

## PILAS DE COMBUSTIBLE

### Parte II: Análisis funcional y Aplicaciones.

Máster en Energías Renovables y Mercado  
Energético

Año 2014

PROFESOR/A  
Jesús García Martín



Esta publicación está bajo licencia Creative Commons Reconocimiento, No comercial, Compartir igual, (by-nc-sa). Usted puede usar, copiar y difundir este documento o parte del mismo siempre y cuando se mencione su origen, no se use de forma comercial y no se modifique su licencia. Más información: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/>

## Índice

<b>1. APLICACIONES DE LAS PILAS DE COMBUSTIBLE .....</b>	<b>3</b>
<b>2. GENERACIÓN DISTRIBUIDA .....</b>	<b>8</b>
2.1. LA GENERACIÓN DISTRIBUIDA EN LAS APLICACIONES COMERCIALES E INDUSTRIALES	9
2.2. LAS PILAS DE COMBUSTIBLE EN LAS APLICACIONES COMERCIALES .....	17
2.3. LAS PILAS DE COMBUSTIBLE EN LAS APLICACIONES INDUSTRIALES .....	19
2.4. DIMENSIONAMIENTO DE SISTEMAS BASADOS EN PILAS DE COMBUSTIBLE .....	23
2.5. GENERACIÓN DISTRIBUIDA Y SU APLICACIÓN A NIVEL RESIDENCIAL .....	27
<b>3. OTRAS APLICACIONES DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA DE ELECTRICIDAD. ....</b>	<b>60</b>
<b>4. GENERACIÓN CENTRALIZADA DE ELECTRICIDAD. ....</b>	<b>66</b>
<b>5. TRANSPORTE Y AUTOMOCIÓN. ....</b>	<b>69</b>
<b>6. BIBLIOGRAFIA Y REFERENCIAS .....</b>	<b>71</b>

## 1. APLICACIONES DE LAS PILAS DE COMBUSTIBLE

Las aplicaciones de las pilas de combustible en sus distintas variantes pueden tomar formas muy diferentes. De hecho las especiales características de las Pilas de Combustible las habilitan para ser utilizadas en un gran número de aplicaciones.

Las características más destacables de las pilas de Combustible son:

- Bajo impacto ambiental

Al no haber combustión a alta temperatura , en los gases residuales no se producen ni hidrocarburos sin oxidar ni óxidos de nitrógeno. Tampoco se produce  $SO_x$  debido a que el sistema exige y realiza la depuración previa del azufre contenido en el combustible para obtener una larga vida de las celdas electroquímicas. Se puede, por tanto, decir que la tecnología de las pilas de combustible origina niveles de contaminación inferiores al resto de los sistemas de producción basados en combustibles fósiles. El factor de reducción de estos contaminantes químicos varía entre el 99 y el 99,5%. Asimismo, al ser un sistema de alta eficiencia, las emisiones de  $CO_2$  por kWh se reducen drásticamente.

El bajo nivel de contaminación acústica de las pilas de combustible, debido a la inexistencia de partes móviles, permite su utilización en lugares densamente poblados. Un valor característico es el de  $\leq 45$ db a 10 m.

El bajo impacto medioambiental y la flexibilidad de emplazamiento permiten a los sistemas de pilas de combustible ser destinados a la generación distribuida de energía a base de sistemas de baja y media potencia cercanos a los puntos de consumo, eliminando así los costes de transporte y distribución.

- Flexibilidad de operación

Una sola celda de combustible normalmente genera una tensión de aproximadamente 0,5 V a 1 V y puede ser conectada en serie con otras celdas para obtener la tensión

deseada (son elementos de bajas tensiones y altas intensidades). La corriente producida es una función del área de la celda.

La eficiencia es relativamente constante en un amplio rango de carga (del 30 % al 100%). En contraste, los sistemas convencionales son poco flexibles, ya que para optimizar su eficiencia ha de mantenerse la carga por encima del 80%, utilizándose en producción todo-nada. Como consecuencia, algunas unidades de punta operan únicamente durante cortos períodos al año.

- Carácter modular

La disponibilidad de las pilas de combustible como módulos independientes incorpora ventajas adicionales. Un cambio de escala a potencias más elevadas se consigue fácilmente mediante la interconexión de módulos, proporcionando así una gran adaptación a la demanda. Se reduce así el coste del kW instalado y requerido en cada momento. La construcción en forma modular implica una producción automatizada, consiguientemente más rápida y de costes reducidos.

