

Aplicación de los turboexpansores para generación eléctrica en la expansión del gas natural

Gines Delgado-Calin y Ana Nieto-Morote
Universidad Politécnica de Cartagena (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7617>

1. INTRODUCCIÓN

Un turboexpansor (*turbo-expander*) o turbina de expansión, es una turbina radial o axial a través de la cual un gas a alta presión se expande para producir trabajo [2].

Este tipo de trabajo puede usarse para distintas aplicaciones, según la máquina a la que esté acoplada el equipo, pudiendo ser esta máquina un compresor o un generador. Se pueden utilizar turbinas radiales o axiales, siendo más comunes las primeras. En la Figura 1, se aprecian las direcciones de flujo del gas en los álabes que componen el rotor, y las partes de alta presión (*High Pressure*) y baja presión (*Low Pressure*) de la turbina.

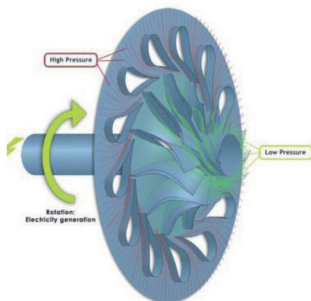


Figura 1: Rotor de una turboexpansor radial

Una gran parte de la energía recuperada del gas expandido en un turboexpander es convertida en energía mecánica. Un turboexpander también puede ser utilizado para impulsar otros dispositivos, tales como una caja reductora y que ésta, a su vez, impulse posteriormente a un generador eléctrico (véase Figura 2).

Los turboexpansor se emplean en múltiples aplicaciones en la industria, especialmente en la industria petroquímica. Entre sus aplicaciones más destacadas figuran los procesos criogénicos, los procesos de refinación del petróleo, la separación de los compuestos del aire o

la licuefacción de gases. En este artículo, revisaremos la aplicación de los turboexpanders para generación eléctrica en la expansión del gas natural.

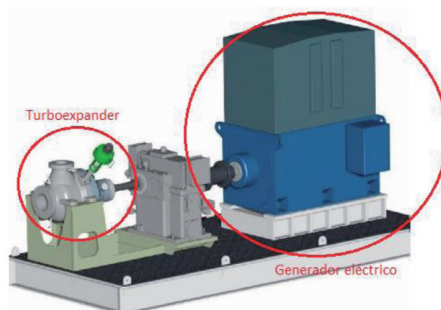


Figura 2: Generador eléctrico acoplado a turboexpansor

El gas natural es transportado mediante gasoductos en condiciones de alta presión, oscilando entre los 16 y 80 bar. Sin embargo, la presión del gas natural cuando llega al consumidor final, dependiendo de la aplicación, puede oscilar entre los 35 bares de una central eléctrica de ciclo combinado hasta los 200 mbar de un usuario doméstico. Por lo tanto, es necesaria la instalación de equipos que reduzcan la presión del gas, es decir, instalaciones que se conocen como Estaciones de Regulación y Medida (ERM).

El elemento fundamental de las ERM es el regulador, que es el equipo que permite la reducción y estabilización de la presión de salida, a pesar de las oscilaciones que pueda haber en la presión de entrada y de las variaciones de caudal de gas demandado. Habitualmente, el regulador es una válvula de expansión, que pese a conseguir el objetivo de reducir la presión, desecha la energía como consecuencia del salto de presión. Con el fin de aprovechar la energía que se pierde en el proceso de regulación en las válvulas, aparece como una opción de alta eficiencia energética la tecnología de turbina de expansión (turboexpansor).

Los componentes básicos de un sistema de generación con turboexpanders se instalan en paralelo a la válvula reductora

de presión de la ERM por lo que la fiabilidad del suministro está garantizada (ver Figura 3). Los elementos básicos de los que consta la instalación de un turboexpander para generación eléctrica y que suponen la mayor parte del coste inicial son la *turbina de expansión*, el *generador eléctrico* acoplado a la turbina mediante una caja reductora y los *equipos de pre-calentamiento y post-calentamiento*. La mayoría de aplicaciones de turboexpansor para generación eléctrica requieren ya sea un pre-calentamiento o un post-calentamiento del gas a fin de evitar la condensación de impurezas y agua presentes en el gas natural durante el proceso de expansión. Si estas etapas son implementadas por calderas auxiliares consumiendo gas natural u otro combustible o intercambiadores de calor que recuperan el calor de otras corrientes de proceso afectan no solo al rendimiento de la instalación sino también a los costes de operación y mantenimiento [1 y 3].

