

## BALANCE TÉRMICO DEL CICLO COMBINADO DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE LA CENTRAL TERMOELÉCTRICA DE SAN NICOLÁS (AES PARANÁ)

Néstor Fabián Reina<sup>1</sup>, Raúl Daniel López<sup>2</sup>, Carlos Chongo<sup>3</sup>, Christian Bruni<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional San Nicolás.  
Departamento de Ingeniería Mecánica.

Colón 332 – (2900) San Nicolás – Buenos Aires – Argentina e-mail: [nreina@frsn.utn.edu.ar](mailto:nreina@frsn.utn.edu.ar)

<sup>2</sup> Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional San Nicolás.  
Departamento de Ingeniería Mecánica.

Colón 332 – (2900) San Nicolás – Buenos Aires – Argentina – e-mail: [rdlopez@frsn.utn.edu.ar](mailto:rdlopez@frsn.utn.edu.ar)

<sup>3</sup> Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional San Nicolás.  
Departamento de Ingeniería Mecánica.

Colón 332 – (2900) San Nicolás – Buenos Aires – Argentina – e-mail: [carlos.chongo@aes.com](mailto:carlos.chongo@aes.com)

<sup>4</sup> Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional San Nicolás.  
Departamento de Ingeniería Mecánica.

Colón 332 – (2900) San Nicolás – Buenos Aires – Argentina – e-mail: [cbruni@frsn.utn.edu.ar](mailto:cbruni@frsn.utn.edu.ar)

### RESUMEN

La crisis energética que atraviesa nuestro país, tanto en disponibilidad de recursos naturales (gas natural y petróleo) como en capacidad instalada para la generación de energía eléctrica, promueve a plantear trabajos de este tipo.

El presente estudio fue realizado sobre el Ciclo Combinado de generación de energía eléctrica que posee AES PARANÁ en la planta de San Nicolás (Buenos Aires), la cual genera alrededor del 10% de la energía eléctrica total del país. Este Ciclo Combinado fue diseñado y provisto por Mitsubishi, y opera desde el año 2002. Está compuesto por dos turbinas de gas clase 701F de 260 MW cada una, y sus salidas de escape se conectan a dos calderas de recuperación. Estas cuentan con tres domos, en los cuales se produce vapor de alta presión, media presión y baja presión, cada uno de ellos con una etapa de sobrecalentamiento. A la salida de las calderas se unen los tubos colectores a un solo tubo (uno por cada presión) los cuales terminan en una turbina de vapor de 320 MW. Luego, el vapor de salida del ciclo se condensa en un condensador del tipo de tubos.

En el estudio se trazaron los siguientes objetivos:

- Ver como se distribuye la energía desarrollada por el combustible (calor) a través de cada etapa del ciclo.
- Obtener el rendimiento energético del Ciclo Combinado bajo condiciones reales de funcionamiento.
- Calcular los rendimientos energéticos de los ciclos individuales de gas y de vapor dentro del Ciclo Combinado.
- Visualizar la incidencia del aumento de presión diferencial en los filtros de aire de entrada al ciclo de gas del Ciclo Combinado, sobre el rendimiento energético del mismo.
- Representar el efecto que provoca la temperatura del aire ambiente sobre el rendimiento energético del Ciclo Combinado.

Palabras claves: caldera, turbina, vapor, generación energía eléctrica, ciclo combinado.

## **1- INTRODUCCIÓN**

La crisis energética que atraviesa el país, tanto en disponibilidad de recursos naturales (gas natural y petróleo) como en capacidad instalada para la generación de energía eléctrica, promueve a plantear trabajos de este tipo. Estos deben generar alternativas dirigidas a la mejora de la relación, unidad de energía eléctrica generada versus unidad de recursos no renovables consumida.

### **1.1 - Objetivo**

El presente estudio fue realizado sobre el Ciclo Combinado de generación de energía eléctrica que posee AES PARANÁ en la planta de San Nicolás (Buenos Aires), la cual genera alrededor del 10% de la energía eléctrica total consumida en el país. Este Ciclo Combinado está compuesto básicamente por dos Ciclos de Gas con Turbinas de 260 MW cada uno y dos Ciclos de Vapor con una única Turbina de Vapor de 320 MW.

Todos los cálculos se realizaron partiendo de datos (temperaturas, caudales, presiones, etc.) reales del proceso, es decir que fueron relevados en condiciones de normal funcionamiento de la Planta.

