

## **ENERGY EFFICIENCY PROJECTS WITH TURBOEXPANDERS APPLICATION TO COMBINED CYCLE POWER PLANTS**

Delgado Calín, Ginés  
Universidad Politécnica de Cartagena

This paper presents a feasibility analysis of the power generation through the expansion of high pressure and flows of natural gas in the regulations stations of CCGTs power plants in Spain. Based on their yearly production we can predict the potential generation in the turboexpanders. Based on those calculations we conclude that only those CCGTs maintaining high yearly production can improve 0,2% their energy efficiency, reducing costs, incrementing benefits with payback in less than 2 years. Environmental impact is improved by CO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> emissions reduction per Mwh produced.

**Keywords:** efficiency; energy; feasibility; projects

## **PROYECTOS DE EFICIENCIA ENERGETICA APLICANDO TURBOEXPANDERS A CICLOS COMBINADOS EN ESPAÑA**

Esta ponencia analiza la viabilidad de proyectos de implantación de la tecnología de generación eléctrica mediante expansión de caudales de alta presión de gas natural en las estaciones de regulación de los ciclos combinados (C.C) en España. En base a los datos de producción anual de los C.C. publicados se deduce el potencial generador de los turboexpanders. Se concluye que solo en aquellos C.C. que mantienen una alta producción anual se puede mejorar un 0,2% su eficiencia energética, con una amortización menor de 2 años, disminuyendo su consumo de gas natural por Mwh producido y por tanto reduciendo el impacto medioambiental de las emisiones de CO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>.

**Palabras clave:** eficiencia; energía; viabilidad; proyectos

Correspondencia: Gines Delgado Calin - gines.delgado@upct.es

Agradecimientos: Ana Nieto Morote (UPCT) y Fernando Santamaria (Enagas)

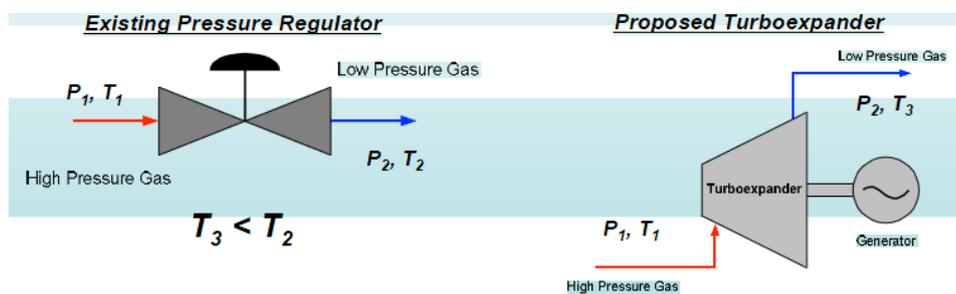
## 1. Introducción

El turboexpander o turbina de expansión es una turbomáquina en la que un gas a alta presión se expande al entrar en contacto con los alabes de forma radial o axial. El movimiento del conjunto de álabes y rotor producen un trabajo (Bloch & Soares 2001) que dependiendo de la máquina acoplada (compresor, freno, generador, etc.) deriva en distintas aplicaciones industriales (Holm 1983). En esta ponencia se presentan los resultados de la aplicación con generador acoplado a la entrada de las centrales de ciclo combinado, permitiendo así la cogeneración eléctrica consiguiendo al mismo tiempo el salto de presión entre el gaseoducto y el consumidor del gas natural. El ciclo combinado es una industria que se presenta como un gran consumidor de caudal y salto de presión suficientes para obtener una considerable rentabilidad económica.

La Figura 1 resume la aplicación del turboexpander comparándola con una válvula, se trata de expandir el gas natural en una máquina capaz de arrastrar un generador en vez de consumir esa energía en los internos de las válvulas de control que se instalan normalmente.

**Figura 1. Comparación válvula de expansión con turboexpander**

(Fuente: Nored, Wilcox & Mackee 2009)



El turboexpander por tanto es una máquina que puede realizar la misma función que las válvulas de control, es decir, la regulación de presión de un fluido gaseoso pero aprovechando la energía de dicho salto de presión.