En la siguiente tabla se muestra una comparación entre un regulador de presión que utiliza una válvula de expansión y un turboexpansor según la revisión realizada por Dariusz Kowala en 2009 [8].

Varios autores [4, 8, 9, 11, 12,13, 15 y 16] establecen que el turboexpansor puede simularse como una expansión adiabática del gas en el que se extrae trabajo del volumen de control. Las irreversibilidades del proceso se incluyen como un rendimiento isoentrópico. Este rendimiento es

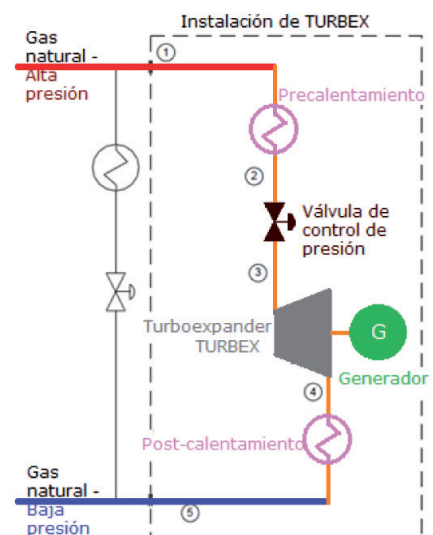


Figura 3: Esquema de funcionamiento de turboexpander en una ERM

	Regulador	Turboexpander
Producción de trabajo	No	Sí
Energía del gas	Perdida	Utilizada
Descenso de temperatura	0.5 °C/bar	2 °C/bar
Fuerzas que causan la caída de presión	Fricción	Turbina

Tabla 1: Comparación regulador con turboexpansor

la razón entre el trabajo real realizado por el sistema y la cantidad de trabajo que es teóricamente posible sin irreversibilidades (Ver Figura 4).

Conocidos los valores de entalpía a la entrada de la turbina, y entropía para el caso ideal, y combinándolos con el rendimiento podemos determinar la entalpía de salida real. La salida de potencia de la turbina se calcula conociendo el caudal a través de ella y el cambio de entalpía entre la entrada y la salida. Para calcular estos valores se utilizan las siguientes expresiones:

$$\eta = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}}$$

$$\dot{W} = \dot{m}_{TE} \times (h_1 - h_2)$$

donde h_1 y h_2 son las entalpías de entrada y salida del turboexpansor, h_{2s} es la entalpía de salida para expansión isoentrópica, η es la eficiencia isoentrópica, $\dot{m}_{TE}$ es el caudal de gas natural a través del turboexpansor y $\dot{W}$ es la potencia en kW. Las eficiencias del reductor de velocidad y del generador representan las pérdidas más significativas de la potencia de salida de la turbina. La potencia mecánica obtenida en el turboexpansor multiplicada por la eficiencia de la caja de cambios y del generador nos permitirá obtener la potencia eléctrica del sistema usando la siguiente expresión:

$$P_{\text{eléctrica}} = \dot{W} \times \eta_{\text{reductora}} \times \eta_{\text{generador}}$$

donde $P_{\text{eléctrica}}$ es la potencia eléctrica total generada por el sistema en kW, $\dot{W}$ es la potencia mecánica del turboexpansor en kW, $\eta_{\text{reductora}}$ y $\eta_{\text{generador}}$ son las eficiencias de la caja de cambios y el generador.

En la Figura 5 se representan las tres posibles formas de expandir el gas para reducir su presión hasta la presión requerida.

1. Expansión en la válvula sin pre-calentamiento. La corriente de gas se expande a entalpía constante, por lo que no produce trabajo, esta expansión lleva asociada una reducción de

temperatura de aproximadamente 0.5 °C/bar.