En el estudio se trazaron los siguientes objetivos:

- Ver como se distribuye la energía desarrollada por el combustible (calor) a través de cada etapa del Ciclo Combinado.
- Calcular los rendimientos energéticos de los ciclos individuales de Gas y de Vapor dentro del Ciclo Combinado.
- Obtener el rendimiento energético del Ciclo Combinado bajo condiciones reales de funcionamiento.
- Visualizar la incidencia del aumento de presión diferencial en los filtros de aire de entrada al Ciclo de Gas del Ciclo Combinado, sobre el rendimiento energético del mismo.
- Representar el efecto que provoca la temperatura del aire ambiente sobre el rendimiento energético del Ciclo Combinado.

## **2- ANÁLISIS**

### **2.1 – Introducción:**

En términos generales, un **Ciclo Combinado** consiste en el acoplamiento de dos ciclos diferentes de producción de energía eléctrica, uno de **Turbina a Gas** y otro de **Turbina de Vapor** de forma tal que la energía calórica no utilizada por uno de ellos se emplea como fuente de calor en el otro. De esta forma, los gases calientes de escape de la **Turbina de Gas** entregan la energía necesaria para el funcionamiento del **Ciclo de Vapor** acoplado.

Si bien existen distintos tipos de configuraciones de **Ciclos Combinados**, el que se estudia en el presente trabajo es del tipo **Ciclo Combinado con Caldera de Recuperación**. Su ventaja fundamental es el mayor control de la temperatura y presión de los gases de combustión

(logrado mediante exceso de aire comburente) y como desventaja es que debe trabajar con combustibles de alta calidad tanto líquido (gas oil) como gaseoso (gas natural).

A continuación, la Figura 1, muestra en forma esquemática el layout de la instalación.

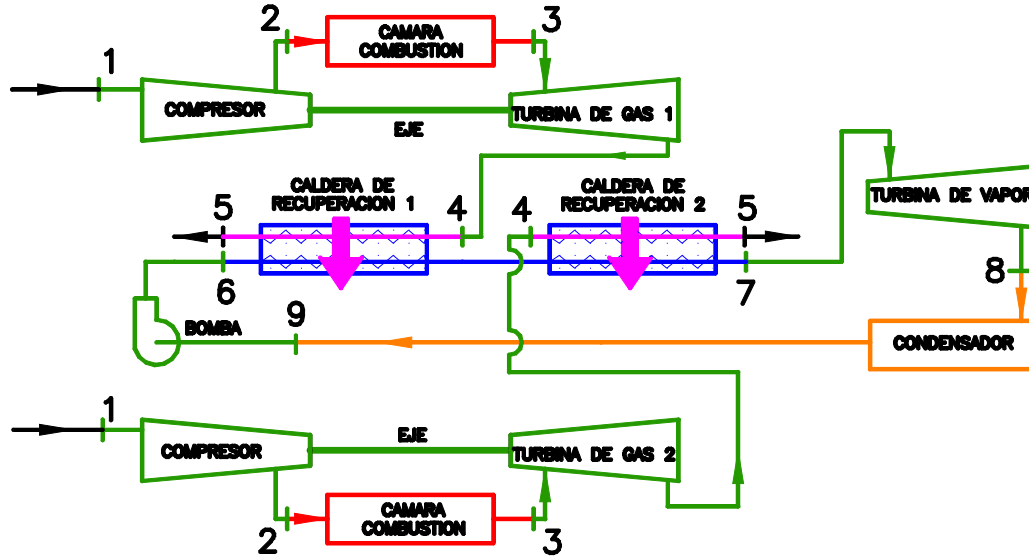


Figura 1 – Esquema básico de la instalación del Ciclo Combinado AES PARANÁ.

En la Figura 2 se visualizan, en un diagrama T-S los ciclos tanto de gas como de vapor. Se puede apreciar el aprovechamiento del calor no utilizado (exergía) por el Ciclo de Gas en el Ciclo de Vapor (transformación 4-5).