La ponencia es un resumen del estudio de potencial viabilidad de generación eléctrica con turboexpanders en ciclos combinados en España.

De los 111 clientes que en España (Sedigas y Enagas, 2014) consumen gas natural con más de 60 bares, 51 son ciclos combinados y gracias a la publicación de los datos del sector eléctrico (REE, 2005-2014) disponemos de sus perfiles de consumo de gas natural, ya que estos se derivan de la generación eléctrica que han vertido en barras de la central y que esta monitorizada por REE y reportada en sus informes anuales. Estos datos nos permiten los cálculos necesarios que muestren en detalle el potencial de cogeneración con turboexpander.

En una primera aproximación, podemos calcular el potencial del turboexpander basándonos en el total de generación anual.



Además de la mejora en el rendimiento, la tasa de emisiones de un 1 KWh de electricidad generada es de 0,4 kg CO<sub>2</sub> / KWh, lo cual supondría a nivel anual una reducción en emisiones de 61.320 Ton CO<sub>2</sub>/año.

## 2. Metodología de cálculo para la viabilidad del turboexpander aplicado en ciclos combinados en España

Estudiando los ciclos combinados, su producción anual y aplicando los cálculos de potencia generable por el turboexpander en función de la producción de cada central eléctrica, podemos obtener una cifra de producción y de ingresos que nos permitirá concluir al menos un análisis de viabilidad inicial para el parque de ciclos combinados instalados en España. Este primer estudio, aportara una visión general que permitirá seleccionar los emplazamientos más apropiados para realizar estudios más detallados de viabilidad teniendo en cuenta los parámetros de cada localización.

En España desde el 2002 hasta el 2011, se instalaron 51 centrales de ciclo combinado sumando 25.321 Mw. En la Tabla 1 se muestra la generación de cada central en el periodo 2010-2014 extraída de los reportes anuales de REE en ese periodo en GWh.

**Tabla 1. Producción anual de cada CCCC de España 2010-14**

(Elaboración propia a partir de datos de REE)

| <b>CCCC \ Año</b> | <b>2010</b> | <b>2011</b> | <b>2012</b> | <b>2013</b> | <b>2014</b> |
|-------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Aceca 3           | 1.225       | 909         | 457         | 189         | 179         |
| Aceca 4           | 1.838       | 2.444       | 2.168       | 954         | 908         |
| Algeciras 3       | 126         | 1.754       | 518         | 0,2         | 32          |
| Amorebieta        | 2.483       | 1.029       | 849         | 169         | 176         |
| Arcos 1           | 170         | 121         | 0           | 0           | 1           |
| Arcos 2           | 63          | 18          | 1           | 15          | 7           |
| Arcos 3           | 2.229       | 1.094       | 175         | 102         | 76          |
| Arrúbal 1         | 695         | 424         | 672         | 228         | 17          |
| Arrúbal 2         | 612         | 575         | 670         | 177         | 149         |
| Bahía de Bizkaia  | 2.939       | 2.283       | 3.349       | 3.032       | 2.835       |
| Besós 3           | 1.710       | 655         | 326         | 162         | 272         |
| Besós 4           | 2.183       | 1.715       | 1.941       | 2.186       | 2.247       |
| Besós 5           | 479         | 1.786       | 1.466       | 702         | 668         |
| Campo Gibraltar 1 | 2.194       | 1.467       | 1.164       | 209         | 0           |
| Campo Gibraltar 2 | 1.552       | 1.445       | 1.510       | 207         | 0           |
| Cartagena 1       | 726         | 1.422       | 1.201       | 794         | 1.007       |
| Cartagena 2       | 1.062       | 1.030       | 904         | 582         | 718         |
| Cartagena 3       | 952         | 1.193       | 805         | 945         | 528         |
| Castejón 1        | 1.454       | 530         | 335         | 243         | 192         |