2. Expansión en la turbina sin pre-calentamiento. La corriente de gas se expande a entropía constante lo que origina una variación entre la en-

talpía de entrada y la salida, por lo que se puede obtener trabajo. Esta expansión lleva asociada una reducción de temperatura más acusada que el producido en una válvula, de aproximadamente 1.5-2°C/bar. La temperatura de salida se encuentra muy por debajo de la zona de seguridad de trabajo, lo que producirá con toda seguridad hidratos en estado líquido que pueden dañar la turbina o los elementos aguas abajo de la misma.

3. Expansión en la turbina con pre-calentamiento. El gas se calienta en una caldera auxiliar antes de su entrada a la turbina para asegurar

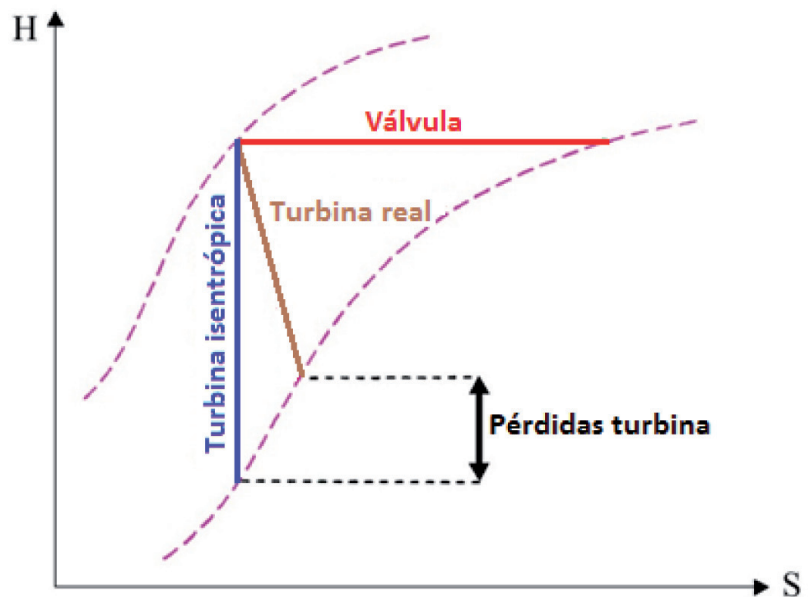


Figura 4: Comparación termodinámica entre válvula y turboexpansor [8]

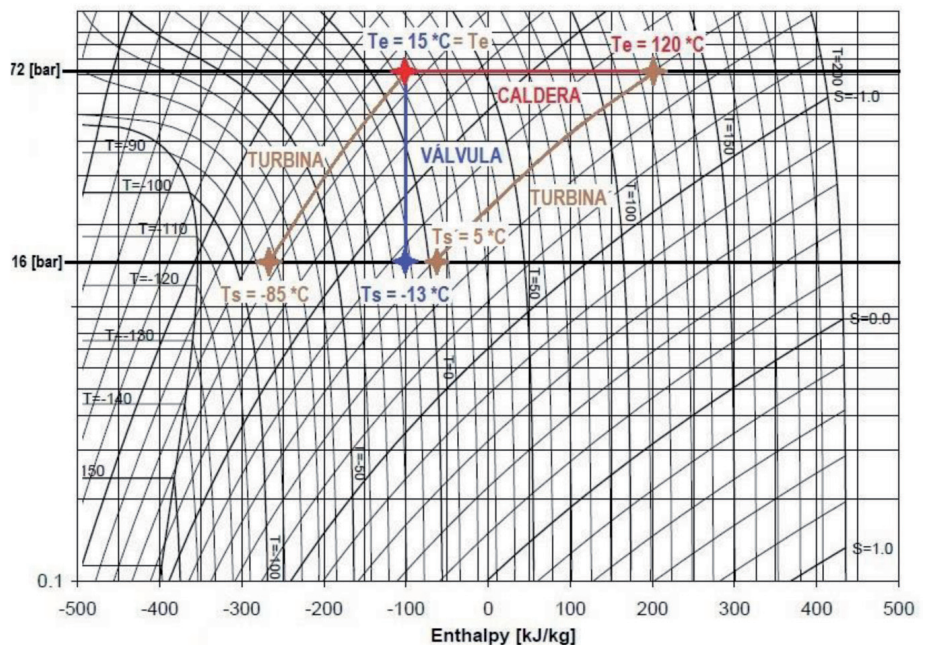


Figura 5: Expansión turbina/válvula

una temperatura de salida que sea como mínimo mayor a 0 °C y evitar la condensación de hidratos.

