

# **Sistema de agua nebulizada para mejorar el rendimiento de la turbina de gas (Unidad 5) del Ciclo Combinado DPP**

Rafael Espaillat  
Maestría en Ingeniería Gerencial  
Héctor J. Cruzado  
Escuela Graduada  
Polytechnic University of Puerto Rico

**Resumen** — En este artículo se analiza el efecto de reducir la temperatura del aire en la entrada de la turbina de gas (Unidad V) del Ciclo Combinado DPP, ubicado en el sector de Los Mina de Santo Domingo, mediante el uso de un Sistema de Agua Nebulizada. La Temperatura del aire en el Inlet de las turbinas de gas tiene un impacto significativo en su potencia de salida. Los resultados obtenidos muestran que utilizando este método de enfriamiento se puede conseguir hasta un 4.6% de incremento en la potencia, lo que representa 5.2 MW adicionales. Con este incremento, el periodo de recuperación de la inversión es de 1.44 años y la Tasa Interna de Retorno de 90% lo que lo convierte en un proyecto muy favorable para inversión.

**Términos claves** — Temperatura de Bulbo Húmedo, Temperatura de Bulbo Seco, potencia eléctrica, humedad relativa.

## **INTRODUCCIÓN**

La central de generación eléctrica DPP, ubicada en el sector de Los Mina de Santo Domingo, consiste en un Ciclo Combinado compuesto de dos turbinas de gas de 105 MW cada una y una turbina de vapor de 110 MW. En el caso particular de las turbinas de gas, debido a sus características termodinámicas, tienen una relación proporcional entre la potencia que pueden entregar y la temperatura del aire ambiente que entra al compresor de la turbina. Gracias a esta relación entre potencia y temperatura, a través de los años se han desarrollado métodos para reducir la temperatura del aire que entra al compresor y de esta forma aumentar la potencia que entrega la turbina de gas.

El objetivo del presente proyecto es demostrar que se puede obtener un incremento de 4% de la potencia de salida utilizando un Sistema Agua

Nebulizada para reducir la temperatura del aire que entra en unas de las turbinas de gas del ciclo combinado DPP (Unidad V).

En la primera sección se muestra un marco teórico para definir las turbinas de gas y el Sistema de Agua Nebulizada. Luego se detallan los componentes del sistema. Finalmente, en las últimas dos secciones se presentan el análisis de los datos recopilados en la Unidad V durante el año 2020 y los resultados obtenidos.

## **MARCO TEÓRICO**

### **Turbinas de gas**

Una turbina de gas es una máquina rotativa que tiene la finalidad de convertir la energía química de un combustible fósil en energía mecánica. En el caso de las centrales de generación de electricidad, al eje de la turbina se le acopla un generador eléctrico para convertir esta energía mecánica en energía eléctrica.

Como se ve en la Figura 1, los componentes principales de una turbina de gas son el compresor, la cámara de combustión, la turbina y el generador eléctrico. De estos componentes, el principal es el compresor que se encarga de comprimir el aire del medio ambiente. Esto es necesario para la combustión del combustible y el enfriamiento de la turbina.

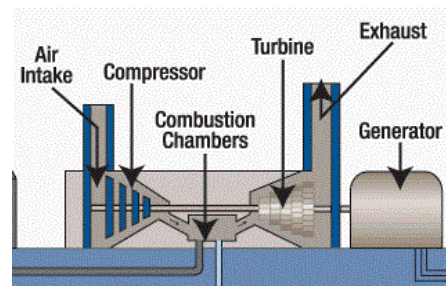


Figura 1

Componentes de una turbina de gas [1]

“La temperatura del medio ambiente tiene un efecto significativo en el desempeño de las turbinas de gas. La potencia, el calor de entrada, el flujo y la temperatura de los gases de escape son funciones de la temperatura del aire en la entrada del compresor” [2]. En la Figura 2 se muestra la relación entre potencia y temperatura ambiente de una turbina de gas modelo Westinghouse W501D que es el modelo de la Unidad V.