|                       |               |               |               |               |               |
|-----------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Castejón 2            | 704           | 204           | 7             | 0             | 0             |
| Castejón 3            | 1.350         | 488           | 521           | 138           | 198           |
| Castellón 3           | 93            | 169           | 72            | 50            | 9             |
| Castellón 4           | 2.619         | 2.419         | 746           | 479           | 344           |
| Castelnou             | 1.957         | 358           | 51            | 90            | 157           |
| Colón 4               | 771           | 755           | 386           | 165           | 181           |
| El Fangal 1           | 1.310         | 187           | 36            | 34            | 22            |
| El Fangal 2           | 1.028         | 239           | 111           | 19            | 26            |
| El Fangal 3           | 1.170         | 353           | 91            | 40            | 118           |
| Escatrón 3            | 3.359         | 1.129         | 907           | 3             | 32            |
| Escatrón Peaker       | 82            | 18            | 13            | 8             | 43            |
| Escombreras 6         | 1.161         | 1.111         | 36            | 0             | 0             |
| Málaga 1 cc           | 1.401         | 2.068         | 2.089         | 1.713         | 1.248         |
| Palos 1               | 2.022         | 1.124         | 575           | 335           | 133           |
| Palos 2               | 1.944         | 887           | 686           | 440           | 396           |
| Palos 3               | 1.719         | 894           | 844           | 723           | 69            |
| Plana del Vent 1      | 213           | 801           | 1.091         | 258           | 302           |
| Plana del Vent 2      | 188           | 838           | 1.021         | 426           | 16            |
| Puentes G.Rodríguez 5 | 694           | 432           | 452           | 258           | 336           |
| Puerto de Barcelona 1 | 678           | 1.140         | 732           | 1.244         | 1.171         |
| Puerto de Barcelona 2 | 289           | 886           | 1.146         | 760           | 507           |
| Sabón 3               | 1.497         | 1.872         | 891           | 950           | 211           |
| Sagunto 1             | 2.127         | 1.569         | 2.074         | 1.547         | 894           |
| Sagunto 2             | 2.255         | 1.238         | 1.422         | 946           | 1.388         |
| Sagunto 3             | 2.119         | 1.496         | 589           | 1.028         | 1.501         |
| San Roque 1           | 1.109         | 1.654         | 1.914         | 1.858         | 2.022         |
| San Roque 2           | 836           | 751           | 139           | 223           | 375           |
| Santurce 4            | 650           | 178           | 50            | 1             | 6             |
| Soto de la Ribera 4   | 1.418         | 1.379         | 629           | 236           | 232           |
| Soto de la Ribera 5   | 359           | 438           | 173           | 81            | 79            |
| Tarragona Endesa      | 1.079         | 353           | 57            | 0             | 0             |
| Tarragona Power       | 1.712         | 1.414         | 526           | 138           | 31            |
| <b>Total</b>          | <b>64.605</b> | <b>50.736</b> | <b>38.588</b> | <b>25.087</b> | <b>22.059</b> |

Por tanto, en base a la Tabla 1 si todas las centrales hubieran instalado en sus estaciones de regulación un turboexpander en paralelo se podría haber co-generado el siguiente potencial que se muestra en la siguiente Tabla 2. Para determinar estos resultados, por

cada 400 MWh se pueden generar 1 MWh con turboexpanders. Por tanto, aplicando esta regla obtenemos la siguiente Tabla.

**Tabla 2. Generación potencial con turboexpanders en los CCCC.**

|                              | 2010    | 2011    | 2012    | 2013    | 2014    |
|------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| <b>Total generación CCCC</b> | 64.605  | 50.736  | 38.588  | 25.087  | 22.059  |
| <b>Pot. Turboexpanders</b>   | 162     | 127     | 96      | 63      | 55      |
| <b>Total Energía España</b>  | 273.318 | 264.903 | 268.807 | 260.327 | 253.564 |

\*Unidades GWh/año

Como se puede apreciar las cantidades cogeneradas potencialmente no son grandes cantidades si las comparamos con la generación anual del propio ciclo combinado o del total del consumo anual de todo un país como España, pero debemos recordar que son MW “limpios”, sin haber emitido ni una sola tonelada de CO<sub>2</sub> a la atmosfera.

Una vez analizados los ciclos combinados en su conjunto y el potencial del turboexpander en todos ellos, a continuación se realiza un estudio central a central para evaluar más en detalle no solo su viabilidad técnica sino también mostrar un primer cálculo de los ingresos que se podrían haber obtenido con la venta de la electricidad cogenerada.