Esta revisión del proceso de expansión ilustra, sin duda, la necesidad de la etapa de precalentamiento al usar el turboexpander, pues el gas natural se sub-enfría mucho más que en las válvulas convencionales.

Otros autores [1, 4, 9, 11, 12, 13, 15 y 16] expresan estas mismas ecuaciones en relación a la presión de entrada y salida, y desarrollan diversos cálculos teóricos de la potencia eléctrica generable en función de los caudales y saltos de presión disponibles. De esta primera revisión y para mostrar el orden de magnitud de la aplicación del turboexpander para generar electricidad en los saltos de presión del gas, se puede decir que por cada 30.000 Nm³/h de caudal de gas natural con un salto de presión de 2:1 se puede producir una potencia eléctrica de 1 Mw, siendo necesario un precalentamiento de 2°C por cada bar que vaya a expandir el gas para evitar la licuefacción de las impurezas que contiene el gas natural (80% -98% metano).

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DE LA APLICACIÓN DE LOS TURBOEXPANDERS PARA GENERACIÓN ELÉCTRICA EN LA EXPANSIÓN DEL GAS NATURAL

Durante los últimos años se han analizado numerosas referencias bibliográficas entre cuyas palabras clave aparecía la palabra turboexpansor con el objetivo de extraer de ellas las relacionadas con la aplicación de generación eléctrica por la expansión del gas natural. El objetivo de esta búsqueda era obviamente poder evaluar la aplicación y definir mejor el estado del arte actual.

Para facilitar la revisión de esta información relevante sobre los turboexpansores se han llevado a cabo las siguientes acciones:

A	DEFINICIÓN DE TURBOEXPANDER. Se aclara en qué consiste esta tecnología de generación de energía.
B	ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO. No es necesario que el artículo muestre el esquema gráfico como tal, sino al menos describan los elementos auxiliares.
C	PRECALENTAMIENTO EFICAZ. Por ejemplo una pila de combustible o algún elemento auxiliar acoplado para aumentar la eficiencia.
D	ESTUDIO ECONÓMICO. Se incluyen en este criterio los artículos que demuestran datos económicos a partir estudios de investigación.
E	INSTALACIONES. Se nombran alguna o algunas plantas energéticas en las que se ha llevado a cabo esta tecnología.

Tabla 2: Criterios para los Contenidos Relevantes de referencias bibliográficas

- Definición de una tabla en el que se haga un desglose de características de cada referencia bibliográfica. Se corresponde con la Tabla 2
- Clasificación de la información. El objetivo es valorar la calidad de información expuesta en cada referencia. Para ello se han definido una serie de *Contenidos Relevantes*, y a consecuencia de estos últimos se ha definido la *Relevancia de la referencia*. Tabla 3.

1	Sólo A
2	A+B, o bien, A+E
3	A+B+C, o bien, A+D+E
4	A+B+D+E

Tabla 3: Relevancia de la referencia bibliográfica

Según el número de contenidos relevantes presentados en la Tabla 3, se valora del 1 (un criterio relevante) al 4 (4 criterios relevantes) la relevancia de la información mostrada en cada referencia bibliográfica.

En la Tabla 4 se muestra un ejemplo de la información recopilada aplicando estos criterios, acerca de la generación de energía eléctrica mediante turboexpander mostrándola con su clasificación en cuanto a la relevancia.

Aplicando estos criterios propuestos se facilita al investigador o persona interesada en este campo tabular las referencias y clasificar su importancia.

En los últimos 15 años diversas universidades y organismos (más de 30) han revisado esta aplicación realizando simulaciones y calculando los potenciales de instalaciones en Bangladesh [1,15], Irán [4,9,16], Canadá [5], Estados Unidos [3], Polonia [8,12], Rep. Checa [11] y recientemente en Turquía [13]. Esta última referencia contiene a su vez otras 45 referencias.

