

Estado actual de la tecnología de las microturbinas de gas

J. C. Bruno, A. Hinestrosa y A. Coronas
CREVER
Universidad Rovira i Virgili

1. Introducción

Las microturbinas de gas, constituyen un tipo de turbinas de gas que han pasado de la etapa de prototipos experimentales a convertirse en una alternativa factible para la generación de energía eléctrica a pequeña escala. Estas microturbinas pueden suministrar energía eléctrica de forma local desde unos pocos kW hasta algunos centenares de kW, en conexión en paralelo a la red o en isla, como una fuente independiente de energía.

La generación distribuida mediante microturbinas de gas constituye una solución efectiva, alternativa o complementaria a la instalación de nuevas plantas de producción de energía eléctrica y al tendido de nuevas líneas de distribución de alta tensión. Con lo que de esta forma, se puede ayudar a paliar el déficit energético producido durante estos últimos años provocado por el creciente aumento anual de la demanda eléctrica por encima de las previsiones.

2. Características de las microturbinas

Las microturbinas de gas, son turbinas de combustión de pequeño tamaño, con unas características constructivas especiales y con potencias que actualmente se sitúan entre 28 y 200 kW.

Probablemente las características más importantes del sistema de producción distribuida de electricidad basado en las micro-

turbinas de gas, sea el bajo nivel de emisiones y de ruido, y el reducido peso y dimensiones de la instalación. Por ello, pueden ser colocadas en sitios donde se requiera la producción de energía eléctrica, calor y/o frío pero exista una limitación de espacio, o en lugares sensibles a la contaminación ambiental o acústica.

Las microturbinas, pueden clasificarse por su configuración en:

- Eje simple o eje doble. La configuración en un sólo eje, permite reducir los costes de producción y tiene un mantenimiento más fácil. Además el funcionamiento con un solo eje, permite montar el generador eléctrico en el lado opuesto a la salida de gases, con lo que éstos pueden salir en línea con el eje de la turbina, produciendo una menor pérdida de carga a la salida de gases, dando mayor potencia, y un menor consumo de combustible.

- Ciclo simple o con regeneración. En las de ciclo simple, se mezcla el aire comprimido con combustible y se realiza la combustión bajo condiciones de presión constante. Los gases calientes resultantes se expanden en la turbina, produciéndose trabajo. Las microturbinas de ciclo simple tienen un coste inferior y unas mayores aplicaciones del calor para cogeneración, que las microturbinas de ciclo regenerativo. Normalmente, las unidades de ciclo regenerativo usan un intercambiador de calor con el fin de recuperar calor de la corriente de salida de la turbina y transferirlo a la corriente de entrada del aire. El aire precalentado es

Durante los últimos años, se ha intensificado el uso de algunas tecnologías aplicables al campo de la cogeneración (ciclo combinado, inyección de vapor, refrigeración del aire de entrada, etc). Una de las nuevas tecnologías que más incrementará su presencia en el mercado en los próximos años, es la basada en el uso de las microturbinas de gas. Con ellas se consigue mejorar y ampliar el campo de aplicación de los sistemas de cogeneración a sistemas de pequeña potencia en donde anteriormente se consideraba totalmente inviable técnica y económicamente.

después utilizado en el proceso de combustión. Si el aire es precalentado, se necesitará menor cantidad de combustible (ahorro del 30-40 %) para alcanzar la temperatura requerida a la entrada de la turbina. El hecho de combinar las microturbinas con equipos de recuperación de energía, para su transferencia al aire de combustión, hace que con estos sistemas se pueda llegar a doblar la eficiencia eléctrica de la microturbina.

El uso de las microturbinas, ofrece un gran número de ventajas, en comparación con otras tecnologías de producción de energía a pequeña escala, como pueden ser los motores de gas natural, principalmente:

- Menor número de partes móviles.
- Tamaño compacto.
- Menor peso.
- Energía térmica recuperable en una sola corriente.
- Alta disponibilidad.
- Menor nivel de emisiones.
- Vida operativa más larga.

Estos sistemas serán de gran utilidad para ayudar a los consumidores de baja capacidad a reducir sus costes energéticos, mejorar la calidad de la energía eléctrica y minimizar el problema de los cortes de suministro.

3. Aplicaciones

Las microturbinas de gas pueden aplicarse en diferentes sectores. A continuación, se enumeran algunas de estas aplicaciones.