Podemos calcular por central la cantidad de energía que podrían haber cogenerado si hubieran tenido instalado el turboexpander en los últimos 5 años. Estos cálculos se reflejan en la Tabla 3. Se presentan los datos ordenando la Tabla 3 de mayor a menor en producción de GWh y aplicando un precio de venta medio de 50 €/MWh. Esta tabla así presentada representa el ranking de los ciclos combinados en base a su potencial de generación con turboexpanders acumulado en los últimos 5 años 2010-14.

**Tabla 3. Lista ordenada de CCCC en últimos 5 años en base a potencial turboexpander**

| <b>CCCC</b>      | <b>Total GWh/5 años</b> | <b>Ingresos MME</b> |
|------------------|-------------------------|---------------------|
| Bahía de Bizkaia | 36,10                   | 1.804.750           |
| Besós 4          | 25,68                   | 1.284.000           |
| San Roque 1      | 21,39                   | 1.069.625           |
| Málaga 1 cc      | 21,30                   | 1.064.875           |
| Aceca 4          | 20,78                   | 1.039.000           |
| Sagunto 1        | 20,53                   | 1.026.375           |
| Sagunto 2        | 18,12                   | 906.125             |
| Sagunto 3        | 16,83                   | 841.625             |
| Castellón 4      | 16,52                   | 825.875             |
| Escatrón 3       | 13,58                   | 678.750             |
| Sabón 3          | 13,55                   | 677.625             |
| Cartagena 1      | 12,88                   | 643.750             |

|                        |       |         |
|------------------------|-------|---------|
| Besós 5                | 12,75 | 637.625 |
| Campo Gibraltar 1      | 12,59 | 629.250 |
| Puerto de Barcelona 1  | 12,41 | 620.625 |
| Campo Gibraltar 2      | 11,79 | 589.250 |
| Amorebieta             | 11,77 | 588.250 |
| Cartagena 3            | 11,06 | 552.875 |
| Palos 2                | 10,88 | 544.125 |
| Cartagena 2            | 10,74 | 537.000 |
| Palos 3                | 10,62 | 531.125 |
| Palos 1                | 10,47 | 523.625 |
| Soto de la Ribera 4    | 9,74  | 486.750 |
| Tarragona Power        | 9,55  | 477.625 |
| Arcos 3                | 9,19  | 459.500 |
| Puerto de Barcelona 2  | 8,97  | 448.500 |
| Besós 3                | 7,81  | 390.625 |
| Aceca 3                | 7,40  | 369.875 |
| Castejón 1             | 6,89  | 344.250 |
| Castejón 3             | 6,74  | 336.875 |
| Plana del Vent 1       | 6,66  | 333.125 |
| Castelnou              | 6,53  | 326.625 |
| Plana del Vent 2       | 6,22  | 311.125 |
| Algeciras 3            | 6,08  | 303.775 |
| San Roque 2            | 5,81  | 290.500 |
| Escombreras 6          | 5,77  | 288.500 |
| Colón 4                | 5,65  | 282.250 |
| Arrúbal 2              | 5,46  | 272.875 |
| Puentes G. Rodríguez 5 | 5,43  | 271.500 |
| Arrúbal 1              | 5,09  | 254.500 |
| El Fangal 3            | 4,43  | 221.500 |
| El Fangal 1            | 3,97  | 198.625 |
| Tarragona Endesa       | 3,72  | 186.125 |
| El Fangal 2            | 3,56  | 177.875 |
| Soto de la Ribera 5    | 2,83  | 141.250 |
| Castejón 2             | 2,29  | 114.375 |
| Santurce 4             | 2,21  | 110.625 |
| Castellón 3            | 0,98  | 49.125  |

|                 |      |        |
|-----------------|------|--------|
| Arcos 1         | 0,73 | 36.500 |
| Escatrón Peaker | 0,41 | 20.500 |
| Arcos 2         | 0,26 | 13.000 |

En la Tabla 3 se observa como 8 ciclos combinados superan o están cerca del millón de euros de ingresos por venta de electricidad en los últimos 5 años. Esto es una referencia interesante ya que la inversión media de un turboexpander de 1 MWh es de 1 MM€.