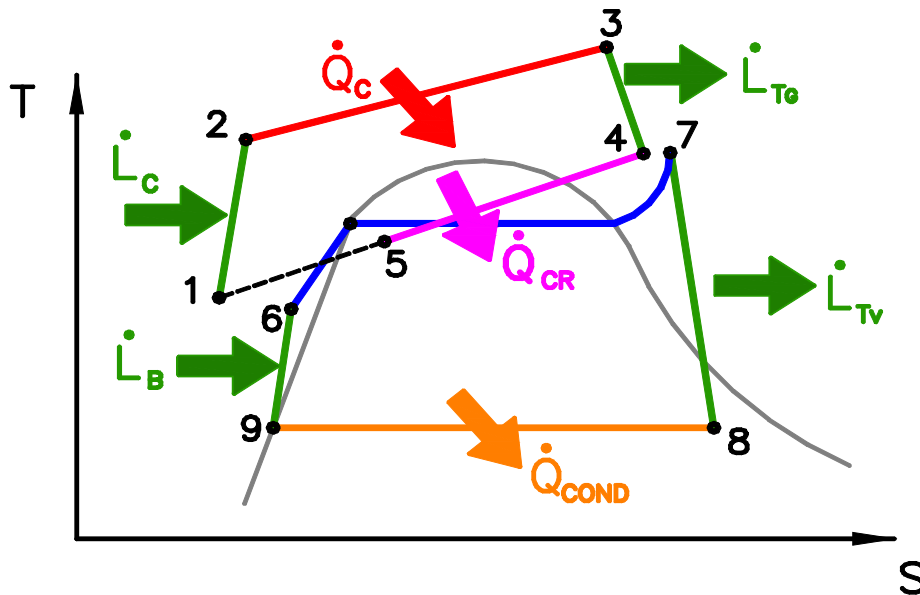


Figura 2 – Diagrama T-S del Ciclo Combinado.

## 2.2 - Descripción del Proceso

El ciclo comienza con la aspiración de aire desde el medio ambiente, siendo conducido éste al **Compresor**, previo paso por un sistema de **Filtros** del tipo “canasto” que tiene como fin eliminar las impurezas del aire aspirado. El **Compresor** es del tipo axial ya que la corriente de aire fluye de forma paralela al eje de rotación, a través de una serie de etapas consistente cada una de ellas en un grupo de alabes giratorios de un rotor y los alabes fijos de un estator. Cada etapa funciona incrementando la velocidad de flujo a través de los alabes giratorios y produciendo después la difusión, o sea, desaceleración del aire para elevar la presión a través de los alabes fijos. Este tipo de **Compresor**, además de brindar el aire necesario para el proceso de combustión, suministra también el aire para refrigerar las piezas calientes de la **Turbina a Gas**, que están expuestas a los gases combustionados.

Una vez comprimido el aire, se mezcla con combustible atomizado (Gas Natural o Gasoil) en una cámara donde se realiza la combustión (**Cámara de Combustión**). Ésta consiste en una serie de quemadores o tubos de llama, denominados así por estar en contacto directo con la combustión. Estos tubos están espaciados uniformemente alrededor del eje que une el compresor con la **Turbina a Gas**, a su vez existe una cáscara anular que envuelve a estos tubos de llama a través de la cual llega el aire necesario para la combustión.

El sistema de inyección de combustible es individual para cada quemador. Para lograr el correcto premezclado del combustible con el aire y aumentar así la estabilidad de la llama el sistema funciona con exceso de aire. La instalación cuenta con un total de veinte **Cámaras de Combustión**.

El resultado de esta combustión, es un flujo de gases calientes, que al expandirse hacen girar la **Turbina de Gas** proporcionando trabajo mecánico. Este equipo esta formado por una serie de etapas consistente cada una de ellas, en un grupo de alabes fijos seguido por un grupo de alabes móviles; en cada una de estas etapas se transforma la energía cinética de los gases que dejan la **Cámara de Combustión** en energía mecánica utilizada para arrastrar el **Generador de Energía Eléctrica** y el **Compresor**. La **Turbina de Gas** empleada, clase 701F de 260 MW, es del tipo acción - reacción, donde la expansión del gas se produce tanto en los alabes fijos o toberas, como en los alabes móviles del rotor. La velocidad de rotación del rotor es del orden de las 3000 rpm.

Los gases de escape que salen de la **Turbina de Gas** pasan a la **Caldera de Recuperación**, a través del **Ducto de Transición**. En este, se encuentran ubicados cuatro **Quemadores** de gas natural cuya función es, aprovechando el exceso de aire que poseen los gases de combustión a la salida de la **Turbina de Gas**, aumentar la temperatura de los gases que circulan hasta el ingreso a la **Caldera de Recuperación**, de manera de conseguir un aumento en el rendimiento de la instalación.

La **Caldera de Recuperación** tiene como objetivo producir vapor de agua. Utiliza para ello parte de la exergía (calor utilizable) de los gases de escape de la Turbina a Gas y el calor auxiliar entregado por los **Quemadores** en el **Ducto de Transición**. El **Sistema de**

**Generación de Vapor** comienza en la **Bomba de Agua Condensada** donde se eleva la presión de la misma. Luego, el agua, pasa por los **Precalentadores** y **Economizadores** y llega a los **Evaporadores** que son los equipos donde se produce la evaporación. El sistema cuenta con tres circuitos diferentes con distintas presiones de vapor, Alta, Media y Baja Presión.