3.1. Microcogeneración

Los sistemas de microcogeneración, son sistemas de cogeneración de baja potencia, con los cuales, se puede generar energía eléctrica, producir agua caliente, vapor o refrigeración activada térmicamente.

Los sistemas de microcogeneración se fundamentan en la

idea de disponer de diversos centros de producción a pequeña escala de electricidad cercanos a los puntos de consumo de esta energía.

Las plantas convencionales más modernas de producción de energía eléctrica de ciclo combinado, poseen una eficiencia eléctrica más elevada que las microturbinas, pero presentan una serie de desventajas frente a éstas:

- En las centrales térmicas convencionales de ciclo combinado no es fácil el aprovechamiento del calor residual que se origina durante su funcionamiento.

- Existen también las pérdidas asociadas a las redes de transporte y distribución eléctrica por tratarse de producción centralizada de electricidad.

3.2. Vehículos de transporte

Los vehículos híbridos son vehículos que tienen dos fuentes de energía distintas para su propulsión. Generalmente una de estas fuentes está basada en la energía eléctrica combinada con un motor térmico (motor diésel, gasolina, etc.) y un sistema de baterías para almacenamiento de energía eléctrica.

Las microturbinas en vehículos híbridos permiten, entre otras ventajas, recargar las baterías del vehículo incrementando su autonomía y capacidad de carga. Para ello se emplea una versión de microturbina con generador de corriente continua.

3.3. Aplicación directa del calor

Esta aplicación consiste en la utilización directa del calor contenido en los gases de escape para diversas aplicaciones, entre las que se prevén como más destacadas las siguientes:

- Calefacción en invernaderos. Los gases de escape de las

microturbinas con lubricación por aire están exentos de restos de lubricantes, tienen un nivel de contaminantes muy bajo y un contenido en CO₂ que favorece el crecimiento de las plantas.

- Regeneración de desecantes en equipos de deshumidificación.

- Procesos de secado, favorecidos por la alta temperatura de los gases de escape. La temperatura mínima de éstos en los sistemas de ciclo regenerativo es de unos 271°C.

3.4. Valorización energética

Las microturbinas también se están aplicando ya para la valorización energética de productos susceptibles de ser empleados como combustible, como ocurre por ejemplo en:

- Plataformas de extracción de crudo en tierra firme o en el mar. Permite la combustión de gases de venteo o que normalmente se queman en antorcha.

- Combustión de gas de bajo poder calorífico como el biogás que se genera en vertederos, depuradoras de aguas residuales, etc.

Tabla I. Principales características de operación de la microturbina Capstone de 28 kW en condiciones ISO. Los datos de recuperación de calor corresponden a la microturbina suministrada por GAS Energietechnik GmbH

Microturbina de gas	
Potencia eléctrica	28 kW
Consumo de gas natural	113 kW
Caudal de gases de escape	0,31 kg/s
Temperatura de gases de escape	271°C
Recuperación de calor	
Potencia térmica recuperada.....	60 kW
Temperatura agua de entrada	60°C
Temperatura agua de salida.....	80°C

4. Fabricantes de microturbinas de gas

A continuación se presenta una lista de fabricantes y se describen brevemente las principales características de las microturbinas que comercializan hasta la fecha. No se han incluido aquellos equipos que por su potencia o configuración quedan fuera del concepto de lo que habitualmente se entiende por microturbinas de gas.

4.1. Capstone Turbine Corporation

Capstone fue una de las primeras compañías en introducirse en el mercado (1998) y es una de las compañías líderes en su segmento.

Actualmente, el modelo más popular es el de 28 kW (Tabla I) aunque en el segundo trimestre del año 2001 la compañía ya ha completado el primer modelo de 60 kW con capacidad para trabajar en paralelo a la red o en isla. Además ha empezado a introducir en sus modelos de 28 kW un nuevo compresor de gas natural que, al igual que la turbina, no requiere lubricación por aceite y que reduce la necesidad de mantenimiento de la máquina.

La gama de la microturbinas de 28 kW se compone de distintos modelos según el tipo de combustible a emplear: gas natural a alta presión, gas natural a baja presión y biogás. El modelo de biogás requiere un gas limpio y libre de humedad con un contenido aproximado del 65% de CH_4 . La presión de entrada del gas a la cámara de combustión depende del poder calorífico del biogás, que debe estar comprendido entre 3,62 y 12,42 kWh/Nm³.

Los distribuidores de Capstone en Europa son: Gas Energietechnik GmbH (Alemania), Advantica Technologies Ltd (Reino Unido), Soffimat (Francia) y Geveke Power Systems (Holanda).