Considerando a efectos simplificadores que la amortización sea el cociente entre la Inversión Inicial y los ingresos brutos por venta de la electricidad.

Analizando los resultados de la tabla 3 según el siguiente criterio de amortización, se obtienen los siguientes resultados:

|                           |         |
|---------------------------|---------|
| Amortización > 100%       | 8 CCCC  |
| 40 < Amortización < 100 % | 18 CCCC |
| 10 < Amortización < 40 %  | 21 CCCC |
| Amortización < 10%        | 4 CCCC  |

En resumen, el éxito comercial que se hubiera conseguido en los últimos 5 años hubiera afectado a 26 centrales: 8 proyectos amortizados y dando beneficios y unos 18 con más del 40% amortizado. Estos resultados se ven afectados por la crisis económica sufrida en este periodo, sin embargo en los últimos 10 años, estimamos (en base a su generación anual) que al menos 36 de los 51 CCCC habrían amortizado el proyecto, es decir, una tasa de éxito comercial del 70%.

Veamos ahora, como quedan estas cifras teniendo en cuenta el factor de carga.

El factor de carga es el cociente entre la producción real y la producción total que hubiese podido alcanzar la central funcionando a potencia nominal en el conjunto de horas en las que ha estado acoplada (produciendo).

Esto significa que los grupos en realidad nunca están el 100% del tiempo a plena carga y por tanto no están consumiendo el 100% del gas natural que podríamos turbinar y cogenerar con él. Este factor de carga medio es del 51,2% en el año 2014.

Por tanto, se puede producir una minoración que debemos tener en cuenta para tener un análisis más preciso. Este fenómeno se explica entendiendo cómo funcionan los CCCC en los mercados eléctricos. Mayoritariamente se usan como respaldo de las renovables y por tanto operan en su mínimo técnico o un poco por encima para suministrar servicios auxiliares como secundaria, terciaria, desvíos, restricciones, etc. que les permiten optimizar sus ingresos.

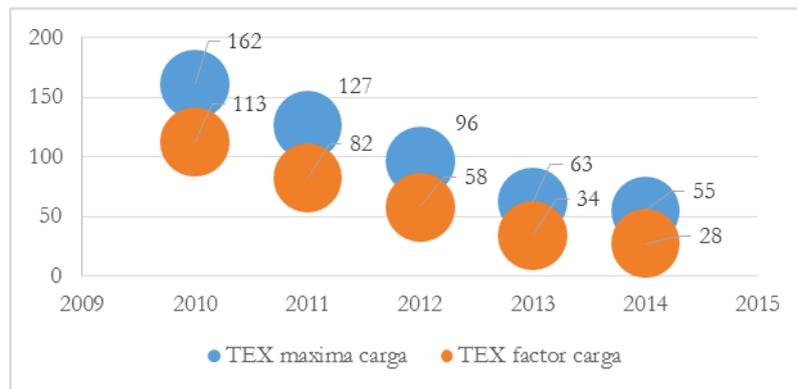
Aplicando la minoración nos queda una tasa de éxito menor:

|                           |         |
|---------------------------|---------|
| Amortización > 100%       | 0 CCCC  |
| 40 < Amortización < 100 % | 10 CCCC |
| 10 < Amortización < 40 %  | 28 CCCC |
| Amortización < 10%        | 13 CCCC |

El resumen del éxito comercial, teniendo en cuenta el factor de carga, sería que en 5 años 0 proyectos amortizados y dando beneficios y 10 con más del 40% amortizado. A largo plazo, en 10 años, al menos 24 de los 51 CCCC habrían amortizado el proyecto y generado beneficios, es decir, una tasa de éxito comercial aproximada del 50%.

