

The background of the cover is a photograph of two industrial workers in a factory. They are wearing white hard hats and high-visibility orange and yellow safety vests. The worker on the right is also wearing safety glasses. They appear to be looking at a piece of machinery or a control panel. The image is slightly faded and overlaid with a semi-transparent white trapezoidal shape that contains the text.

NOTA TÉCNICA

Conversión a Gas en Turbinas de Combustión

Ing. Alberto R. Fuentes Quijada



**CURSOS TÉCNICOS
PARA LA INDUSTRIA**

Presentación del tema.

Cuando hablamos de procesos de conversión a gas en turbinas de combustión, nos referimos al conjunto de trabajos que hay que realizar en los diferentes sistemas para adecuar la unidad en el uso de este otro combustible. Por lo general en el proyecto de instalación de la máquina que en un principio va a quemar combustible líquido, se hace la ingeniería básica y de detalles del sistema de combustible de gas natural de manera de facilitar el proceso de conversión que se realizará a futuro, quedando pendiente la instalación de equipos, tuberías y comisionamiento.

Como se verá más adelante en este artículo, el proceso de conversión a gas tiene sus ventajas tanto desde el punto de vista de ambiente, operación, mantenimiento, costos y eficiencia.

En el presente artículo solo nos referiremos a la conversión a gas natural de turbinas de combustión que son usadas para la generación de energía eléctrica y que han estado operando con combustible líquido diesel. También mostraremos los beneficios obtenidos mediante simulaciones en estas conversiones en lo referente al medio ambiente, consumo de auxiliares, costo de mantenimiento, costo de combustible, eficiencia y la extensión de los periodos de mantenimiento.

Turbinas de combustión.

Las Turbinas de Combustión también llamadas motores de combustión interna o turbinas de gas, son máquinas que transforman la energía química de un combustible que puede ser gas natural o fuel oil número 2 (diesel), entre otros en energía eléctrica, en trabajo mecánico o en empuje, es decir se transforman los Btu del combustible en energía. Sus principales elementos son: el compresor, la cámara de combustión y la turbina, aunque para su funcionamiento necesita de otros equipos llamados auxiliares o bop (balance of plant). Estas turbinas operan en base al principio del Ciclo Brayton, en donde aire comprimido es mezclado con combustible y quemado bajo condiciones de presión constante. El gas caliente producido por la combustión se le permite expandirse a través de la turbina y hacerla girar para realizar el trabajo. En la figura No. 1 podemos ver el diagrama del Ciclo

Brayton, así como también los equipos que conforman la unidad.

