

05-004

**ENERGY EFFICIENCY PROJECTS : EVALUATION OF TURBOEXPANDERS  
APPLICATION FOR POWER GENERATION IN SPAIN**

Delgado Calin, Gines; Nieto Morote,  
Ana UPCT

Spain, over the last 20 years, has progressed economically and has developed a remarkable natural gas transport and distribution system and at the same time a power grid. More than 27.000 Mw of combined cycle power plants were installed. Nowadays, it is time to improve efficiency and yield of industrial installations. Turboexpander with an electrical generator is a proven technology that can be installed at locations with large pressure drops to produce power. This paper shows preliminary feasibility analysis of such application in Spain.

**Keywords:** *efficiency; generation; feasibility; power plants; projects;*

**PROYECTOS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA: APLICACIONES DE LOS  
TURBOEXPANDERS EN ESPAÑA PARA GENERACIÓN ELÉCTRICA**

España, en los últimos 20 años, y en paralelo a su desarrollo económico ha ido implementando un sistema gasista y un parque eléctrico donde se han instalado más de 27.000 Mw en ciclos combinados. Se trata ahora de mejorar la eficiencia y los rendimientos de estas instalaciones. El turboexpander acoplado a un generador eléctrico es una tecnología que puede aprovechar los saltos de presión que se producen en el transporte y distribución de la red gasista. Esta ponencia muestra un análisis inicial de la viabilidad de esta aplicación en España.

**Palabras clave:** *eficiencia; proyectos; viabilidad; generación; centrales eléctricas*

Correspondencia: Ginés Delgado gines.delgado@upct.es

## 1. Introducción

El objetivo de este trabajo es mostrar la viabilidad de la aplicación de turbinas de expansión o turboexpanders para la recuperación de la energía del transporte del gas natural en energía eléctrica aprovechando los saltos de presión que se producen en el sistema.

La cadena del suministro de gas natural abarca desde la extracción hasta su transporte (en barcos o gaseoductos) y distribución. El sistema de transporte de gas natural en España se ilustra en la Figura 1.

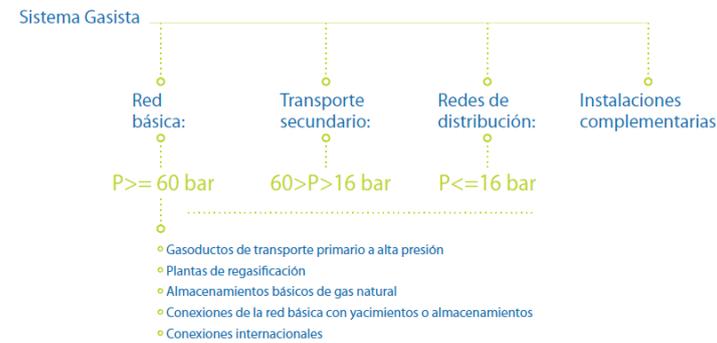
Figura 1: Infraestructuras de gas natural. Fuente: Enagás



El gas natural entra a España por conexiones internacionales de gaseoductos o bien por plantas regasificadoras en puertos donde descargan los buques metaneros. El gas natural es transportado por todo el territorio nacional mediante tubería en condiciones de alta presión. Las infraestructuras en cifras suponen 9.540 km de gaseoductos de alta presión, 7 plantas de regasificación, 3 almacenamientos subterráneos, 4 conexiones internacionales (Portugal, Francia m Marruecos y Argelia) y 1 centro principal de control desde donde se coordina el funcionamiento del sistema gasista español. En esta red nacional, la empresa Enagás opera y mantiene unas 18 estaciones de compresión y dispone de unas 433 Estaciones de Regulación y/o Medida.

El rango de presiones típicos en un gasoducto de transporte es superior a 60 bares en la red básica, de 60 a 16 bares en la red de transporte secundario, y por debajo de 16 bar en la red de distribución, tal y como se muestra en la Figura 2; con una disposición simplificada de una red de transporte y distribución de gas natural.

**Figura 2: Red de transporte y distribución del gas natural. Fuente Enagás**



Los saltos de presión en la red de transporte del gas natural se producen normalmente en las estaciones de regulación mediante válvulas que tienen como función reducir y estabilizar la presión de suministro. El turboexpander instalado en paralelo a estas válvulas puede realizar la misma función de regulación de presión, pero aprovechando parte de la energía que contiene el gas precisamente por tener una presión y un caudal (Bloch & Soares, 2001).

