

# Enfriamiento de aire de entrada a turbina para ciclos combinados. Caso aplicado a Oriente Medio

**Palabras clave:** Refrigeración, ciclo combinado, Oriente Medio, TIAC, absorción.

## Resumen:

Las aplicaciones de enfriamiento de aire de entrada a turbina permiten aumentar la potencia generada por ciclos combinados en condiciones de elevada temperatura exterior. Cobran una importancia muy relevante para garantizar un suministro energético, siendo la demanda eléctrica elevada en esas condiciones. La posibilidad de realizar un almacenamiento térmico de energía permite abaratar el coste de la electricidad consumiendo energía en horas valle de generación para dar un extra de potencia en horas punta. Por todo ello, se postulan como aplicaciones de gran importancia en emplazamientos de elevadas temperaturas estivales e importantes picos de demanda eléctrica. En este artículo se analiza la viabilidad técnica de esta tecnología implantando la refrigeración mediante compresión mecánica o mediante absorción. Se concluye que la absorción resulta preferible a la compresión cuando el COP obtenido por compresión mecánica sea inferior a 4. El incremento de potencia en el ciclo combinado se sitúa en torno al 14% para un emplazamiento con temperatura ambiente de 50°C.

**Key words:** Refrigeration cycle, combined cycle Middle East, TIAC, absorption.

## Abstract:

*Turbine inlet air cooling applications (TIAC) allow for extra power output in gas and combined cycles with high ambient temperature. They play an active role in achieving electricity independence being demand highest in those high temperature summer conditions. The feasibility of developing thermal energy storage allows for overall electricity cost reduction as consumption is done in low demand hours so extra generation is possible during high demand periods. Consequently TIAC applications are a crucial technology for high temperature and high electricity demand summer locations. In this paper the technical feasibility of this technology is analyzed implementing the air cooling by mechanical compression or by absorption. It is concluded that absorption is more attractive than compression when COP with the latter is lower than 4. Electricity generation improvement of the combined cycle is around 14% for a location with ambient temperature of 50°C.*



**Arturo Goñi del Cacho**

Ingeniero Industrial del ICAI, especialidad Mecánica. Becado en APINA, donde realizó actividades de optimización de ciclos combinados y sistemas de refrigeración del aire de admisión a turbinas en Oriente Medio.



**José Ignacio Linares Hurtado**

Doctor Ingeniero Industrial del ICAI. Profesor de Termodinámica en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICAI), donde dirige el Departamento de Ingeniería Mecánica.



**Carlos de Ceballos Cabrillo**

Ingeniero Industrial del ICAI. Jefe del Departamento de Ingeniería Térmica en Alfa Laval y del Departamento de Estudios de APINA. Desde 2003 es Director Comercial y de Desarrollo de Negocio de APINA.

## Introducción

El importante crecimiento de la demanda energética en las últimas décadas ha obligado a fijar la atención de muchos países en el abastecimiento de sus necesidades energéticas. Oriente Medio, en concreto, se ha visto obligado a desarrollar un parque de generación acorde a los elevados picos de demanda que sufre debido a las necesidades de climatización residencial de verano.

Esta región ha sido siempre muy rica en recursos petrolíferos y gasísticos, lo cual ha aportado elevados ingresos económicos a estos países durante décadas. Debido al elevado poder que ostentan los gobiernos y monarquías de estos países, en muchos casos el precio de la electricidad está subvencionado, no existiendo un libre mercado comparable al mercado eléctrico español. Establecida su independencia energética, el autoabastecimiento eléctrico se convierte en una prioridad gubernamental. Debido a la importancia mundial del crudo, su elevado precio y la dificultad asociada al transporte de gas, sea por gasoductos o en forma de GNL, cabe entender cómo la producción de crudo es destinada a exportaciones, impulsándose así la generación eléctrica con gas natural. De este recurso se espera que provenga el desarrollo de gran parte del parque de generación eléctrica a medio plazo en estos países. Por otra parte, sus bajas emisiones de CO<sub>2</sub> aportan razones medioambientales para ello. [1]