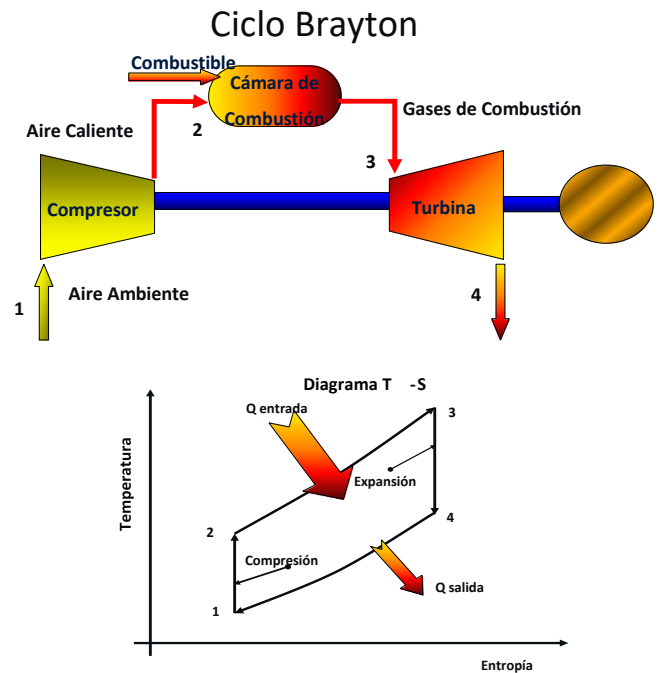


Figura No. 1 **Combustibles.**

Cualquier material que puede quemarse para liberar energía se dice que puede producir combustión y por ende recibe el nombre de combustible, la mayoría de los combustibles conocidos se componen principalmente de hidrógeno y carbono, recibiendo el nombre de combustibles hidrocarburos y se denotan por la fórmula general C_nH_m . Los combustibles hidrocarburos existen en todas las fases (sólido líquido y gaseoso), y algunos son el carbón, el fuel oil y el gas natural. En este artículo solo haremos referencia al gas natural y al fuel oil No.2 (diesel).

Efecto invernadero.

Cuando se habla de combustión en plantas térmicas de generación de energía eléctrica, es difícil no tratar el tema del efecto invernadero ya que en toda combustión completa se genera CO_2 . El efecto invernadero es un fenómeno en el cual la radiación de calor de la superficie del planeta es absorbida por los gases de la atmósfera, y es emitida de nuevo en todas direcciones. Específicamente, la luz solar que es absorbida por la superficie terrestre vuelve a la atmósfera en forma de calor. Allí, los gases de efecto invernadero (GEI) retienen parte de este calor, el resto se escapa al

espacio. Cabe mencionar que cuantos más gases de invernadero más calor es retenido. Los gases de efecto invernadero son los más eficientes en absorber el calor, como el dióxido de carbono (CO₂), sin embargo, un incremento de éstos resulta perjudicial para el planeta y para toda la vida en él. Como el CO₂ es el gas que más aumentó sus emisiones desde la revolución industrial, principalmente por la quema de combustibles fósiles provocada por la actividad humana, se produce el calentamiento global. Se recomienda la lectura del Trabajo de Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales, titulado “Emisiones en Turbinas de Gas” del Autor Gonzalo Pérez López, Sevilla-España.

Gas natural (GN)

El gas natural, es un hidrocarburo formado principalmente por metano, aunque también suele contener una proporción variable de Nitrógeno, Etano, CO₂, H₂O, Butano, Propano, Mercaptanos y trazas de hidrocarburos más pesados. Se usa en plantas de generación de energía, calderas y hornos. El gas natural es un combustible bastante limpio y esto se debe a los procesos de separación de líquidos y filtraje de partículas que efectúan las empresas suplidoras del gas, sin embargo y dependiendo de la caracterización que se haga del gas natural suplido la recomendación es montar en la tubería que conduce el gas a la turbina de combustión, filtros coalescentes o separadores (scrubber) que estén en capacidad de eliminar partículas y líquidos que puedan afectar la operatividad de la máquina. El transporte de este tipo de combustible a las plantas de generación se hace por medio de tuberías desde las estaciones de Medición y Regulación (EMR) de la empresa suplidora del gas. Siempre se negocia con estas empresas la presión de suministro la cual debe ser al menos el 20% mayor a la presión de descarga del compresor de la turbina. De no cumplirse con este requerimiento deberán instalarse compresores de gas (centrífugos o reciprocantes) para elevar la presión del gas de suministro. En cuanto al costo de la energía de este combustible la **U.S. Energy**

Information

Administration en su reporte Energy Prices del mes de diciembre de 2021 reseña el costo promedio del cuarto trimestre en 5,26 \$/10⁶ Btu (dólares por millón de Btu). En la Figura No. 2 se muestra la composición química del gas natural.