El vapor generado en la **Caldera** antes mencionada, se expande en la **Turbina de Vapor**. Ésta, es una máquina que convierte la energía térmica contenida en el vapor en trabajo mecánico. Para lograrlo la energía térmica del vapor, se convierte primeramente en energía cinética, o de velocidad, por medio de la expansión del mismo desde una presión alta a otra mas baja. Esta transformación se lleva a cabo en las **Toberas**, que además direccionan el chorro de vapor hacia los alabes móviles. En éstos, al chocar el chorro de vapor, se provoca el giro del eje del rotor que los contiene. Esta combinación es una de las etapas que contribuyen al trabajo mecánico final obtenido en el eje de la **Turbina de Vapor**.

El trabajo mecánico antes mencionado es transformado en energía eléctrica mediante el **Generador de Energía Eléctrica**, del tipo sincrónico, acoplado a la **Turbina de Vapor**.

El vapor que sale de la **Turbina de Vapor** ingresa al **Condensador** donde se lo transforma al estado líquido saturado. Básicamente éste, es un intercambiador de calor en donde el vapor pasa al estado líquido al circular por una serie de tubos refrigerados en su exterior por agua de río. El circuito de agua de refrigeración es abierto. Su principal función es aumentar el rendimiento del **Ciclo de Vapor** ya que disminuye la temperatura y la presión final del vapor a través del vacío generado en el mismo. Otra ventaja es la recuperación del vapor que al ser condensado, se transforma en una fuente de abastecimiento de agua de alimentación de buena calidad y manteniendo el circuito de agua-vapor limpio y libre de impurezas y oxígeno.

Posteriormente el agua pasa a un **Desaireador** de agua de alimentación y luego, a través de **Bombas**, ingresa nuevamente a la **Caldera de Recuperación** para reiniciar el ciclo.

### 2.3 – Desarrollo

El estudio se desarrolla de la siguiente manera:

- **Estudio del Ciclo de Turbina de Gas:** Esto comprende la realización del balance térmico y cálculo del rendimiento energético del mismo.
- **Estudio del Ciclo de Turbina de Vapor:** Igual que en el caso anterior, se realiza el balance térmico del ciclo y la determinación del rendimiento energético.
- **Estudio del Ciclo Combinado:** Además del cálculo del rendimiento energético del ciclo, se llevó a cabo el estudio de la incidencia que tienen sobre el mismo, tanto el aumento de presión diferencial en los filtros de aire como la temperatura del aire ambiente.

#### 2.3.1 – Estudio del Ciclo de Turbina de Gas:

En la Tabla 1, se muestran los resultados obtenidos del balance térmico de uno de los dos Ciclos de Gas del Ciclo Combinado. Debe hacerse la salvedad, que el estudio contempla como idénticos a los dos Ciclos de Gas, del Ciclo Combinado.

Tabla 1 - Valores e incidencia de la distribución de energía calórica para uno de los dos Ciclos de Gas.

	Denominación del sistema	Descripción	Potencia	
			Valor	%
Aporte	1 <b>Calor generado por el Combustible</b>	El producto del Poder Calorífico por unidad de peso del combustible (GN) por el consumo del mismo, en la misma unidad.	<b>726,24 MW</b>	<b>100%</b>
Distribución del Calor Generado	2 <b>Potencia entregada por la turbina de gas</b>	Potencia mecánica neta en el eje de la Turbina de Gas, descontada la consumida en el Compresor en el proceso de compresión.	<b>276,34 MW</b>	<b>38,05%</b>
	3 <b>Calor remanente en los gases de escape</b>	Los gases de escape (O <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> y CO) elevan su temperatura, desde la del ambiente a la de salida por la chimenea.	<b>443,19 MW</b>	<b>61,03%</b>
	4 <b>Perdidas de calor</b>	Por convección y radiación entre la carcasa de la máquina y el medio ambiente.	<b>6,7 MW</b>	<b>0,92%</b>

La Figura 3 muestra, en valores porcentuales, como se distribuye la energía calórica en el Ciclo de Gas dentro de Ciclo Combinado.