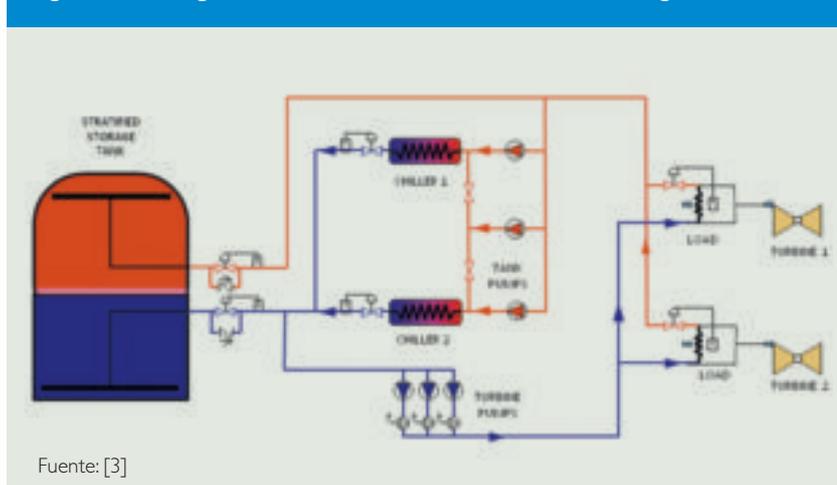
El gas natural se emplea tanto en turbinas de gas que expulsan sus gases de escape al ambiente como en ciclos combinados. En ambos casos las elevadas temperaturas del aire ambiente hacen que el rendimiento de la turbina de gas esté muy por debajo del nominal, establecido en condiciones ISO (15°C de temperatura ambiente). La tecnología TIAC (Turbine Inlet Air Cooling) resuelve este problema refrigerando el aire de admisión que llega al compresor, con lo que aumenta su densidad y con ello el flujo másico impulsado, además del combustible aportado y del rendimiento de la turbina. Con ello se logra mitigar la caída de potencia en condiciones ambiente tan alejadas del punto de diseño [2].

La tecnología TIAC puede complementarse mediante almacenamiento térmico, de modo que las máquinas frigoríficas a instalar sean de menor potencia y trabajando en continuo permitan emplear en las horas punta el frío almacenado. Habitualmente dicho frío se almacena en forma de agua líquida estratificada. A esta tecnología con almacenamiento térmico se le denomina TESTIAC (Thermal Energy Storage/Turbine Inlet Air Cooling) [3], mostrándose su principio de funcionamiento en la figura 1. En el caso de Oriente Medio el consumo punta eléctrico se sitúa en las horas más calurosas del día (entre 5 y 8 horas), lo que obliga a que el sistema de almacenamiento opere entre 19 a 16 horas en modo de carga.

Hace años era muy frecuente en Oriente Medio la generación eléctrica a partir de turbinas de gas en ciclo abierto, esto es, sin el empleo de una caldera de recuperación que las convirtiese en un ciclo combinado. Sin embargo, las crecientes demandas de electricidad han hecho que los ciclos combinados sean hoy una realidad en esta región. Las ventajas se encuentran tanto en la inversión como en los costes de operación. Así, como el ratio habitual es que la potencia producida por la turbina de gas sea de 2/3 de la de la planta total [4], la inclusión de una turbina de vapor evita la inversión de una nueva turbina de gas de 1/3 de la potencia de la planta completa, y lo que es más importante, el consumo de gas de dicha turbina pues, la de vapor se alimenta de los gases de escape de las turbinas de gas originales.

El objetivo de este artículo es presentar los resultados más relevantes de un estudio realizado desde la Cátedra Rafael Mariño de Nuevas Tecnologías Energéticas para la empresa Aplicaciones Industriales de la Absorción (APINA), determinando la influencia del sistema TIAC en un ciclo combinado. Este estudio es relevante en tanto que si bien la tecnología TIAC está bien estudiada en turbina de gas de ciclo abierto [2] existe poca experiencia con ciclo combinado. El estudio completo, en forma de Proyecto Fin de Carrera, puede encontrarse en "Optimización de aplicaciones de enfriamiento de aire de entrada a turbina para ciclos combinados" [5].