3. INSTALACIONES Y FABRICANTES

A la hora de validar la viabilidad de esta aplicación, es importante también revisar los fabricantes de estas máquinas y conseguir listar a través de la información que suministran cuál es la experiencia en instalaciones de uso comercial.

Para facilitar el análisis de este tipo de información hemos tabulado al fabricante, con el país de origen, los modelos que fabrican relacionados con la aplicación, si dispone de catálogo o no, su enlace y una categoría de clasificación en base al número de resultados de búsqueda en internet de ese fabricante. Esta categoría la hemos denominado *Relevancia del fabricante* y se ha llevado a cabo por el número

REFERENCIA	AÑO	FUENTE/AUTOR	CONTENIDOS RELEVANTES	RELEVANCIA
POWER GENERATION OPPORTUNITIES IN BANGLADESH FROM GAS PRESSURE REDUCING STATIONS	2.004	Arshad Mansoor	A+B	2
POWER GENERATION FROM PRESSURE REDUCTION IN THE NATURA GAS SUPPLY CHAIN IN BANGLADESH	2.010	Mohammed Mahabubur Rahman	A+B+E	3
RETROFIT OF TEHRAN CITY GATE STATION, C.G.S., NO.2 BY USING TURBOEXPANDER	2.010	Ramin Taheri Seresht y Hassan Khodaei Jalalabadi,	A+B+D+E	4
SASKATOON	-	Kevin Hudson	A+E	2
NATURAL GAS PRESSURE MAKING CLEAN ENERGY	2009	Natural Gas America	A	1

Tabla 4: Listado de referencias clasificadas

de resultados, acotando 4 tipos de fabricantes (A-D) aplicando los criterios de la Tabla 5.

En la Tabla 6, se muestra un resumen de la información de los fabricantes de turboexpander obtenida.

De esta forma hemos revisado más de 20 fabricantes, que con su presencia internacional nos permite concluir que es una tecnología con cierta madurez y disponible comercialmente. Durante la revisión de la información que aportan los fabricantes y de las referencias bibliográficas, hemos ido confeccionando un listado con las instalaciones referenciadas que se presentan en la Tabla 7, en la que se muestra el cliente, país, fabricante que aporta el equipo, años

de instalación, potencia eléctrica y número de etapas de la instalación.

En el año 2008, la Asociación de Gas Natural de Estados Unidos [3] mencionaba en un informe que se conocían instalaciones de turboexpanders en estaciones de regulación de presión de gas natural que sumaban unos 23 Mw, sin embargo en nuestra revisión hemos podido constatar más de 40 instalaciones que suman unos de 150 Mw.

4. CONCLUSIONES

La aplicación de los turboexpander para generación eléctrica, sustituyendo

a las válvulas de regulación en los saltos de presión durante el transporte del gas natural, demuestra ser una tecnología conocida a nivel internacional después de analizar las referencias bibliográficas y la información que aportan los fabricantes, sin embargo, no hemos conseguido recopilar un gran número de referencias de instalaciones comerciales. De los informes del 2008 [3] con más de 20 Mw solo hemos detectado a fecha del 2012 más de 120 Mw.

Aplicando ciertos criterios de relevancia se han conseguido más de 30 referencias que consolidan el conocimiento en el ámbito universitario donde

	Nº RESULTADOS DE BUSQUEDA
A	1 a 100.000
B	100.001 a 1.000.000
C	1.000.001 a 100.000.000
D	Mayor de 100.000.000

Tabla 5: Criterio clasificación de fabricantes

	VOITH TURBO BHS GETRIEBE, MAN DIESEL&TURBO, RMG GROUP, SIEMENS
	AIRCO,ELLIOT GROUP, EMERALD POWER, LA TURBINE,LANGSON, MAFI-TRENCH
	CRYOSTAR
	ATLAS COPCO
	TURBOGAZ, ENERGY
OTHER	HONEYWELL, TRICONEX,GELIYMASH,TRANSPACIFIC ENVIROENERGY