Componente	Fórmula	Gas no Asociado	Gas Asociado
Metano	CH ₄	95-98 %	60-80%
Etano	C ₂ H ₆	1-3 %	10-20 %
Propano	C ₃ H ₈	0,5-1 %	5-12 %
Butano	C ₄ H ₁₀	0,2-0,5 %	2-5 %
Pentano	C ₅ H ₁₂	0,2-0,5 %	1-3 %
Dioxido de Carbono	CO ₂	0-8 %	0-8 %
Nitrogeno	N ₂	0-5 %	0-5 %
Acido Sulfrídico	H ₂ S	0-5 %	0-5 %

Figura No. 2

Fuel Oil No.2 (FO No.2)

El fuel oil, también llamado fuel o fuelóleo 2 y conocido en otros países hispano hablantes como combustóleo, gas oil o diesel es una fracción del petróleo que se obtiene como residuo en la destilación fraccionada. De aquí se obtiene entre un 30% y un 50% de esta sustancia. Es el combustible más pesado de los que se pueden destilar a presión atmosférica. Está compuesto por moléculas con más de 20 átomos de carbono, y su color es negro. El fuel oil se usa como combustible para plantas de energía eléctrica, calderas y hornos. Este combustible por su naturaleza de producción, almacenamiento y transporte puede llegar a contener volúmenes importantes de agua y sedimentos, así como también partículas que requieren de elementos mecánicos tales como filtros y máquinas centrifugadoras para su limpieza. Su utilización en turbinas de combustión con control de NOX, requiere de agua desmineralizada que puede alcanzar en algunas turbinas a un flujo de 0,9 litros de agua por litro de diesel.

Dado los grandes volúmenes que se manejan para la generación de energía eléctrica con este tipo de combustible, se requieren en algunos casos de tuberías de transporte, terminales de recepción, tanques de almacenamientos, bombas de trasegado, bombas de inyección y centrifugadoras lo cual genera

un consumo importante de energía eléctrica que puede llegar hasta un 2% de la potencia en MW de la unidad. En cuanto al costo de la energía de este combustible, la **US Energy Information Administration** en su reporte Energy Prices del mes de diciembre del 2021, reseña el costo promedio del cuarto trimestre en 16,98 \$/10⁶ Btu (dólares por millón de Btu), este costo de energía representa el 322 % del costo de la energía del gas natural. Por otro lado, la Unión Europea a través del Fondo Europeo de Desarrollo Regional en su cálculo automático de emisiones totales reporta que las emisiones de CO₂, generadas cuando se quema diesel son superiores a las emisiones cuando se quema gas natural en un 130%. En la Figura No. 3 se muestra las características del diesel.

Ensayo	Metodo	Unidad	Fuel Oil N° 1	Fuel Oil N° 2	Fuel Oil N° 3
Densidad	ASTM D129	Kg/m ³	< 960	< 980	< 990
Flash Point, PMC	ASTM D93	°C	> 60	> 60	> 60
Azufre	ASTM D429	% p/p	< 0,7	< 0,7	< 0,7
Viscosidad 50 °C	ASTM D445	cSt	< 50	< 195	< 630
Agua	ASTM D95	% v/v	< 1	< 1	< 1
Sedimentos	ASTM D473	% p/p	< 0,50	< 0,5	< 0,5
Poder Calorico Alto		MJ/Kg	44,1	44	43,6
Poder Calorico Bajo		MJ/Kg	41,62	41,54	41,2

Figura No. 3

Mantenimiento.

Muchas empresas fabricantes de turbinas de combustión Heavy Duty, entre ellos Siemens, Mitsubishi y General Electric, recomiendan a sus clientes a través de sus boletines técnicos, catálogos de eficiencia, datos técnicos y los diferentes tipos de inspecciones de mantenimiento a realizar; tales como combustión (tipo C), paso de gases calientes (tipo B) y mayor (tipo A) con la siguiente secuencia CC-B-CCA. Además de los intervalos de tiempo para cada uno en función de las Horas Equivalentes de Operación (HEO) o Arranques Equivalentes (AE) de la unidad, se toma lo que ocurra primero, así como también la secuencia de estos mantenimientos. En esa data se