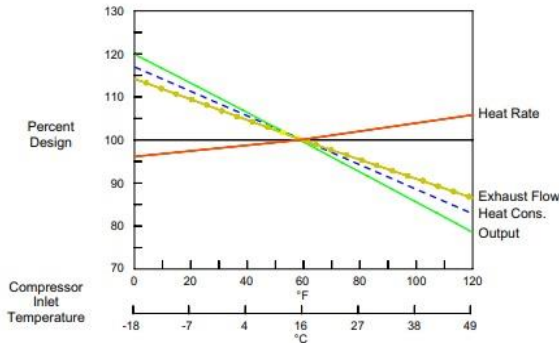


Figura 2

Relación entre temperatura ambiente, potencia, rendimiento térmico y flujo de gases en una turbina de gas W501D [3]

### Sistema de Agua Nebulizada

En las turbinas de gas, un Sistema de Agua Nebulizada se utiliza con la finalidad de reducir la temperatura del aire del medio ambiente que entra al compresor de la turbina. Esto se logra mediante una inyección de agua a través de pequeñas boquillas que se instalan en el Inlet del compresor. La temperatura del aire se reduce cuando entra en contacto con el agua porque el agua tiene una temperatura menor. “Calor sensible del aire se transfiere al agua, convirtiéndose en calor latente en la medida que el agua se evapora. El vapor de agua se vuelve parte del aire y arrastra el calor latente con él. La temperatura de bulbo seco del aire se reduce debido a que cede calor sensible” [4]. La temperatura de bulbo seco del aire se reduce hasta que alcanza la temperatura de bulbo húmedo.

Las ventajas que tiene el Sistema de Agua Nebulizada frente a otros sistemas para mejorar el rendimiento de las turbinas de gas son su relativo bajo costo y facilidad de mantenimiento, y que su instalación no requiere hacer grandes

modificaciones en la estructura de la planta de generación. El costo de instalación de un Sistema de Agua Nebulizada es aproximadamente una tercera parte del sistema que le sigue en costo en el mercado [5].

### COMPONENTES DEL SISTEMA DE AGUA NEBULIZADA PROPUESTO

EL sistema se compone de un arreglo de 8 a 10 bombas para elevar la presión del agua, una red de tuberías para la conexión de las bombas con el tanque de agua desmineralizada, tuberías para las descargas de las bombas, un PLC con un HMI para el control de las bombas, y las boquillas que nebulizan el agua. El Diagrama de flujo del sistema se muestra en la Figura 3. El tanque de agua desmineralizada y la planta de tratamiento de agua ya existen en la central de generación.

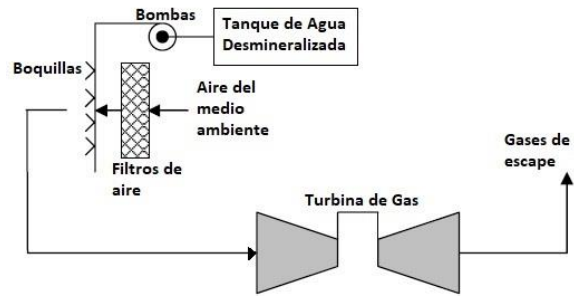


Figura 3

Diagrama de flujo del Sistema propuesto

El *Programmable Logic Controller* (PLC) del sistema usa la medición de sensores de humedad relativa y de la temperatura de bulbo seco del aire para calcular la temperatura de bulbo húmedo y el potencial de enfriamiento (diferencia entre la temperatura de bulbo seco y la temperatura de bulbo húmedo). Con estos datos, el Sistema determina la cantidad de bombas que deben estar en servicio para lograr el enfriamiento calculado [6].

### ANÁLISIS DE DATOS

Para estudiar la viabilidad de la instalación del Sistema de Agua Nebulizada en la Unidad V, se compilaron los datos de humedad relativa y

temperatura de bulbo seco durante todo el año 2020, y a partir de estos datos se calculó la temperatura de bulbo húmedo para el mismo periodo de tiempo.

Con estos tres parámetros definidos y utilizando (1), asumiendo una eficiencia del sistema de enfriamiento de un 95%, se obtuvo la temperatura final que se puede conseguir con el Sistema de Agua Nebulizada [4].

$$T_{DB2} = T_{DB1} - (N / 100\%) (T_{DB1} - T_{WB}) \quad (1)$$

Donde  $T_{DB2}$  es la temperatura por conseguir,  $N$  es la eficiencia del sistema de enfriamiento,  $T_{DB1}$  es la temperatura de bulbo seco del aire, y  $T_{WB}$  la temperatura de bulbo húmedo del aire.