Figura 1. Tecnología TESTIAC con almacenamiento de frío en agua estratificada



## Metodología

El enfriamiento del aire se lleva a cabo mediante la interposición de una batería por la que circula agua fría entre la caja de filtros y la admisión del turbocompresor de la turbina de gas, tal como se ve en la fotografía mostrada en la figura 2. El agua que circula por dicha batería puede ser enfriada ya sea mediante una enfriadora de compresión mecánica (figura 3) o bien mediante una máquina de absorción (figura 4). En el primer caso se sustrae parte de la potencia eléctrica producida por la central para alimentar a los compresores de la enfriadora; en el segundo se retira calor de agua

Figura 2. Colocación de la batería de enfriamiento en la admisión del compresor



Fuente: APINA

Figura 3. Máquina de refrigeración por compresión mecánica de amoníaco



Fuente: APINA

Figura 4. Máquina de refrigeración por absorción de amoníaco/agua



Fuente: APINA

extracción de la turbina de vapor para alimentar el generador de la máquina de absorción. El sistema debe estar optimizado para que en ambos casos la potencia eléctrica que se deja de producir quede ampliamente compensada por el incremento de potencia producido por el efecto del enfriamiento. En el estudio se analizaron tanto la variante de compresión mecánica como la de absorción. En ambos casos el ciclo de refrigeración analizado emplea amoníaco como fluido refrigerante.

Independientemente del sistema de producción de frío elegido es necesario determinar hasta qué punto se ha de enfriar el aire, pues cuando la temperatura que se pretende conseguir está por debajo de la de rocío del mismo a la entrada de la batería se consume una importante cantidad de energía para condensar el vapor de agua presente en el aire ambiente, pe-

nalizándose con ello la producción de aire frío. A este fenómeno se le denomina calidad del enfriamiento.

La turbina de gas se corresponde con un modelo comercial por lo que se han empleado los modelos del fabricante para determinar la potencia producida en función de las nuevas condiciones del aire frío vistas por el turbocompresor: Por el contrario, en la turbina de vapor se tiene una mayor libertad para elegir el punto de extracción para la máquina de absorción. Así, se ha desarrollado un modelo para obtener la respuesta tanto de la caldera de recuperación como de la turbina de vapor. Dicho modelo se ha desarrollado en dos fases: en una primera, denominada DISEÑO, se han obtenido las características de los intercambiadores de calor y los rendimientos de las etapas de turbina a partir de las especificaciones del fabricante del ciclo; en una segunda, denominada OPERACIÓN, se ha aplicado el método  $\epsilon$ -NTU [6,7] para modelar la respuesta de los intercambiadores y la ecuación de Stodola [8] para obtener la respuesta de la turbina de vapor ante los cambios en el flujo de gases que atraviesa la caldera de recuperación así como en la temperatura con la que entran en la misma.