La generación de electricidad tanto en grandes como en pequeños saltos de presión del gas natural ha ido acumulando cierto éxito internacional y se han conseguido instalaciones fiables con potencias que alcanzan hasta los 15 Mw (Navid et al, 2012)

Los primeros ejemplos que más frecuentemente se mencionan son los de Italia (Mirandola y Macor, 1988), y EEUU (Hedman, 2008) se instalaron en San Diego (California), Memphis (Tennessee) en 1983; Stockbridge (Georgia) en 1984 y Hamilton (New Jersey) en 1987. La de California, un turboexpander instalado en una estación de regulación a puertas de la ciudad de San Diego, generaba 260 kW a partir de un caudal de 13.000 m<sup>3</sup>/h, en la ciudad de Hamilton, New Jersey, generan 2.800 kW funcionando con un caudal de 42.400 m<sup>3</sup>/h.

Hemos revisado otras referencias como son los proyectos en Canadá (Howard, 2009) y Bangladesh (Mahbubur, 2010) que nos han permitido adquirir los conocimientos para realizar los cálculos necesarios. La potencia generable en un turboexpander es proporcional al caudal multiplicado por la diferencia de las entalpías de entrada y salida del gas natural. Estas entalpías dependerán de la presión y temperatura del gas en su proceso de expansión.

## 2.- Casos de estudio de aplicación de los turboexpanders

Para abordar sistemáticamente la evaluación de esta aplicación en España debemos inicialmente comprender los distintos escenarios donde se podrían situar estas máquinas. Para ello revisamos primero los distintos casos donde dependiendo del salto de presión y del caudal (cantidad y estabilidad) nos permite hacer una primera estimación de la potencia eléctrica que se puede generar.

Vistos los antecedentes de la aplicación y las posibles disposiciones, la aplicación de los turboexpanders en España sería viable técnicamente en 2 escenarios: en las estaciones de regulación a puertas de ciudades y en instalaciones industriales. Las ciudades pueden ser de caudal muy variable, y ejemplo de industrias consumidoras de gran volumen de gas natural son la siderurgia, la cerámica y los ciclos combinados.

### Escenario 1: Estación de regulación y medida a puertas de ciudades

En la tabla 1, de elaboración propia, se muestran los datos más significativos de las posibles estaciones de regulación y medida que podríamos encontrar a puertas de una ciudad.

**Tabla 1. Cálculo de energía eléctrica en función de caudales de gas**

	Ciudades	
	Gran caudal	Caudal medio
Presión de entrada (bares)	72	
Presión de salida (bares)	16	
Caudal de diseño (Nm <sup>3</sup> /h)	30.260	11.050
Caudal medio (Nm <sup>3</sup> /h)	15.932	5.818
Potencia eléctrica (kW)	636	232
Operación (horas)	8.760	
Generación (Mwh/año)	5.571	2.032

El tiempo de operación de este tipo de estación abarca todas las horas de un año, sin embargo, el consumo instantáneo de gas para uso doméstico es muy variable, teniendo lógicamente más demanda en calefacción en los meses fríos, así como picos horarios debidos los hábitos familiares y comerciales (cocina, agua caliente...).

Como cabía de esperar, para un gran caudal, un gran salto de presión y una disponibilidad absoluta de la instalación la electricidad que podemos generar a partir de una turbina de expansión es muy elevada. Turbinas de este tipo funcionando en instalaciones de estas características se pueden encontrar en países como Ucrania, Rusia, Estados Unidos y Canadá.

### Escenario 2: Industrias: Siderurgia, Cerámica y Ciclo Combinado

Para el caso de instalaciones industriales, en la tabla 4 se muestran los datos característicos de las posibles estaciones de regulación y medida que hay instaladas.

**Tabla 2. Cálculo de energía eléctrica en función de caudales de gas de industrias**

	Industrias			
	Siderurgia	Cerámica	Ciclo Combinado 20%	Ciclo Combinado 80%
Presión de entrada (bares)	72	16	72	72
Presión de salida (bares)	16	0.4	35	35
Caudal de diseño (Nm <sup>3</sup> /h)	7.465	591	50.000	50.000
Potencia eléctrica (kW)	387	25	1.000	1.000
Operación (horas)	6.264	6.936	1.752	7.008
Generación (Mwh/año)	2.424	173	1.752	7.008

La siderurgia es un tipo de industria que demanda un caudal de gas medio, por lo que se abastece de un gasoducto de transporte, para alimentar los hornos de fundición en la fabricación de productos básicos de hierro, acero y ferroaleaciones. Además, la demanda permanece constante a lo largo de toda la jornada laboral, lo que permite la selección de una turbina ajustada en el punto óptimo de funcionamiento para asegurar así un rendimiento máximo del sistema. La operación típica de la fábrica es de 24 horas durante 5 días a la semana. Este tipo de instalación es una buena opción ya que suele tener también una acometida eléctrica de media o de alta tensión donde poder conectar el generador eléctrico acoplado al turboexpander, no solo para consumo interno, sino para la venta de electricidad a la red.