A partir de esta información se definieron las curvas diarias promedio del año 2020 de temperatura de aire, humedad relativa y la temperatura final que se puede conseguir en la entrada del compresor de la Unidad V.

La Figura 4 muestra la humedad relativa promedio diaria del aire durante el año 2020. Como se puede ver, la humedad relativa oscila entre 58% y 81% en promedio.

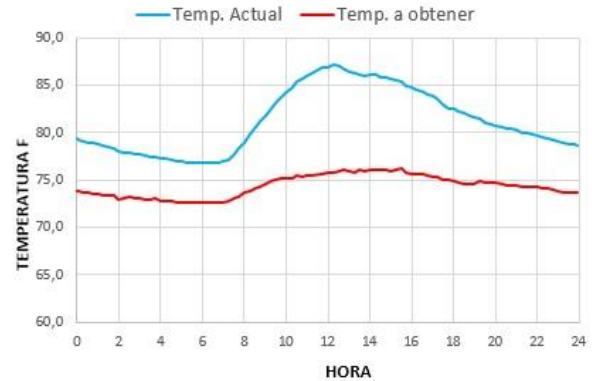


**Figura 4**

**Humedad relativa % promedio diario durante el año 2020**

En la Figura 5 se muestra la temperatura del medio ambiente diaria promedio durante el año 2020 comparada que la temperatura diaria promedio que se puede obtener utilizando el Sistema de Agua Nebulizada. De acuerdo con las curvas obtenidas, se puede lograr una reducción en la temperatura que oscila entre los 5 °F a 11 °F. Además, la temperatura final obtenida muestra

mayor estabilidad que la curva de temperatura ambiente.



**Figura 5**

**Temperatura ambiente diaria promedio (azul) vs. Temperatura final que se puede obtener con el sistema (roja)**

## RESULTADOS

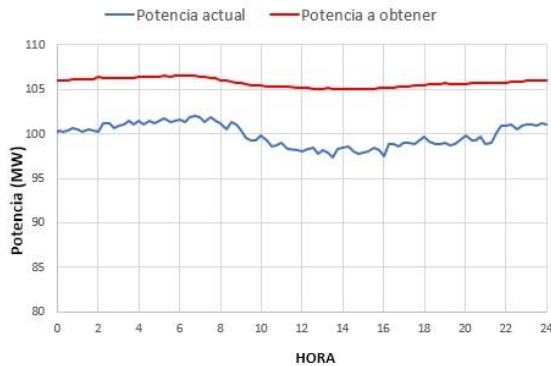
Aunque la Unidad V del Ciclo Combinado DPP es una turbina de gas con potencia nominal de 105 MW, en los últimos años se le han hecho algunas mejoras con el propósito de incrementar la potencia que puede entregar y extender los periodos de vida útil de los componentes internos. De acuerdo con el fabricante de la turbina estas actualizaciones debían incrementar en 10 MW la potencia de salida.

Examinando los datos recopilados durante el año 2020 de la potencia en MW que entrega la turbina y comparándolos con la gráfica de rendimiento vs temperatura ambiente de la Figura 2, se determinó la siguiente ecuación que relaciona la Potencia de salida porcentual (%) de la Unidad V con la temperatura del aire a la entrada del compresor:

$$P(\%) = 122.69 - 0.38T \quad (2)$$

Donde  $P(\%)$  es la potencia de salida en por ciento y  $T$  es la temperatura del aire en la entrada del compresor de la Unidad V. Con (2) y la temperatura que se puede obtener con el Sistema de Agua Nebulizada se obtiene el incremento de potencia esperado en la Unidad V. La Figura 6 muestra la comparación de la potencia diaria promedio durante el año 2020 en MW de la Unidad

V comparada con la potencia que se puede obtener con el Sistema. Como se puede ver, el incremento de potencia es de 5.2 MW en promedio lo que representa un incremento aproximado de 4.6% de la potencia actual de la Unidad V.



**Figura 6**  
Potencia diaria promedio en MW durante el año 2020 vs. La potencia que se puede obtener con el Sistema de Agua Nebulizada.