4.2. Honeywell Power Systems

Honeywell ha introducido en el mercado la microturbinas Parallon 75, aprovechando todo el desarrollo previo realizado por

AlliedSignal, después de la fusión de ambas compañías en 1999. Se trata de una unidad de 75 kW que dispone de certificación CE desde principios del año 2001 y que permite su instalación a la intemperie. Honeywell tiene previsto cubrir el ran-

Tabla II. Características de la microturbinas Parallon 75

Combustible	Gas natural (algunos modelos admiten diésel y propano)
Eficiencia eléctrica	28,5%
Potencia térmica	100 kW de agua caliente (temperatura entrada 70°C y salida a 90°C).
Voltaje de salida	230/400 V, pero pueden solicitarse transformadores internos para diferentes voltajes.
Presión mínima del gas requerida sin compresor	4,5 bar(g). Si se instala compresor de gas, integrado dentro de la carcasa de la microturbinas, se admiten presiones desde 20 mbar(g). El compresor de gas puede llegar a consumir 4,5 kW.
Dimensiones	1.219 m de ancho, 2.334 m de largo, 2.163 m de alto
Peso	1.295 kg sin compresor de gas ni baterías
Tiempo de arrancada en frío hasta plena carga	240 s
Control	Display y panel de mando, puerto de comunicaciones: RS 232C, RS 485, Ethernet y un sistema SCADA de control remoto opcional con una aplicación para actuar como servidor de web. Protocolo de comunicaciones CAN Bus.
Nivel de ruido	65 db a 10 m
Tiempo de vida de la instalación	40.000 h o 10 años, lo que suceda en primer lugar.

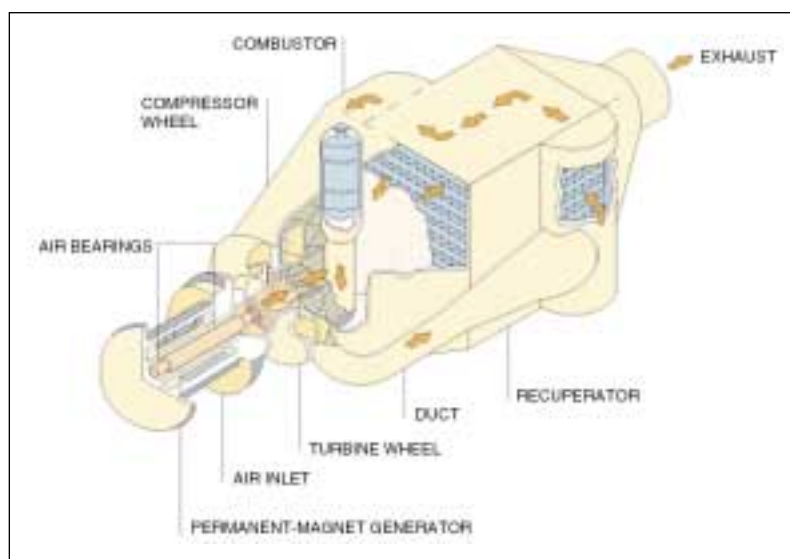


Figura 1. Esquema de la microturbinas Parallon 75 de Honeywell.

Tabla III. Algunas características de las microturbinas de Elliott Energy Systems (los datos del modelo de 45 kW corresponden a un ciclo simple, no regenerativo)

	TA 35	TA 45	TA 60	TA 80
Potencia eléctrica (kW)	35	45	60	80
Consumo de gas natural (Nm ³ /h)	14,4	31,4	24,1	32,6
Emisión de NOx (ppm)	< 35	< 50	< 30	< 30
Dimensiones AltoxLargoxAncho (mm)	1194x2794x813	1194x2286x813	1194x2794x813	1194x2794x813 (con recuperador)
Peso (kg)	770	643	770	859 (con recuperador)

Tabla IV. Principales características de la microturbina Turbec T100

Potencia Térmica	167 kW (agua caliente 50/70°C)
Caudal de gases de escape	0,79 kg/s
Velocidad de giro del eje	70.000 rpm se emplea aceite como lubricante
Presión en la cámara de combustión	4,5 bar(a)
Presión de entrada del gas	entre 1,02 y 5 bar(a) con compresor
Emisión de NOx	inferior a 15 ppmv
Nivel de ruido	70 dBA a 1 metro
Dimensiones	840 mm W, 1.900 mm H, 2.900 mm L
Peso	2.000 kg
Vida útil estimada	60.000 h o 10 años