especifica el número de horas equivalentes de operación y arranques equivalentes para los diferentes mantenimientos cuando se utiliza como combustible el gas natural a razón de 8.000 HEO o 400 AE para inspección de combustión, 24.000 HEO o 1200 AE para paso de gases calientes y 48.000 HEO o 2400 AE para mantenimiento mayor. Cuando la turbina opera con combustible líquido (diesel) el número de horas equivalentes de operación se multiplica por 1,3. Con la finalidad de llevar un mejor control de estos parámetros HEO y AE, las turbinas de combustión modernas tienen instalado en su sistema de control un algoritmo que calcula estos indicadores y además lleva un registro de todas las HEO y AE.

Cuando observamos la Misión de una Planta Termoeléctrica de Turbinas de Combustión, podemos visualizar sus atributos que en muchos casos son: Seguridad (del personal), Confiabilidad y Disponibilidad, Eficiencia, Costo de Producción y Ambiente, algunos de ellos tales como la eficiencia y la seguridad referida al personal, se lleva a cabo en tiempo real. Obviamente todos son importantes, en esta oportunidad hablaremos solo de Costo de Producción en cents\$/kWh, el Heat Rate en Btu/kWh y Ambiente en términos de emisiones, toneladas de CO₂ a la atmósfera. El monitoreo de estos atributos una vez fijados los valores metas se hace a través de indicadores de gestión (KPI), los cuales se evalúan mensualmente y se comparan los valores del mes con el valor meta, esto permite realizar los ajustes pertinentes en caso de que el valor real del mes esté fuera del valor planificado como meta para ese mes. En el cuadro de la Figura No. 4 se plantea un ejemplo con una Turbina de Combustión de 160 MW la cual quema combustible diesel y se va a convertir a gas. En este ejercicio se simula el comportamiento de la turbina cuando quema gas natural y cuando quema diesel y además se hacen ciertas suposiciones en cuanto al factor de carga, la disponibilidad y se toma como periodo de tiempo un año. Los resultados obtenidos muestran las disminuciones de las emisiones de CO₂, el heat rate, el costo de combustible, el costo de mantenimiento, el costo de producción y el costo del agua desmineralizada para el control de NO_x, el cual se hace cero, cuando pasamos

de fuel oil a gas natural. Por lo general, la viabilidad de estos proyectos se evalúa a través de un ejercicio calculando la Tasa Interna de Retorno (TIR).

Dif. MM Dif. MM Dif.

	GN	FO No. 2	Dif. Emisiones	Dif. Heat Rate	Dif. MM \$ por Comb.	Dif. MM \$ por Mant.	Dif. Cents \$/ kWh	% Reducción
Potencia de la Unidad en MW	160	160						
Factor de Capacidad en %	85	85						
Energía Generada GWh/año	119.136	119.136						
Volumen de Gas en MMm ³ /año	303.859							
Volumen de FO No.2 en MM t/año		29.784						
Emisión de CO ₂ en t/año	240.178	313.089	72.911,00					30
Heat Rate Btu/kWh	9.514	9.948		434				5
Costo Combustible en MM \$/año	60	189			129,00			467
Costo Mantenimiento en MM \$/año	12	16				4,00		30
Costo de Producción en Cents \$/kWh	4,03	16,87					12,84	