De acuerdo con las condiciones actuales del Sistema Eléctrico Interconectado (SENI), el costo variable de producción de la Unidad V está en 47.88 U\$/MWh y el costo marginal en 95.46 U\$/MWh.

Se debe considerar que, debido a los mantenimientos programados y a las salidas forzadas, la Unidad V está en servicio 11 meses al año, y de que debido a la demanda de energía la Unidad se mantiene 6 horas del día en promedio a plena capacidad, es decir, al año la unidad se mantiene 1980 horas a plena capacidad. Se obtiene el siguiente beneficio económico al incrementar en 5.2 MW la potencia sin incrementar el consumo de combustible:

$$\text{U\$/año} = 5.2 \text{ MW} \times 1980 \text{ hr} \times (95.46 \text{ U\$/MWh} - 47.88 \text{ U\$/MWh}) = \text{U\$ } 489,883.68$$

La Tabla 1 muestra un resumen del análisis económico de la implementación del Sistema de Agua Nebulizada. Se asume un costo de instalación del sistema de U\$ 500,000 y costos anuales de operación y mantenimiento de U\$ 20,000 [5].

**Tabla 1**  
Análisis económico de la implementación del Sistema de Agua Nebulizada en la Unidad V

Incremento anual de energía	10,296,000 KWh
Beneficios anuales	489,883.68 U\$
Costo de instalación	500,000 U\$
O&M anual	20,000 U\$
TIR	90%
VPN ( $i = 15\%$ )	1,075,122.97 U\$
Periodo de recuperación de la inversión	1.44 años

## CONCLUSIÓN

Como se pudo ver en la sección de Resultados, con la implementación del Sistema de Agua Nebulizada en la Unidad V se puede obtener un incremento promedio de Potencia de 5.2 MW lo que representa un incremento de 4.6%, que es un valor aproximado al objetivo de 4% que se quiere lograr. De acuerdo con el análisis económico presentado en la Tabla 1, con un periodo de recuperación de la inversión de 1.44 años y una tasa interna de retorno de 90%, el proyecto resulta ser una inversión muy favorable.

## REFERENCIAS

- [1] Tennessee Valley Authority. (Sin fecha). *How a Combustion Turbine Plant Works*. Disponible en: <https://www.tva.com/energy/our-power-system/natural-gas/how-a-combustion-turbine-plant-works>.
- [2] Etminan, E., et al. (2007), "Performance improvement of simple cycle gas turbine by using fogging system as intake air cooling system," MEMEC-07-118, Middle East Mechanical EXPO 2007 Conference and Exhibition November 4-7, 2007, Bahrain, pp 2.
- [3] Frank, J.B. (n.d). *GE Turbines Performance Characteristics*. GE Power System, pp 8. Disponible en: [https://www.ge.com/content/dam/gepower-pgdp/global/en\\_US/documents/technical/ger/ger-3567h-ge-gas-turbine-performance-characteristics.pdf](https://www.ge.com/content/dam/gepower-pgdp/global/en_US/documents/technical/ger/ger-3567h-ge-gas-turbine-performance-characteristics.pdf)
- [4] Johnson, R.S., (1988), "The Theory and Operation of Evaporative Coolers for Industrial Gas Turbine Installations," ASME Paper No: 88-GT-41, 1988, pp. 2.

- [5] Meherwan P.B (2002). ``Evaporative Cooling of the Turbine''. *Gas Turbine Engineering Handbook*. 2<sup>nd</sup> Ed, 2002, pp. 107.
- [6] Chaker, M. , Meher, C., MEE III, T., Nicholson, A., (2002). *Inlet fogging of gas turbine engines detailed climatic analysis of gas turbine evaporative cooling potential in the usa*. ASME Paper #: 2001-GT-0526, pp 3.  
Disponibile en:  
[https://www.researchgate.net/publication/237553335\\_Inlet\\_Fogging\\_of\\_Gas\\_Turbine\\_Engines\\_Detailed\\_Climatic\\_Analysis\\_of\\_Gas\\_Turbine\\_Evaporation\\_Cooling\\_Potential\\_in\\_the\\_USA](https://www.researchgate.net/publication/237553335_Inlet_Fogging_of_Gas_Turbine_Engines_Detailed_Climatic_Analysis_of_Gas_Turbine_Evaporation_Cooling_Potential_in_the_USA)