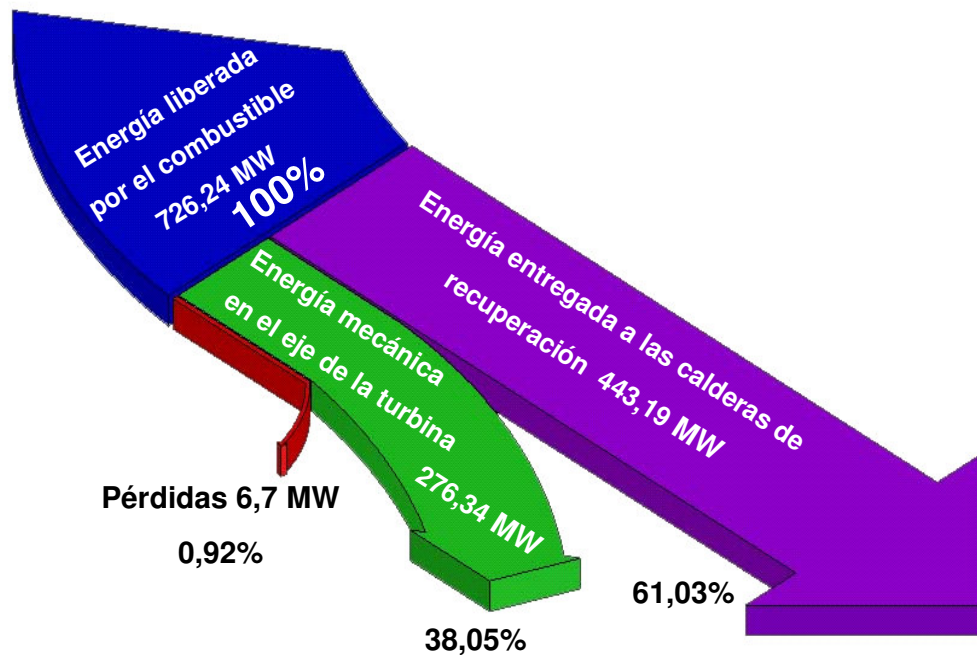


Figura 3 - Valores porcentuales de energía calórica en el Ciclo de Gas del Ciclo Combinado.

**2.3.2 – Estudio del Ciclo de Turbina de Vapor:**

Para los cálculos, se consideró que toda la energía retenida por el vapor al momento de expandirse en la Turbina de Vapor fue aportada, en partes iguales, por cada uno de los Ciclos de Gas. Otra consideración muy importante es que, al momento de realizarse el estudio, el Ciclo Combinado se hallaba trabajando sin los **Quemadores de Ducto** en funcionamiento (sin aporte de energía calórica).

En la Tabla 2 se muestran los resultados obtenidos, para la distribución de la energía calórica en las dos Calderas de Recuperación. Estas son las que generan el vapor, necesario para el Ciclo de Vapor del Ciclo Combinado.

Tabla 2 - Valores e incidencia en la distribución de energía calórica en el Ciclo de Vapor.

	Denominación del sistema	Descripción	Potencia		
			Valor	%	
Aporte	1	<b>Energía entregada a las Calderas de Recuperación</b> Es el calor remanente (exergía) de los gases de escape de las dos Turbinas de Gas. Aportan la energía para transformar el agua en vapor en las dos Calderas de Recuperación.	<b>886,38 MW</b>	<b>100%</b>	
	Distribución de la Potencia Calórica Generada	2	<b>Energía absorbida por el agua en las dos Calderas</b> Es la Potencia calórica consumida por el agua para pasar del estado líquido saturado a vapor sobrecalentado. Aquí comienza el ciclo Rankine.	<b>652,4MW</b>	<b>73.6%</b>
		3	<b>Energía perdida por las chimeneas</b> Son los gases calientes provenientes del Ciclo de Gas que, luego de entregar parte de su energía en las Calderas de Recuperación, se escapan por las chimeneas.	<b>227,7MW</b>	<b>25,7%</b>
		4	<b>Energía perdida en las Calderas</b> Es la energía calórica transferida al medio ambiente, por convección y radiación.	<b>6,28 MW</b>	<b>0.70%</b>
		5	<b>Energía absorbida por el condensador</b> Es la energía que el vapor cede al agua de refrigeración (del río Paraná), para pasar al estado líquido saturado en el condensador. Por lo tanto esta energía es de pérdida.	<b>327,68 MW</b>	<b>37%</b>
		6	<b>Energía mecánica en el eje de la Turbina de Vapor</b> El vapor al ingresar a las distintas etapas de la Turbina de Vapor, se expande a través de los alabes de la misma, transformado su energía térmica en energía mecánica en el eje de la misma.	<b>324,71 MW</b>	<b><u>36.6%</u></b>

La Figura 4 muestra, en valores porcentuales, como se distribuye la energía calórica en el Ciclo de Vapor del Ciclo Combinado.