Tabla 6: Fabricantes de turboexpansor

CLIENTES	PAIS	FABRICANTE	AÑOS	POTENCIA (KW)
ELECTRABEL-SIBELGAS-SPE	BELGICA	ATLAS COPCO	1997- 2002	9.500
ENRON	TURQUIA	ATLAS COPCO	2000	2.350
EWV+ STADTWERKE HEIDELBERG + KRAFTWERKE MAINZ-WIESBADEN+ STADTWERKE + GVM	ALEMANIA	ATLAS COPCO + CRYOSTAR	1986 1992 - 98	16.740
MINISTERIO IRANI DE ENERGIA	IRAN	ATLAS COPCO	1997	32.000
SKAERBAEKVAERTET	DINAMARCA	ATLAS COPCO	1996	5.000
GAZMUVEK FOVAROSI	HUNGRIA	ATLAS COPCO	1995	2.950
TECHINT + MONTEDIPE	ITALIA	ATLAS COPCO + CRYOSTAR	1988 -93	16.006
ELECTRICAS REUNIDAS	ESPAÑA	ATLAS COPCO	1985	500
SAN DIEGO GAS + HAMILTON + AGAWAM	E.E.U.U.	ATLAS COPCO	1982 - 87	4.912
MOSENERGO	RUSIA	Energy	1991-2007	5.000
GOMELENERGO	BIELORRUSIA	Energy + Turbogaz	1991-2007	11.500
-	SUIZA	CRYOSTAR	-	3.050
ENBRIDGE + SASKATTON	CANADA	CRYOSTAR	2001-12	4.300
-	HOLANDA	CRYOSTAR	-	5.300
-	UCRANIA	TURBOGAZ	1991-2007	23.800
-	INGLATERRA	-	2009	2.000
			TOTAL	144.908

*Nota: El símbolo "-"denota que esa información es desconocida

Tabla 7: Tabla de instalaciones de turboexpander con generación eléctrica

se ha revisado de una forma u otra esta aplicación. Se han localizado más de 20 fabricantes, con presencia internacional que permiten suponer la madurez de la tecnología y de su aplicación de generación eléctrica. Sin embargo, aunque se han conseguido más de 40 instalaciones que suman unos 150 Mw instalados, lo cual es un avance con respecto al informe del 2008 [3], consideramos que es una cantidad muy pequeña a nivel mundial. En las referencias revisadas sobre esta tecnología hay una coincidencia en los autores de diversos factores que pueden favorecer su futura implantación:

- Retorno de inversión asegurado.
- Tecnología "sencilla", fiable y con coste marginal de operación y mantenimiento.
- Produce energía limpia (sin emisiones de CO₂) aprovechando el salto de presión del transporte del gas natural.
- Es una tecnología que va asociada al desarrollo de los gaseoductos de transporte y distribución y a grandes consumidores de gas natural.
- Ocupa poco espacio y no necesita una gran inversión (como máximo 1000 \$/kW generable).

En definitiva, los turboexpanders son una tecnología que puede contribuir a mejorar la eficiencia del sector energético, fiables tecnológicamente y una opción económica a evaluar. Dependiendo de la aplicación son muy recomendables para producir electricidad sin aumentar significativamente las emisiones de CO₂.

Una explicación por la que en España y quizás a nivel mundial, no son muy conocidos puede deberse a que debido al sub-enfriamiento que se produce en la expansión la necesidad de pre- o post-calentamiento dificulta encontrar localizaciones donde se pueda integrar con instalaciones que dispongan de corrientes calientes que eviten así la necesidad de instalación de calderas de calentamiento que hacen subir los costes de operación por el consumo de combustible asociado, lo cual finalmente compromete la viabilidad económica. Otro factor que puede frenar su instalación es la necesidad de infraestructura eléctrica que permita su conexión a la red. El último factor que nos preocupa es la consideración legal y jurídica de estas instalaciones pues si fueran calificadas como renovables o cogeneraciones podrían acceder a precios de venta de electricidad y ayudas económicas más favorables. Al igual que en España se ha producido el desarrollo del sistema gasista y el gas como energía tan relevante, am-

bos eventos son relativamente recientes. Se revela por tanto la generación eléctrica distribuida en los saltos de presión usando turboexpansor como una oportunidad de negocio a evaluar nuevamente y una tecnología a re-descubrir que permitiría mejorar la eficiencia de los sistemas energéticos.