En la industria cerámica, el caudal demandado es significativamente menor que una siderurgia, pero la demanda se mantiene constante, por lo que la acometida de gas natural parte de un gasoducto de distribución a baja presión. Para un salto de presión y caudal menor que el anterior, aun con unas horas de operación elevadas, no resulta muy atractivo en este tipo de industria el uso individualizado de turbinas de expansión de gas natural.

En el ciclo combinado, el salto de presión y un caudal muy elevado hacen que la energía extraída del gas para generación de electricidad sea muy elevada. En cambio, la baja operación anual hace que disminuya el cómputo de la electricidad generada a lo largo de un año. Sin embargo, en los casos en que la central incremente su régimen de operación, es evidentemente el escenario más interesante. En este tipo de centrales, se dispone de instalaciones (eléctricas, gasistas y auxiliares) que pueden reducir bastante los gastos de inversión inicial. La disponibilidad de equipo de operación y mantenimiento ya incorporado en la central, hace que los costes de explotación sea marginales comparados con otras aplicaciones industriales.

Hay otros escenarios industriales interesantes de estudio como pueden ser las refinerías y todos aquellos complejos petroquímicos que sean grandes consumidores de gas natural y se conecten a la red de transporte y distribución. De todas formas, serían equivalentes en caudales y presión a los presentados anteriormente

### 3.- Estudios de viabilidad económica de algunas aplicaciones de turboexpanders en regulación de presión de gas natural

De los escenarios tipo evaluados, hemos realizado estudios preliminares de viabilidad económica en el caso de una industria siderúrgica y de un ciclo combinado.

#### Caso A: Empresa siderúrgica

Con unos ingresos por venta de electricidad calculados de 121.200 €/año; producto de vender la electricidad a 50 €/MWh, con una generación de unos 387 kWh durante 6.264 horas al año.

Los costes de operación principales (OPEX) serán los correspondientes al consumo de gas natural y el mantenimiento. Se han estimado en unos 70.000 €/año.

La inversión inicial corresponde al grupo turbina-generador, la caldera para el precalentamiento de gas, y las instalaciones necesarias para la evacuación de la electricidad generada, según el presupuesto calculado asciende a 415.000 €.

El VAN se hace cero una vez han transcurrido 8 años y medio de la puesta en servicio de la instalación, esta es la fecha en la cual hemos recuperado toda la inversión realizada. Siendo la Tasa Interna de Rentabilidad (T.I.R.) a 10 años de un 7,4%.

#### Caso B: Ciclos combinados

En función del tamaño de la instalación: 400 MW, 800 MW y 1200 MW. El coste de la inversión inicial sería de 1, 2 y 2,5 MM € respectivamente para una potencia de producción de 1, 2 y 3 Mw.

**Tabla 3: Ingresos en Ciclos Combinados de 400,800 y 1200 Mw**

	400 Mw	800 Mw	1200 Mw
MES	Ingresos (€)	Ingresos (€)	Ingresos (€)
Julio	18.195,60	36.391,20	54.586,80
Agosto	20.817,37	41.634,74	62.452,11
Diciembre	19.632,87	39.265,74	58.898,61
Enero	20.149,29	40.298,58	60.447,87
Febrero	20.502,50	41.005,00	61.507,50
<b>Total</b>	<b>99.297,63</b>	<b>198.595,26</b>	<b>297.892,89</b>

En los tres casos resumidos en la tabla 3, hemos supuesto una generación baja siguiendo la tendencia de los últimos 2 años publicada por REE para los ciclos combinados en España, con una producción eficiente de 5 meses al año, 3 en invierno y 2 de verano, con un total de un 20% de las horas del año y un precio medio de 50 €/ Mwh consiguiendo las siguientes retornos:

-Instalación de 400 Mw: Es capaz de producir 1 MWh y generaría un beneficio de unos 100.000 €/ año, y se recuperaría la inversión en 9 años.

-Instalación de 800 Mw: Para una producción de 2 MWh el beneficio total sería de unos 200.000 €/año, la inversión se recuperaría en 8 años.

-Instalación de 1200 Mw: Para una producción de 3 MWh el beneficio total sería de unos 300.000 €/año, la recuperación de la inversión ocurre en 7 años.

Lógicamente, para precisar mejor el retorno de la inversión habría que estudiar cada caso en detalle viendo el perfil horario de generación y realizar el estudio a largo plazo con una actualización de la previsión de generación en los próximos años. También sería necesario usar una previsión de precios de venta de la electricidad. Al disponer España actualmente de más de 27.000 Mw en ciclos combinados y pudiendo generarse 1 Mw por cada 400 Mw instalados, teóricamente disponemos en España de la posibilidad de realizar aproximadamente unos 60 proyectos de instalación de turboexpander en ciclos combinados que los haría todavía más eficientes al no desperdiciar el salto de presión del gas desde el gaseoducto a las turbinas.