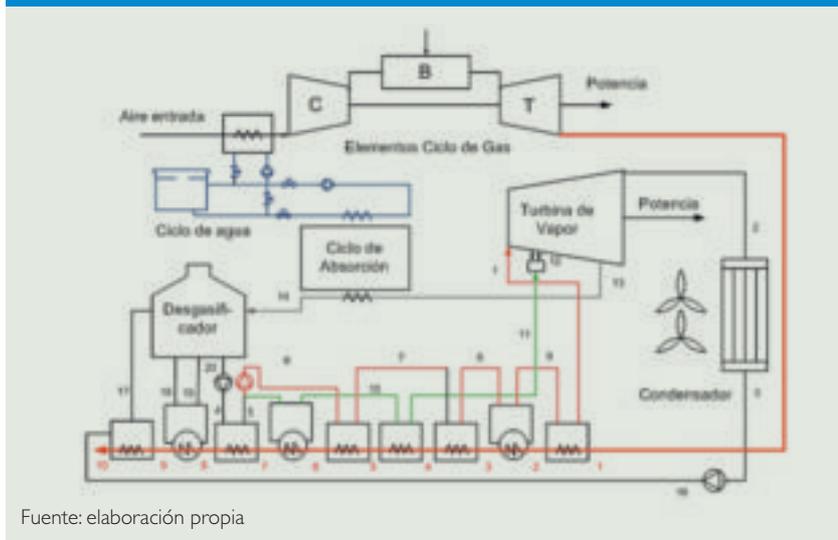
El ciclo combinado modelado aparece en la figura 5, con la implantación de la opción TIAC mediante absorción. La caldera de recuperación es alimentada por cuatro turbinas de gas con una potencia cada una de 58,1 MWe (ambiente a 50°C y 25% de humedad relativa), resultando una potencia del ciclo de vapor de 124,8 MWe. Las condiciones ambiente del emplazamiento producen una temperatura de condensación para las máquinas de frío de 62°C. Se enfriará el aire de admisión al turbocompresor hasta 25°C.

En la figura 5 se observa la implementación del ciclo de absorción como tecnología de refrigeración elegida para el sistema TIAC.

## Resultados

La calidad del enfriamiento, es decir, hasta cuánto es interesante enfriar el aire de admisión al compresor de la turbina de gas, se ha analizado para una turbina de gas sin caldera de

Figura 5. Ciclo combinado (de 2 niveles de presión) analizado

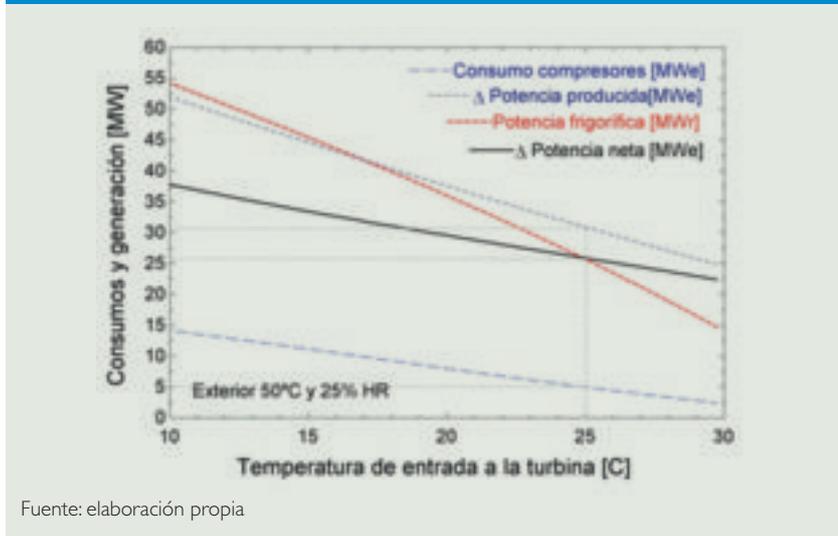


Fuente: elaboración propia

recuperación, apareciendo el resultado en la figura 6. En ella se aprecia cómo para conseguir una mejora continua en la potencia eléctrica producida por la turbina de gas, la potencia de refrigeración aumenta cada vez más, siendo cada vez peor utilizado el frío demandado. Así, cuando al aire se enfría a 30°C, cada MW de refrigeración produce 1,7 MWe en la turbina; por contra, si el aire se enfría hasta 15°C, cada MW de refrigeración produce algo menos de 1 MWe en la turbina de gas. Dependiendo de la tecnología de refrigeración elegida será preciso descontar a la energía eléctrica producida el consumo de la planta

refrigerativa. Así, si se elige la compresión mecánica, será preciso descontar directamente de la energía eléctrica producida aquella consumida por los compresores; por el contrario, si se elige la absorción, será preciso evaluar la energía eléctrica que el ciclo de vapor deja de producir al extraer vapor de la turbina para accionar el generador de la máquina de absorción. La figura 6 ha sido obtenida para una turbina de gas de 136,2 MWe nominales (ISO), empleando tecnología de compresión con una condensación a 51°C lograda a partir de agua de mar (lo que permite, con ciclos avanzados, COPs entre 5 y 6).