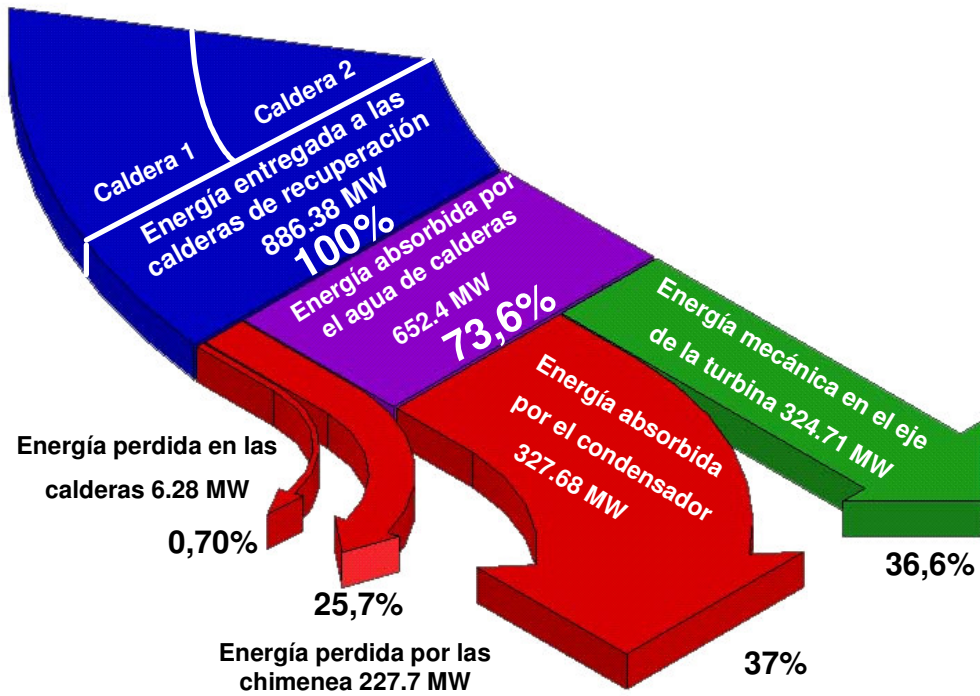


Figura 4 - Valores porcentuales del flujo-grama de energía calórica en el Ciclo de Vapor del Ciclo Combinado.

### 2.3.3 – Estudio del Ciclo Combinado:

En la Tabla 3 se muestran los resultados obtenidos del estudio del aprovechamiento de la potencia calórica del combustible (Gas Natural) en el Ciclo Combinado.

Tabla 3 – Resultado del Balance energético del Ciclo Combinado.

	Denominación del sistema	Descripción	Potencia		
			Valor	%	
Aporte	1	Calor generado por el Combustible	Potencia entregada al Ciclo Combinado en los dos Ciclos de Gas (Cámara de Combustión).	1452,48 MW	100%
Potencia mecánica	2	Energía mecánica Turbinas de Gas	Energía mecánica neta en los ejes de la Turbinas de Gas.	552,68 MW	38,05%
	3	Energía mecánica Turbina de Vapor	Energía mecánica en el eje de la Turbina de Vapor.	324,71 MW	22,35 %
<b><u>Rendimiento del Ciclo Combinado</u></b>				<b><u>60,4%</u></b>	

En la Figura 5 se aprecian los resultados porcentuales obtenidos del estudio de la distribución de la energía calórica en el Ciclo Combinado.