Figura No. 4

Proceso de conversión a gas natural

En la mayoría de los proyectos de instalación de turbinas de combustión se toma en cuenta en la ingeniería conceptual entre otras cosas, la disponibilidad de combustibles en la zona de ubicación de la planta es allí donde se decide si se compran máquinas duales (gas – diesel), o solamente se compra para un solo combustible. Para la realización del proceso de conversión, deben tenerse en cuenta algunos aspectos importantes tales como conocer si en el proyecto de instalación de la unidad se contempló la ingeniería básica, ingeniería de detalles y procura. En el caso que esto no haya sido contemplado se tendrá que completar estas ingenierías para procurar todos los equipos, materiales y repuestos requeridos. De contarse con la ingeniería básica, de detalle y procura se deberán revisar todos los equipos, materiales y repuestos que deben estar en algún almacén del proyecto con la finalidad de hacer una auditoría técnica que permita realizar un inventario para conocer si todo lo que se necesita está disponible y cuál es su estado. Durante la conversión a gas la unidad estará en servicio quemando diesel y en este sentido se deberán extremar las medidas de seguridad en coordinación con el personal de operaciones de la planta a fin de evitar situaciones que puedan sacar la unidad fuera de servicio o causar algún daño a personas y/o instalaciones. En estos casos se recomienda trabajar con permisos de trabajo autorizados por el jefe de operaciones de la planta.

Para las conexiones de tuberías que se hagan con soldaduras o para cortes de las mismas con oxicorte o sierras mecánicas, se deberán hacer pruebas con explosímetros a fin de descartar la presencia de gases combustibles en las zonas donde se va a cortar o soldar. Para la realización de las pruebas de Rayos X a los cordones de soldadura de las tuberías se deberá notificar por escrito al personal de la planta especificando el lugar, el día y la hora del ensayo para que se acordone el área y no se permita el paso de personas ajenas a las pruebas. Una vez relajadas todas las conexiones en las tuberías de gas, se deberá hacer una prueba de estanqueidad para verificar que no haya fugas en todo el tendido de la tubería ni en sus accesorios.

Otro aspecto para considerar es la revisión del sistema contra incendio instalado en la turbina a ver si cumple con las normas para un nuevo combustible como lo es el gas natural.

Una vez completada la instalación de equipos, instrumentos de control y de monitoreo, sistemas de seguridad, filtros y el conexionado de las tuberías de gas, de instrumentación y control, se comenzará con el precomisionamiento del nuevo sistema de combustible seguido por el comisionamiento para terminar con el comisionamiento en caliente, en este último se afinará entre otras cosas la nueva curva de arranque de la máquina que el personal de control ha desarrollado para el nuevo combustible así como todos los parámetros operativos y de protección de los equipos los cuales deberán estar de acuerdo a las especificaciones del proyecto. También se realizarán pruebas de carga máxima continua (MCR), pruebas de eficiencia (Performance Test), pruebas de rechazo de carga (Load Rejection Test), pruebas de confiabilidad (Reliability Test), y las pruebas de balance de calor (Heat Balance). Para el comisionamiento se contará con la presencia en campo de un Asesor Técnico (TFA) quien tendrá la responsabilidad de coordinar la realización de todas las pruebas y de certificar que todo se ha hecho de acuerdo al protocolo (Commissioning Book). Las pruebas de aceptación se harán con la presencia del personal de planta y si todo cumple con lo contratado se hará un acta de recepción

provisional. El acta de recepción final se hará un año después que la unidad este en servicio con este nuevo sistema de combustible o se aplicará lo que establezca el contrato. La experiencia en este tipo de trabajo indica que hay que cuidar todos los detalles a fin de cumplir con las fechas programadas de incorporación de la turbina al sistema eléctrico, ya que de lo contrario esto pudiera acarrear costos por incumplimiento. Por lo general el personal de ingeniería y construcción o el personal de planta le dan mucha importancia al Know How de las empresas licitantes en proyectos de conversión a gas de turbinas de combustión ya que aun cuando se puedan ver como proyectos sencillos los mismos no lo son y requieren de empresas con herramientas, equipos y personal especializado en las áreas de montaje, mecánica, instrumentación, electricidad, electrónica, de control, ensayos no destructivos, gerencia de arranque y pruebas y un asesor técnico de campo. Por lo general se contratan empresas que tengan experiencia tanto nacional como internacional en proyectos como este.