Figura 6. Evolución de la potencia generada y consumida por el sistema TIAC para una unidad de turbina de gas



Fuente: elaboración propia

La tabla 1 resume el efecto del enfriamiento del aire de admisión sobre el ciclo de vapor. El enfriamiento aumenta el flujo de gases que pasa por la caldera de recuperación pero reduce su temperatura de entrada a la misma, aumentando ligeramente la de salida. En conjunto, el calor disponible en la caldera de recuperación aumenta un 7%, lo que se traduce en una mayor producción de vapor y finalmente en un incremento de la potencia eléctrica producida de 8 MW (6%), que se sumarían a los obtenidos en la turbina de gas.

Se han analizado diferentes configuraciones para acoplar la máquina de absorción al ciclo de vapor; resultando la mejor la mostrada en la figura 5. En este caso, el calor retirado del ciclo de vapor supone dejar de producir una cierta electricidad en el mismo, si bien no sería necesario retirar potencia eléctrica del ciclo de gas para accionar los compresores del ciclo de frío. La tabla 2 resume los resultados obtenidos. Con objeto de comparar adecuadamente ambas situaciones se ha definido el COP equivalente como la relación entre la potencia de frío empleada (40,6 MW para el conjunto de las cuatro turbinas de gas) frente a la electricidad dejada de verter a red. Como se deduce de los valores mostrados en la tabla 2, si el equipo de compresión mecánica no logra superar un COP de 4 sería más interesante la refrigeración por absorción. En concreto, en los emplazamientos de Oriente Medio si no se dispone de agua de mar

Tabla 1. Efecto sobre el ciclo de vapor nominal (sin TIAC) del enfriamiento del aire de admisión al compresor

	Unidad	Sin TIAC	Con TIAC
Temperatura de entrada	[C]	546	532
Gasto másico gas	[kg/s]	955	1074
Gasto másico vapor	[kg/s]	134,7	146,2
Potencia obtenida	[MW]	124,8	132,8
Temp. Entrada a Turbina	[C]	527	513
Temp. Salida Gases	[C]	145,6	150,9
Temp. Condensador	[C]	69,25	70

Fuente: elaboración propia

**Tabla 2. Comparativa de la refrigeración por compresión frente a absorción sobre el ciclo de vapor**

	Unidad	Compresión	Absorción
Potencia del ciclo	[MW]	132,8	123
Gasto másico	[kg/s]	146,2	150,5
Presión en turbina	[bar]	88,47	88,2
Temp. entrada turbina	[C]	513	513,1
Temp. condensador	[C]	70	65,94
Vapor extraído de turbina	[kg/s]	0	50,1
COP equivalente	[-]	3,5	4,14

Fuente: elaboración propia

para condensar (que permitiría alcanzar un COP entre 5 y 6) sería mejor emplear la absorción, dado que con un ambiente a 50°C el COP se sitúa aproximadamente en 3,5 incluso con ciclos de refrigeración avanzados.

La tabla 3 resume los resultados para el ciclo combinado analizado concluyéndose que la diferencia entre la aplicación de la tecnología de absorción frente a la de compresión no es significativa, al menos en cuanto a potencia neta producida por el conjunto del ciclo combinado. Esta información debería ser completada con los costes de inversión, operación y mantenimiento asociados a cada tecnología. Por otra parte, el resultado particular también depende del emplazamiento en la medida en que éste afecta a la temperatura de condensación del ciclo frigorífico.