Tabla V. Principales características de las microturbinas Bowman

• Etapa de compresión y expansión radiales
• Posibilidad de realizar <i>bypass</i> del 0 al 100 % del recuperador de calor para calentar el aire de combustión.
• Presión mínima de entrada del gas natural en la compresión : 100 mmH ₂ O. • Presión de salida del gas en el compresor : 5,5 bar (g).
• Acondicionador electrónico para convertir la corriente de alta frecuencia a 50 Hz.
• Producción de corriente alterna trifásica entre 400 y 480 V con 4 hilos.
• Posibilidad de trabajo en paralelo a la red o en isla.
• Opciones: cabina insonorizada para 65 dB a 1 m de distancia, batería de arranque y control remoto mediante Scada.
• Posibilidad de integrar un equipo de refrigeración por absorción.

go de potencias hasta 1 MW y actualmente ya está desarrollando un equipo de 350 kW. En la Tabla II se resumen las principales características de la microturbina de 75 kW.

4.3. Elliott Energy Systems

Elliott Energy Systems es una empresa del grupo Elliott Co. adquirido por la firma japonesa Ebara en el año 2000. Elliott ofrece microturbinas con un rango de potencias de 35 a 80 kW, aunque está prevista ya la introducción de un modelo de 200 kW. Los alternadores los suministra la empresa Unison Industries, que también se encarga del sistema de ignición en estas turbinas y en las de Capstone.

Todas las microturbinas de la gama son de un solo eje y pueden operar en paralelo con la red o en isla. El estátor del generador de corriente alterna de alta frecuencia se lubrica y refrigera con aceite sintético y el rotor está formado por un imán permanente de cuatro polos. La refrigeración del inversor y de la electrónica es por aire.

Para la recuperación de calor se emplea la caldera de agua caliente especialmente desarrollada para microturbinas Unifin MicoGen MG2E. Pueden trabajar con propano, gasóleo o gas natural e incluyen el sistema de baterías con recarga en las configuraciones básicas. En la Tabla III se indican algunas de las principales características de las microturbinas Elliott.

4.4. Turbec AB

La empresa Turbec AB, Malmö (Suecia), comercializa la microturbina T100 de 100 kW. Se trata de una microturbina de un solo eje que genera corriente alterna trifásica de 400V en un generador de imanes permanentes de 4 polos.

Las principales características de la microturbina Turbec T100 se resumen en la Tabla IV.

4.5. Bowman Power Ltd.

Bowman Power Ltd, Southampton, Gran Bretaña, ofrece una gama de sistemas de microgeneración denominados Turbogén de 50 (TG50CG) y 80 kW (TG80CG) basados en las microturbinas de Elliott.

Las características más destacadas de los sistemas de microgeneración de Bowman, se indican en la Tabla V, y en la figura 2, se muestra la disposición física de los componentes del sistema de microturbina de gas Bowman.

Bowman Power está representada en España por la ingeniería Icogen. En el tanatorio municipal de l'Hospitalet de Llobregat ya se ha instalado una unidad de 80 kW.

4.6. Ingersoll-Rand Energy Systems

Ingersoll-Rand Energy Systems, anteriormente Northern Research Engineering Corporation, ha desarrollado la microturbina PowerWorks con una potencia de 70 kW, aunque no está todavía disponible para el mercado europeo.

Se trata de una microturbina de ciclo regenerativo con la posibilidad de realizar un *bypass* parcial del recuperador. El aire entra primero al compresor, a la salida pasa por el recuperador para calentarse antes de entrar en la cámara de combustión. Posteriormente se expande en una primera etapa de la turbina que acciona el compresor de aire y luego pasa a una segunda turbina que gira a 44.000 rpm y acciona el generador de tipo inductivo o asíncrono.

Se trata de la única microturbina de dos ejes. Esta característica le confiere mayor flexibilidad de operación ya que los ejes pueden rotar a velocidades distintas. En las turbinas de un solo eje, la microturbina opera en un compromiso entre los requisitos

Figura 2. Esquema de un sistema de microgeneración de Bowman Power.

