C. Noé Alvarado Tovar.** Nació en la Ciudad de Torreón, Coah. México el 11 de julio de 1978. Egresado del Instituto Tecnológico de la Laguna de la carrera de Ingeniería Electrónica en el año 2000. Obtuvo el grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica en el Centro de Graduados del Instituto Tecnológico de la

Laguna, ubicado en la ciudad de Torreón, Coah. México, en el año de 2006, en la especialidad en Control de Robots Manipuladores. Actualmente está en la etapa final de sus estudios de doctorado en la Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España. Actualmente labora en el Instituto Tecnológico Superior de Lerdo, desempeñado el puesto de Investigador-Docente, en el Departamento de Investigación y Desarrollo Tecnológico y en la División de Ingeniería Electrónica respectivamente, el instituto se encuentra ubicado en la ciudad de Lerdo, Dgo. México. Cuenta con experiencia profesional en el ramo de la automatización industrial, robótica, control electrónico. Sus actuales líneas de investigación incluyen: Mecatrónica, robótica, automatización industrial, control de movimiento, comunicaciones industriales y electrónica de control y de potencia.



**Diego Alberto Román Landeros** nacido en Gómez Palacio Durango el 9 de junio de 1990. Actualmente realiza un estudio de posgrado en Especialización en Ingeniería Mecatrónica en el Instituto Tecnológico Superior de Lerdo en la ciudad Lerdo Durango, México.

El actualmente trabaja en el Instituto Tecnológico Superior de Lerdo localizado en la ciudad de Lerdo Durango, México como Docente e investigador, teniendo como temas de interés el control electrónico de sistemas, la automatización y la mecatrónica en el ramo automotriz.