La tabla 3 también muestra que la tecnología TIAC logra un incremento de la potencia neta de entre un 18% (compresión) a un 23% (absorción a partir

de los gases de escape) en turbinas de gas en ciclo abierto, mientras que la mejor en el conjunto del ciclo combinado se ve reducida a un 14%. Pese a ello, el interés de esta región se sitúa hoy día en los ciclos combinados como una alternativa de alta eficiencia para la generación eléctrica que puede compensar las desventajas de los rigores climáticos de la zona con la tecnología TIAC.

### Conclusiones

De los resultados expuestos se derivan las siguientes conclusiones:

- Respecto a la calidad del enfriamiento, se observa cómo la potencia eléctrica generada siempre aumenta cuanto mayor sea el enfriamiento, aunque la potencia frigorífica cada vez se emplea peor. En conjunto esto provocará que la rentabilidad del proyecto decaiga lentamente con mayores enfriamientos. La decisión del enfriamiento nominal dependerá de la preferencia entre el aumento de potencia o ren-

tabilidad del proyecto según el marco energético del país en cuestión.

• La elección de la tecnología de refrigeración (absorción o compresión) depende de numerosas variables. El mayor coste de inversión de los ciclos de absorción provoca que su atractivo se centre en emplazamientos donde las dificultades de condensar por aire reduzcan el COP de los ciclos de refrigeración por compresión.

Finalmente, la inversión necesaria en la tecnología TESTIAC ha de ser sopesada frente a la alternativa de incrementar la potencia instalada de ciclos combinados o turbinas de gas para satisfacer la demanda punta. En este contexto, la inversión en refrigeración del aire de admisión es sensiblemente inferior; lo que le otorga un importante atractivo para el desarrollo y la competitividad de numerosos países de Oriente Medio. ■

### Referencias

- [1] *World Energy Outlook 2008*, International Energy Agency.
- [2] Ceballos Cabrillo, C., *Incremento de potencia y eficiencia de turbinas de gas mediante máquinas de absorción, y en Eficiencia energética: tecnologías y políticas de apoyo*, Moratilla Soria, B.Y., Linares Hurtado, J.I., Cantizano González, A., Cledera Castro, M.M. (Eds.), Universidad Pontificia Comillas, Madrid, 2010. (Disponible en <https://www.icaei.es/contenidos/secciones.php?seccion=1>).
- [3] Ceballos Cabrillo, C., *Integración del almacenamiento de frío en la generación eléctrica y la cogeneración, y en Acumulación de energía*, Moratilla Soria, B.Y. (Ed.), Universidad Pontificia Comillas, Madrid, 2010. (Disponible en <http://www.upcomillas.es/catedras/crm/publicaciones.html>).
- [4] Haywood, *Ciclos termodinámicos de potencia y refrigeración*, Limusa, 2000.
- [5] Goñi del Cacho, A., *Optimización de aplicaciones de enfriamiento de aire de entrada a turbina para ciclos combinados*, Proyecto Fin de Carrera, Universidad Pontificia Comillas, Madrid, 2011. (Disponible en <http://www.iit.upcomillas.es/pfc/resumenes/4def55ada0e4d.pdf>).
- [6] Incropera, F.P., DeWitt, D.P., *Fundamentos de Transferencia de Calor*, 4ª Edición, Pearson Prentice Hall, 1999.
- [7] Montes Pita, M.J., *Análisis comparativo de la generación directa de vapor con otras tecnologías*, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, 2008.
- [8] Cooke, D.H., *Modeling of off-design multistage turbine pressures by Stodola's ellipse*, 1983.

**Tabla 3. Resultados de la aplicación de la tecnología TIAC al emplazamiento analizado según diferentes tecnologías de enfriamiento**

	Base (MWe)	Compresión (MWe)	Absorción (MWe)
Turbina de gas (2 unidades)			
Potencia generada	232,4	285,3	285,3
Potencia neta	232,4	273,7	285,3
Turbina de vapor (1 unidad)			
Potencia generada	124,8	132,8	123,0
Potencia neta	124,8	132,8	123,0
Potencia neta Ciclo combinado	357,2	406,5	408,3

Fuente: elaboración propia