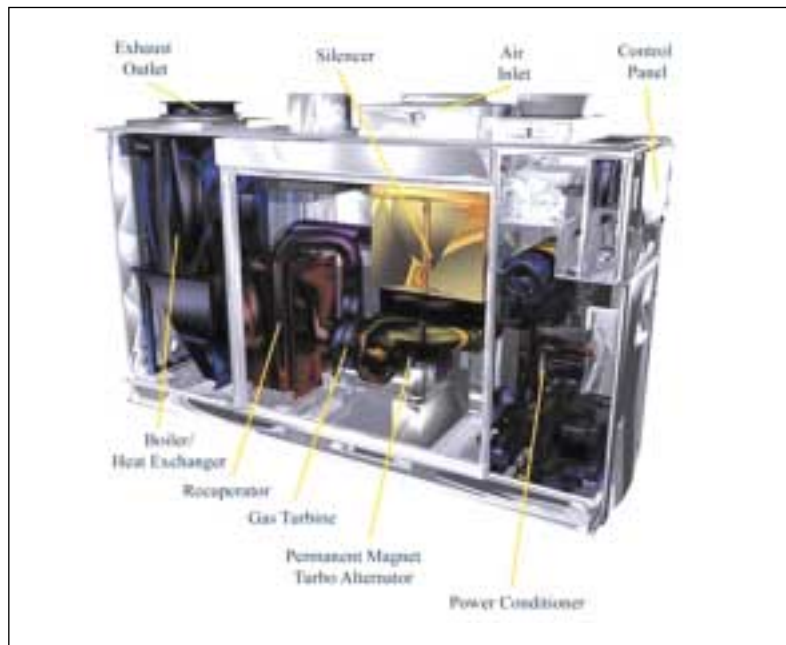
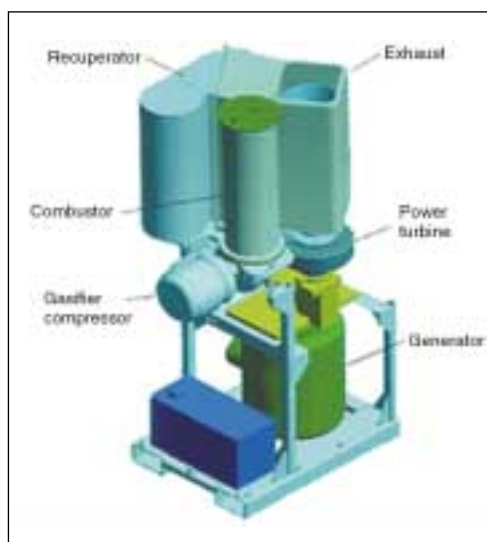


Tabla VI. Algunas características de la microturbina PowerWorks

• Puede utilizar como combustible: gas natural, propano o diésel.
• Se espera una eficiencia eléctrica del 30% y emisiones de NO _x < 9 ppmv, CO < 25 ppmv.
• Dimensiones: 1.750 mm longitud, 914 mm anchura y 2.184 mm altura. Peso: 1.712 kg.
• Tiempo de vida previsto: 80.000 horas.

Figura 3. Esquema general de la disposición interna de la microturbina PowerWorks de Ingersoll-Rand.



de ella misma y los de la carga a suministrar. En su contra está el hecho de que requiere una construcción más compleja.

En la figura 3, se muestra la disposición física de componen-

tes de la microturbina PowerWorks. Está prevista la fabricación de un modelo para accionar directamente el compresor de un equipo de refrigeración por compresión.

5. Combinación de microturbinas de gas con otros sistemas

Las microturbinas de gas se pueden combinar fácilmente con otros sistemas de producción de energía, con el fin de mejorar la eficiencia global del conjunto.

5.1. Pilas de combustible

Las pilas de combustible son un sistema limpio de producción de energía en el que no se entrará aquí en detalle dado que existe ya abundante biblio-

grafía al respecto [1]. Las pilas de combustible más avanzadas comercialmente son las del tipo PAFC (Pilas de Combustible de Acido Fosfórico) pero son las pilas de alta temperatura (MCFC y SOFC) las que resultan más adecuadas para su combinación con microturbinas.

A modo de ejemplo, se puede citar el desarrollo en fase de experimentación desde julio del 2001 por parte de la empresa FuelCell Energy, Inc. (Danbury, Connecticut, USA), que empleará una microturbina Capstone modificada junto con una pila de combustible de 250 kW, y también el sistema desarrollado por Siemens-Westinghouse [2].

5.2. Energía solar

El nivel de temperatura del agua caliente producida actualmente por las microturbinas es parecido al que se obtiene con sistemas de energía térmica solar de alta temperatura. Por lo que resultaría factible la combinación de microturbinas con sistemas de energía solar basados en colectores de tubos de vacío o de concentración.