En los proyectos de instalación de turbinas a combustión, los fabricantes a solicitud del cliente suministraran las turbinas para operar con combustible dual, gas y gasoil o para operar con un solo combustible, gas o gasoil. Para la conversión a gas de turbinas que fueron adquiridas para operar con combustible dual (líquido o gas) pero han estado operado por un largo período de tiempo solo con combustible líquido gasoil (diesel), se recomiendan las siguientes actividades en el comisionamiento: a) mantenimiento a los filtros coalescentes y al scrubber, b) limpieza y/o barrido de las líneas de gas combustible mediante pulsos de aire a alta presión y alto volumen para desplazar partículas contaminantes en cada uno de los segmentos, c) inspección, calibración y pruebas funcionales de las válvulas de gas (válvula de parada y válvulas de control), inspección, d) calibración y pruebas de las válvulas de purga, garantizando el barrido de líneas internas de gas mediante aire de purga, e) pruebas de arranque y operación de las turbinas usando gas como combustible, f) afinación del sistema de combustión, para esto se requiere la instalación en campo de equipos especiales tales como termómetros,

barómetro, manómetros y analizadores de gases para la determinación de NO_x , O_2 , CO y CO_2 . En aquellas unidades que por diseño y estando en línea, se permita hacer la prueba de transferencia de combustibles, de gas a líquido y de líquido a gas, se recomienda seguir estrictamente el protocolo de esta operación especificado por el fabricante. **Proyectos de conversión a gas.**

En diferentes países se han realizado importantes proyectos de conversión a gas en turbinas de combustión que en la primera fase del proyecto quemaron combustible líquido, entre ellos podemos citar: Unidades General Electric Modelos 7001FA de 180 MW ISO, 7001EA de 90 MW ISO y Unidades Siemens Modelos 501FD2 de 160 MW ISO, 501FD3 de 160 MW ISO, 501FD4 de 180 MW ISO. Estos Proyectos de Conversión han sido ejecutados por empresas como General Electric, Siemens e Inerven entre otras. Como complemento a este punto, se recomienda la lectura de los siguientes trabajos: Trabajo de Grado del Ing. Carlos Miguel Benítez, titulado “Conversión a Gas Natural de la Central Eléctrica de Punta Grande”, Lanzarote España en Julio 2016 para la Obtención del Título de Máster en Ingeniería de la Energía y el Trabajo presentado por el Ing. Francisco Antonio Méndez, Superintendente de Electricidad de la República Dominicana, titulado “Impacto del Gas Natural en la Producción de Energía Eléctrica en la República Dominicana” de abril de 2010.

Conclusión.

Se puede concluir que con los proyectos de conversión a gas de turbinas de combustión, se reduce significativamente la emisión de toneladas de CO₂ al ambiente, disminuyen los costos de mantenimiento, el costo por combustible, el costo de producción, se logra un aumento en la eficiencia y se facilita la operación de la unidad. También es importante señalar que cuando se quema gas natural no se inyecta agua desmineralizada al combustible para el control del NOX, lo cual significa un importante ahorro para la planta.

Recomendaciones.

Dada la importancia que tiene para los seres humanos el contar con ambientes libres de contaminantes y bajas emisiones de CO₂ que de alguna manera disminuyan el Efecto Invernadero, se recomienda el uso del gas natural en sustitución del combustible líquido (diesel) en turbinas de combustión.

Aun cuando las inversiones para este tipo de proyectos puedan no considerarse como importantes desembolsos de capital, dependiendo de cada proyecto, se recomienda hacer un Caso de Estudio y se determine mediante el mismo en cuanto tiempo se obtiene un flujo de caja positivo. **Referencias.**

- Lou B. Mehl. “Options to Reduce the Operating Costs at Fossil Power Stations”.
- Handbook for Thermal and Nuclear Power. Engineering Society.
- Fuentes. “La Gerencia del Combustible como Elemento Clave en Centrales Térmicas a Vapor”.
- U.S. Energy Information Administration