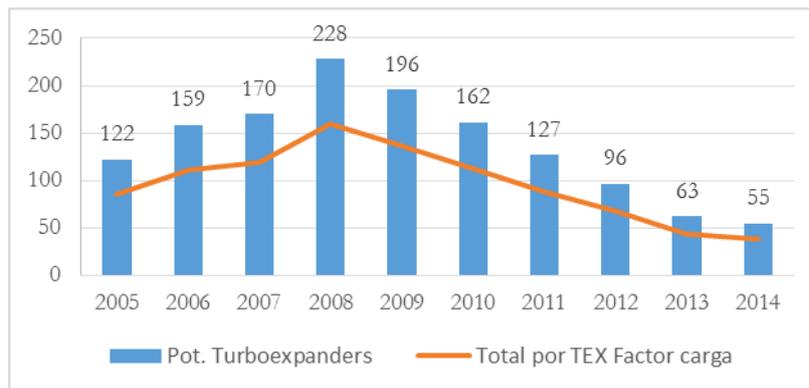
Las Figuras 3 y 4 muestran el rango de generación con turboexpander teniendo en cuenta un factor de carga del 100% para todas las plantas y un factor de carga del 70%, 65%, 60%, 55% y 50% medio para cada año y para todas las plantas a 5 o a 10 años.

**Figura 3. Producción de los turboexpanders con y sin factor de carga GWh /año en 5 años**



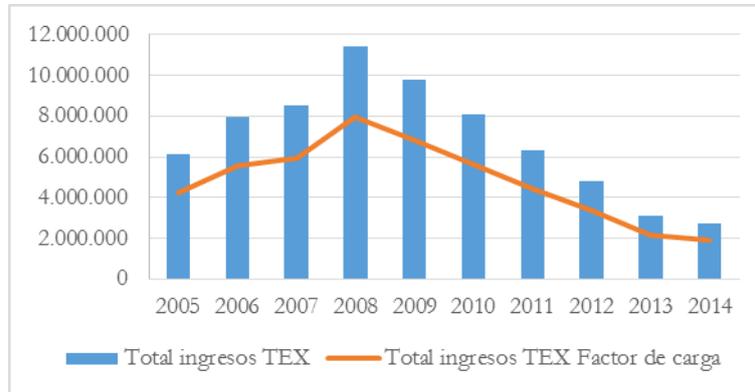
Por lo tanto, la generación total anual realmente debe localizarse entre ambos valores pues no conocemos el factor de carga de cada central en cada momento del año.

**Figura 4. 10 años de TEX en España – Potencia generable en GWh/año**

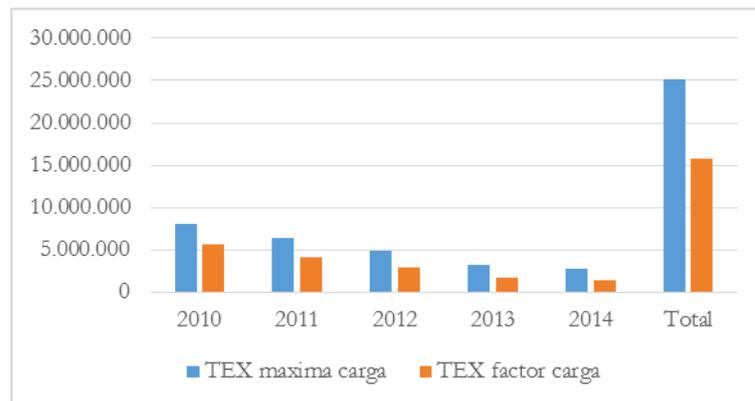


En la figura 5 se muestran los ingresos anuales por venta de electricidad de la generación producido por los turboexpanders. Hay que tener en cuenta además que los ingresos se calculan con un precio de venta medio anual de 50€/MWh.

**Figura 5. Ingresos en MM€ con TEX en España en últimos 10 años**



**Figura 6. Ingresos anuales y acumulados con y sin factor de carga en turboexpanders**



Las Figuras 5 y 6, por tanto, ilustran como el factor de carga de las centrales es importante tener en cuenta a la hora de estudiar la viabilidad económica, ya que el factor de carga de la central, determina el caudal quemado y por tanto el que fluye por el turboexpander disminuyendo su rendimiento y por tanto disminuyendo su capacidad de producir energía.

Una vez analizados los ciclos combinados en su conjunto en los últimos cinco años, y cada uno de ellos, pues se dispone de información de REE en ese detalle de estos últimos cinco años, a continuación volvemos a realizar el estudio globalmente del potencial del turboexpander pero ahora con una perspectiva a 10 años. Estos resultados se muestran en la Tabla 4.