PARA SABER MÁS

- [1] Arshad Mansoor, "Power generation opportunities in Bangladesh from gas pressure reducing stations", 3ª Conferencia Internacional de Ingeniería Eléctrica e Informática, ICECE, Dhaka, Bangladesh. 2.004 Disponible en web <http://www.buet.ac.bd/icece/pub2004/P115.pdf>
- [2] Bloch H, Soares C. "Turboexpanders and process applications". Boston: Gulf Professional Publishing . 2001
- [3] Bruce A. Hedman;; "Waste energy recovery opportunities for interstate natural gas pipelines"; Gulf Coast Clean Energy; Interstate Natural Gas Association of America (INGAA). 2.008
- [4] ChaharMahal Et Bakhtiari Province Gas Company; "An investigation of the performance of a hybrid turboexpander-fuel cell system for power recovery at natural gas pressure reduction stations" 2.010.
- [5] Clifford Robert Howard; "Hybrid turboexpander and fuel cell system for power recovery at natural gas pressure reduction stations"; Queen's University (Kingston, Ontario, Canadá). 2.009; Tesis doctoral disponible en la web: http://qspace.library.queensu.ca/bitstream/1974/5314/1/Howard_Clifford_R_200911_MASc.pdf
- [6] Cryostar; disponible en <http://www.cryostar.com/web/green-energy-system.php>
- [7] Drew Robb; "Harvesting pipeline energy to produce electricity" Revista Power Engineering; PennEnergy. Disponible en web: <http://www.pennenergy.com/index/power/display.articles.power-engineering.volume-111.issue-11.departments.dg-update.harvesting-pipeline-energy-to-produce-electricity.html>
- [8] Dariusz Kowala; "Using the gas pressure potential for electricity generation at pressure reduction stations"; Silesian University of Technology (SUT) 2.009.
- [9] Ebrahim Khalili Ardali Et Esmaeil Heybatian . "Energy regeneration in natural gas pressure reduction stations by use of gas turbo expander; evaluation of available potential in Iran" www.igu.org National Iranian Gas Company. 2.009
- [10] Energy; "Expander-generator set with a rating of 5.000 kW" Disponible en web: <http://www.energia.com.ua/endga5000.html>
- [11] Jaroslav Poživil ; "Use of expansion turbines in natural gas pressure reduction stations". Instituto de tecnología química de Praga, Departamento de informática e ingeniería de control. 2.004 <http://actamont.tuke.sk/pdf/2004/n3/27pozivil2.pdf>
- [12] Kostowski, Wojciech Et Sergio Uson. "Thermoeconomic assesment of a natural gas expansion system integrated with a co-generation unit". Applied Energy. Elsevier. 2012
- [13] Neseli, Mehmet Alparslan, Onder Ozgener y Leyla Ozgener. "Energy and exergy Analysis of electricity generation from natural gas pressure reducing stations". Energy Conversion and Management. Elsevier. 2015
- [14] Marybeth Nored, Melissa Wilcox, Robert McKee. "Waste heat recovery technology overview"; Southwest Research Institute. 2.009.
- [15] Mohammed Mahabubur Rahman, "Power generation from pressure reduction in the natural gas supply chain in Bangladesh", Journal of Mechanical Engineering, Universidad de Ingeniería y Tecnología de Bangladesh . 2.010
- [16] Neseli, Mehmet Alparslan, Onder Ozgener y Leyla Ozgener (2015), Energy and exergy Analysis of electricity generation from natural gas pressure reducing stations. Energy Conversion and Management. Elsevier.
- [17] Ramin Taheri Seresht y Hassan Khodaei Jalalabadi, Yasun Farayand "Retrofit of Tehran city gate station, c.g.s., no.2 by using turboexpander"; Conferencia de Tecnología Energética Industrial (IETC) y la Universidad Tecnológica de K.N. Toosi. 2010.