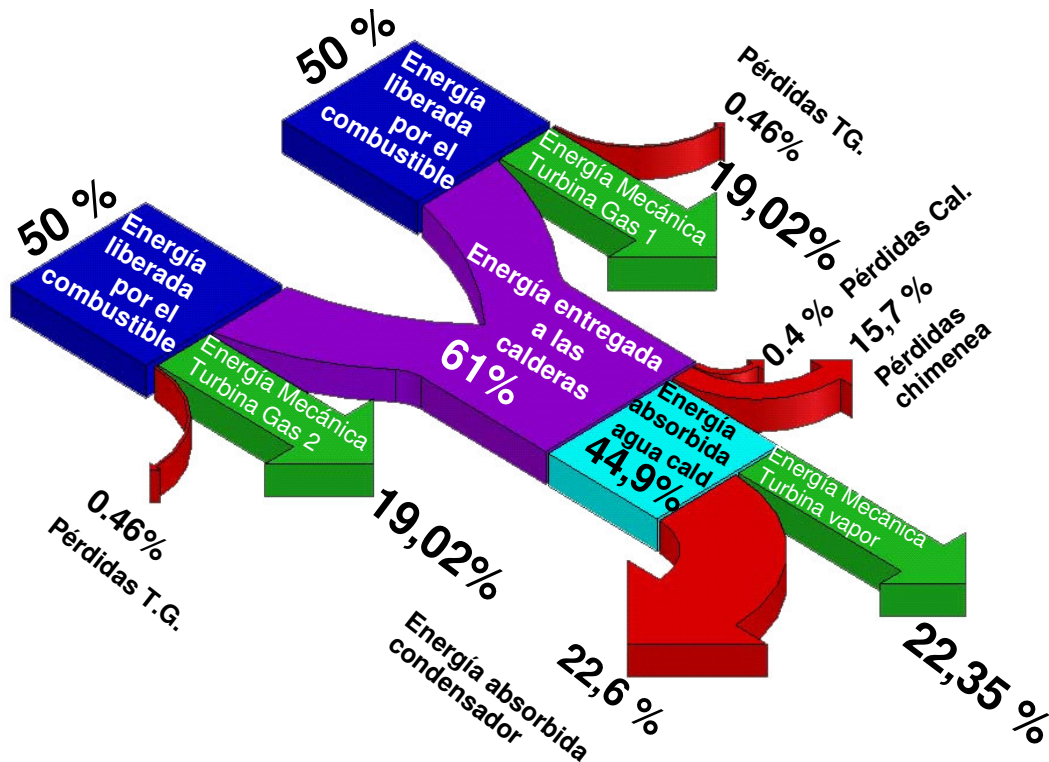


Figura 5 - Valores porcentuales del flujo-grama de energía calórica del Ciclo Combinado.

### 2.3.3.1 – Estudio de la incidencia del aumento de presión diferencial en los filtros de aire:

Este fenómeno se debe al aumento de la dificultad del pasaje del aire a través de los filtros de entrada de aire al Ciclo de Gas. Se produce entonces, una disminución en la presión de succión de aire en el ducto posterior a los filtros y por lo tanto la relación de compresión del Compresor del Ciclo de Gas aumenta. Debido a que la temperatura de descarga en el Compresor es directamente proporcional a la relación de compresión, por lo tanto esta también aumenta. El trabajo mecánico que el Compresor requiere para llevar a cabo la compresión del aire en el Ciclo de Gas lo entrega la Turbina de Gas. Este trabajo, está definido por la diferencias de entalpías del aire en la entrada y salida del proceso de compresión. La entalpía de salida del aire del compresor se ve incrementada, ya que es directamente proporcional a la temperatura del mismo, la cual se incrementó por el aumento de la relación de compresión. Entonces el trabajo mecánico que consume el Compresor se aumenta por lo antes mencionado, con la consecuente disminución del rendimiento energético del Ciclo Combinado.

La Figura 6 muestra la disminución de potencia del Generador de Energía Eléctrica del Ciclo de Gas, causada por el ensuciamiento de los Filtros de entrada de aire al Ciclo de Gas.

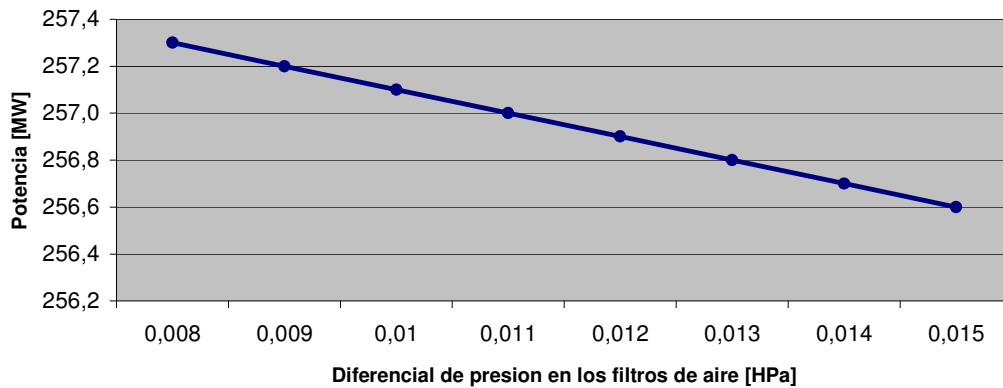


Figura 6 – Pérdidas de potencia por ensuciamiento de los filtros.

### 2.3.3.2 – Estudio de la incidencia de la variación de la temperatura ambiente sobre el rendimiento de Ciclo Combinado:

El trabajo desarrollado por la Turbina de Gas, es directamente proporcional a la relación entre las temperaturas de salida y entrada de los gases de combustión en la misma. Cuando la temperatura de entrada de los gases a la Turbina aumenta, la relación de temperaturas antes mencionada, disminuirá y en consecuencia se reducirá también el trabajo mecánico desarrollado por la Turbina de Gas.

Una misma Turbina de Gas funciona con mejor rendimiento en países de clima frío que en países de clima cálidos y en invierno mejor que en verano.