#### **4.- Conclusiones**

En base a los resultados que hemos obtenido, podemos decir que los factores más importantes para la viabilidad económica de una aplicación de generación eléctrica con turboexpander son los siguientes:

##### Costes de capital

Los equipos principales son el turboexpansor y el generador y suponen el 80% de los costes totales. También deben tenerse en cuenta la necesidad de equipos auxiliares como una pequeña caldera de agua como precalentador, intercambiador de calor, tuberías, controles, así como los gastos generales de ingeniería, instalación y mantenimiento. Dependiendo del caso, el coste puede oscilar entre los 400€ a 1.800€ por kW instalado. El menor coste por kW se da para las instalaciones de mayor potencia eléctrica generada. El coste de la ingeniería no es despreciable puesto que las instalaciones son muy específicas y cada caso exige un esfuerzo de diseño significativo.

##### Costes de funcionamiento

Las instalaciones de turboexpanders para generación de electricidad a puertas de la ciudad tendrán un coste significativamente más alto que los costes de operación de las estaciones reguladoras. El coste más alto es el combustible requerido para el precalentamiento del gas a la entrada de la turbina de expansión. También se puede aceptar la suposición que los costes de operación y mantenimiento de estos sistemas serían similares a los costes de operación y mantenimiento de los sistemas de las estaciones de compresión, sobre una base de 0,001 a 0,005 por kWh. Sin embargo en un ciclo combinado, estos costes no son relevantes pues los absorbe el equipo de operación y mantenimiento de la central.

##### Ingresos por venta de energía

El precio de venta futuro del mercado eléctrico es el factor más importante y más difícil de predecir con precisión para determinar la rentabilidad del proyecto. El ingreso total también dependerá de la cantidad de energía generada que a su vez depende de varios factores: velocidad de flujo y relación de presión. Las horas de funcionamiento anual que multiplican cada par de datos de presión y caudal, dependerán del régimen de producción de la instalación que es muy distinto de un caso a otro y depende del perfil de consumo del gas natural.

##### Relación de presión

El potencial de recuperación de energía es proporcional a la relación de presión de entrada y salida. Dependiendo del fabricante, se necesita un salto de presión mínimo y máximo que influirá en la selección del diseño de la turbina.

### Caudal

La potencia de salida también depende del caudal. En las estaciones de regulación de las ciudades, el caudal puede oscilar mucho debido por ejemplo a los cambios de temperatura por el uso en calefacción. Pero incluso en el mismo día puede oscilar y presentar horas valle y horas pico debido a la fluctuación en la demanda diaria y horaria que generan el uso doméstico y comercial. En este caso, lo más sensato será instalar turboexpanders en paralelo que vayan absorbiendo distintos rangos de caudal.

### Disponibilidad de la instalación

La disponibilidad de la instalación es uno de los factores determinantes para determinar la rentabilidad de la inversión. Ya que cuanto mayor sea la disponibilidad de funcionamiento del turboexpander, mayor energía generara produciendo por consiguiente unos mayores ingresos por electricidad. Instalaciones con grandes potencias de generación pueden ser menos rentables, incluso inviables, que otras con menor potencia de generación pero que estén disponibles un mayor número de horas anualmente.

## **5. - Bibliografía.**

- Bloch H, Soares C. (2001). *Turboexpanders and process applications*. Boston: Gulf Professional Publishing
- Cryostar; disponible en <http://www.cryostar.com/web/green-energy-system.php>
- Howard Clifford, Robert. (2009) "Hybrid turboexpander and fuel cell system for power recovery at natural gas pressure reduction stations." Queen's University Kingston, Ontario, Canadá
- Hedman, Bruce A. (2008) *Waste energy recovery opportunities for Interstate natural gas pipelines*; Gulf Coast Clean Energy; Interstate Natural Gas Association of America
- Navid Zehtabiyani, Rezaie y Majid Saffar-Avval.(2012) *Feasibility study of turbo expander Installation in city gate station*. The 25th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization and Simulation of Energy Conversion Systems and Processes. Perugia, Italia. Volumen 4 Pág. 47-55. Firenze University Press.
- Mahbubur Rahmanm, Mohammed. (2010) *Power generation pressure reduction in the natural gas supply chain in Bangladesh*. Journal of Mechanical Engineering, Vol. ME 41, No. 2, Transaction of the Mech. Eng. Div., The Institution of Engineers, Bangladesh
- Mirandola, A. y Macor,A (1988) *Experimental Analysis of an Energy recovery Plant by expansion of Natural Gas*, Proc. Of the 23<sup>rd</sup> Intersociety Energy Conversion Engineering Conference. Vol 4, pp33-38, Denver -Colorado