**Tabla 4. 10 años de turboexpanders – energía e ingresos**

|                                     | 2005   | 2006   | 2007   | 2008   | 2009   | 2010   | 2011   | 2012   | 2013   | 2014   | Total   |
|-------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| Total ingresos TEX Factor de carga  | 4,28   | 5,56   | 5,96   | 7,99   | 6,85   | 5,65   | 4,44   | 3,38   | 2,20   | 1,93   | 48,23   |
| Total ingresos TEX MM€              | 6,11   | 7,94   | 8,52   | 11,41  | 9,78   | 8,08   | 6,34   | 4,82   | 3,14   | 2,76   | 68,90   |
| Pot. Turboexp. GWh/año              | 122    | 159    | 170    | 228    | 196    | 162    | 127    | 96     | 63     | 55     | 1.378   |
| Total pot. TEX Factor carga GWh/año | 86     | 111    | 119    | 160    | 137    | 113    | 89     | 68     | 44     | 39     | 965     |
| Total generación CCCC GWh/año       | 48.885 | 63.506 | 68.139 | 91.286 | 78.279 | 64.605 | 50.736 | 38.588 | 25.087 | 22.059 | 551.170 |

### 3. Conclusiones

Hemos podido calcular el potencial de generación con turboexpanders si todos los ciclos combinados en España desde el año 2005 hubieran instalado su máquina de turboexpanders. En cálculos generales, en los últimos 10 años se hubieran amortizado ya todas las instalaciones ya que de una inversión inicial de 51 CCCC se hubieran necesitado unos 51 MM€ y se hubieran cogenerado por valor de 68 MM€ y teniendo incluso en cuenta el factor de carga hubieran sido unos 48 MM€. Se habría co-generado entre 1.378 a 965 GWh de energía sin haber emitido ni una tonelada de CO<sub>2</sub>. Al contrario, hubiéramos evitado al menos unas 10 MM de ton de CO<sub>2</sub> en esos 10 años.

El ciclo combinado es una industria donde claramente se aprecia el beneficio de instalar el turboexpander.

Hemos realizado por tanto varios estudios: un estudio de aplicación de turboexpanders a nivel general en los ciclos combinados de España, un estudio a nivel general de los últimos 10 años y un estudio por ciclo en base a su producción en los últimos 5 años. Para todos ellos hemos usado el estimador de que por cada 400 MWh generados se hubiera generado 1 MWh en un turboexpander a la entrada del ciclo aunque también hemos tenido en cuenta como el factor de carga reduce el potencial.

Hemos realizado también en cada estudio una aproximación a la viabilidad económica suponiendo una inversión inicial de 1 MM€ y unos ingresos por venta de 50 €/MWh.

La conclusión general de esta ponencia es que la mayoría de los ciclos combinados hubieran amortizado la inversión si la hubieran realizado durante la puesta en marcha inicial de las instalaciones a pesar incluso de la bajada de producción que han tenido debido a la crisis económica de los últimos 5 años.

La conclusión particular es que con los datos de los últimos 5 años y sin disponer de una predicción o previsión de generación futura hay al menos unos 10 ciclos combinados a los

que se puede recomendar realizar un estudio de viabilidad detallado para decidir si la inversión en un proyecto de cogeneración con turboexpanders es viable y rentable a largo plazo.

#### **4. Referencias**

- Bloch H, Soares C. (2001). Turboexpanders and process applications. Boston: Gulf Professional Publishing.
- Holm J. (1983). Application of turboexpanders for energy conservation. Turbomach Int.; 24(1):26-31
- Enagas (2014). Informe anual de Enagas.
- Mirandola, A & Macor. (1988). An Experimental Analysis of an Energy recovery Plant by expansion of Natural Gas, Proc. Of the 23rd Intersociety Energy Conversion Engineering Conference.; Vol. 4, pp33-38, Denver –Colorado
- Nored, M., Wilcox M & McKee, R. (2009) Waste Heat Recovery Technology Overview. SWRI Southwest Research Institute. pp11.
- REE. Informe anuales de Red Eléctrica de España. El sistema eléctrico español. Años 2005-2014
- Sedigas (2014). Informe anual de Sedigas.