5.3. Aprovechamiento directo del calor para la producción de frío

Una aplicación directa del calor de los gases de escape de la microturbina es la generación de refrigeración en equipos de absorción de alta eficiencia, como por ejemplo, ciclos de doble efecto o de tipo GAX.

Existe ya al menos una instalación de este tipo en el Energy Resource Center (ERC) de la empresa Southern California Gas Co. [3]. ERC es un centro de exhibiciones y conferencias para clientes de la compañía, para demostración de las tecnologías que emplean gas natural y también su integración con otros sistemas. Este centro dispone de una microturbina Capstone de 28 kW en la que los gases de escape se han dirigido hacia la zona de quemadores de un equipo de climatización GAX Robur de 5 TR de llama directa. El frío generado se consume en el propio centro y la producción eléctrica se vierte a la red. También se están realizando proyectos similares en el *Center for Environmental Energy Engineering* (CEEE) de la Universidad de Maryland (Estados Unidos) con una microturbina Honeywell de 75 kW [4] y en

la Universidad de Pisa en Italia con una microturbina Elliott de 45 kW.

6. Proyectos de demostración

Actualmente se están llevando a cabo algunos proyectos de demostración de distinto alcance relacionados con la caracterización de prestaciones de las microturbinas de gas. Algunos de los ejemplos más significativos son el Microturbine Field Test Program liderado por EPRI (*Electric Power Research Institute*) en Estados Unidos, el proyecto europeo OMES (*Optimised Microturbine Energy Systems*) basado en la microturbina de Turbec [5], y diversos ensayos con diferentes modelos de microturbinas por parte de N.V. Nederlandse Gasunie en Holanda o en Asia, por parte de Osaka Gas Co. y Tokyo Gas Co. en Japón o the National University of Singapore entre otros.

Por su parte, en España, el Centro de Innovación Tecnológica CREVER de la Universitat Rovira i Virgili, situado en el Complex Educatiu de Tarragona también ha iniciado un proyecto de demostración con una microturbina Capstone de 28 kW, μ T 28-60/80 L de Gas Energietechnik GmbH.

En este proyecto colaboran además Gas Natural SDG, S.A. y el Departament d'Indústria, Comerç i Turisme de la Generalitat de Catalunya y tiene por objeto:

- La caracterización completa de una instalación experimental de microgeneración basado en una microturbina de gas Capstone μ T 28-60/80 L suministrada por G.A.S. Energietechnik y un equipo de refrigeración por absorción de agua/LiBr Yazaki WFC-10 de 35 kW de potencia frigorífica. Esta caracterización incluye, además de la determinación de las condiciones de operación de la microturbina y del resto de la planta, la evaluación de la producción y calidad de la

energía eléctrica y del sistema de recuperación de calor para la producción de agua caliente a 90°C y de agua fría a 7°C.

- Analizar y cuantificar el nivel de emisiones a la atmósfera de NO_x , CO y CO_2 , y también el contenido final de O_2 de los gases de escape. Asimismo, se realizarán medidas del nivel sonoro de la instalación en las condiciones de operación establecidas y en distintas localizaciones próximas a la planta.

Esta instalación permitirá disponer de la siguiente información:

- Procedimiento de instalación, conexiones a servicios, pruebas de funcionamiento y de arranque de una microturbina de gas con recuperación de calor para calefacción y producción de frío.

- Rendimiento y prestaciones de la turbina y caldera de recuperación de calor en todo el rango de condiciones ambientales de presión, temperatura y humedad que se dan en Tarragona en el transcurso del período de funcionamiento establecido.

- Rendimiento y prestaciones de la microturbina y caldera de recuperación en diferentes condiciones de carga parcial para unas condiciones ambientales dadas.

7. Bibliografía

- [1] Carrette, L., Friedrich, K. A., Stimming, U. Fuel Cells – "Fundamentals and application". Fuel Cells, 1, 5-39, (2001).
- [2] Forbes, C., Veyo, S. y Vora, S., "Status of tubular SOFC field unit demonstrations". International Gas Research Conference (IGRC), Amsterdam, noviembre (2001).
- [3] Cool Times Energy Solutions. American Gas Cooling Centre Inc, vol. 1 núm. 1, winter (2001).
- [4] Popovic, P. "BCHP research and demonstration project", Advanced Building Systems Technology Conference, Washington (USA), junio (2000).
- [5] Pedersen, A. H., "Microturbine Energy Systems. Description of an EU project (OMES) and gained experiences with prototypes". International Gas Research Conference (IGRC), Amsterdam, noviembre (2001).