En la Figura 7 se pueden ver valores reales de potencia en la salida del Generador de la Turbina de Gas en función de la temperatura ambiente. Se puede ver como a medida que aumenta la temperatura ambiente la potencia entregada al Generador de Energía Eléctrica disminuye por lo antes expresado.

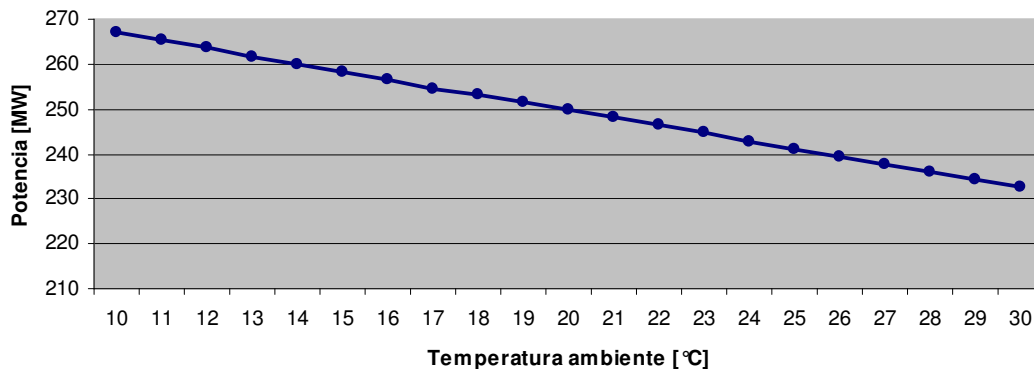


Figura 7 – Influencia de la temperatura ambiente en la potencia entregada en el generador.

### 3- CONCLUSIONES

- La conclusión fundamental del presente trabajo radica en poder visualizar la ventaja que posee el **Ciclo Combinado**, respecto de los Ciclos Clásicos (de Vapor), para la generación de energía eléctrica. El rendimiento, en general, para un Ciclo Clásico (de Vapor) se encuentra alrededor del 40%, mientras que para el **Ciclo Combinado** estudiado (AES PARANÁ) el mismo fue del **60.4%**. Esta diferencia de rendimientos se traduce en ahorro de combustible en la generación de energía eléctrica bajo un sistema (Ciclo Combinado) respecto del otro (Ciclo de Vapor).
- Otra conclusión importante obtenida del estudio, es la implicancia que tiene la temperatura ambiente en el Ciclo de Gas del Ciclo Combinado. Esto es, en invierno (con temperaturas promedios de 10°C) la potencia eléctrica que entrega cada uno de los Generadores de Energía Eléctrica del Ciclo de Gas es aproximadamente un 15% mayor a la que entrega en verano (con temperaturas promedio de 30°C). Esto implica una disminución sustancial del rendimiento del Ciclo Combinado.

### 4- REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] John W Sawyer; David Japikse, Sawyer's Gas Turbine Engineering Handbook, Norwalk, Conn., USA: Turbomachinery International Publications, 1985.
- [2] Meherman P.Boyce; Gas Turbine Engineering Handbook Second Edition, Butterworth-Heinemann, 2002.
- [3] Chapters 28 And 29 Of Ashrae Handbook- Applications 2003.
- [4] Rolf Kehlhofer, Combined Cycle Gas & Steam Turbine Power Plants, Penn Well Publishing Company, 1997.
- [5] Kenneth Wark – Donald E. Richards, Termodinámica, Mcgraw Hill, 6º Edición, (2004).
- [6] Yunus A Çengel – Michael A. Boles, Termodinámica, Mcgraw Hill, 4º Edición, (2004).
- [7] Virgil Moring Faires – Clifford Max Simmang, Termodinámica, Limusa, 7º Edición, (2001).
- [8] James R. Welty - Charles E. Wicks - Robert E. Wilson, Fundamentos De Transferencia De Momento, Calor Y Masa, Noriega Limusa (Noriega Editores), 1º Edición, (1991).

### 5- ACLARACIONES Y RECONOCIMIENTOS

El presente trabajo, para el Primer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica a desarrollarse los días 1, 2 y 3 de Octubre de 2008 en la Universidad del Sur de Bahía Blanca, fue realizado por alumnos de 5º año de Ingeniería Mecánica de la Facultad Regional San Nicolás – UTN y bajo el control y tutela de los responsables de la Cátedra SISTEMAS DE CONTROL EN INSTALACIONES TÉRMICAS.

Los autores, agradecen a la empresa AES PARANÁ y al Ing. Neoren German Franco, Jefe de Departamento de Mecánica de la Facultad Regional San Nicolás - UTN, por el apoyo brindado.