Además, permite aunar las ventajas del escalonamiento o fraccionamiento de potencia necesario para optimizar el ahorro de energía con el de una mayor garantía de funcionamiento en caso de paro por avería o por tareas de mantenimiento de una o varias unidades del conjunto.

El rango de tamaños, la modularidad y la capacidad de seguimiento de la carga hacen de las pilas de combustible un atractivo candidato para la generación de energía en una amplia variedad de aplicaciones, incluyendo plantas on site y centrales para usos comerciales, industriales y residenciales. Con un diseño modular y debido a que la eficiencia de las pilas de combustible es independiente del tamaño, pequeñas unidades pueden operar tan eficientemente como las grandes.

- Eficiencia

Las pilas de combustible son inherentemente más eficientes que cualquier sistema convencional de generación de energía; esto es debido a que no están sujetas a las limitaciones del ciclo de Carnot.

La eficiencia, E, de las máquinas de combustión interna o de las máquinas de vapor, dos de los métodos más ampliamente utilizados en la generación de energía eléctrica, está limitada por las temperaturas a las cuales el calor es suministrado ( $T_{2c}$ ) y evacuado ( $T_{1c}$ ), de acuerdo con el ciclo de Carnot:

$$E = \frac{T_{2c} - T_{1c}}{T_{2c}}$$

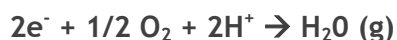
La eficiencia teórica máxima para las máquinas térmicas está entre el 40% y el 50%.

En las pilas de combustible, la máxima cantidad de energía calorífica que se puede producir isotérmicamente e isostáticamente mediante la reacción global es el cambio de entalpía,  $\Delta H$ , pero la pila solamente puede convertir en electricidad una cantidad equivalente a la energía libre de Gibbs  $\Delta G$ . La diferencia,  $T\Delta S = \Delta H - \Delta G$ , es la cantidad mínima de calor que se produce en un proceso isotermo e isostático. Por ejemplo, en una pila de combustible hidrógeno - oxígeno, tienen lugar las siguientes reacciones:

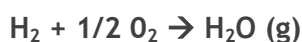
Reacción del ánodo:



Reacción del cátodo:



Reacción global:



Para la reacción global a 298 °K, basada en el poder calorífico inferior:

$$\Delta G = -54,6 \text{ kcal/g-mol}$$

$$\Delta H = -57,8 \text{ kcal/g-mol}$$

Por lo tanto, la eficiencia máxima de una pila de combustible hidrógeno - oxígeno a 298 °K es:

$$E_{\max} = (\Delta G / \Delta H) \cdot 100 = (-54,6 / -57,8) \cdot 100 = 94,5\%$$

Cualquier sistema de generación eléctrica que cumpla estas condiciones es en principio interesante; si además es distribuido y modular, el atractivo crece; y si puede utilizarse en centrales estacionarias o en soluciones de automoción, entonces debería despertar nuestro interés significativamente.

En resumen las Pilas de Combustible son limpias, silenciosas, eficientes y modulares. Estas características convierten a las Pilas de Combustible en uno de los sistemas de producción energética más atractivo de las últimas décadas y les abre la puerta a un gran número de aplicaciones.

Las aplicaciones cubren un amplio espectro yendo desde sistemas de alimentación de pequeña potencia para ordenadores portátiles hasta grandes Centrales productoras de electricidad, pasando por un innumerable número de aplicaciones relacionadas con la Generación Distribuida, siendo probablemente este último grupo de aplicaciones el que presenta un mayor interés a corto - medio plazo. Aquí nos ocuparemos de las aplicaciones más relacionadas con el desarrollo sostenible y la optimización energética.

Desde el punto de vista funcional en este documento se van a analizar un grupo de aplicaciones relacionadas con la Generación eléctrica, tanto distribuida como centralizada. Se analizarán también las aplicaciones de transporte ya que estas últimas están sufriendo un fuerte desarrollo y pueden de alguna forma determinar el futuro desarrollo de un gran número de aplicaciones de Generación Distribuida de baja potencia.

Así a continuación se analizarán los esquemas operativos básicos de las siguientes aplicaciones:

- Generación Distribuida en sus aplicaciones Comerciales e Industriales (cogeneración industrial y/o comercial).
- Generación Distribuida y su aplicación a nivel residencial (con y sin conexión a red).

- Otras aplicaciones de Generación Distribuida.
- Generación Centralizada de electricidad.
- Transporte y automoción.

En la Figura 1 se presenta un diagrama esquemático general de las distintas posibles aplicaciones.

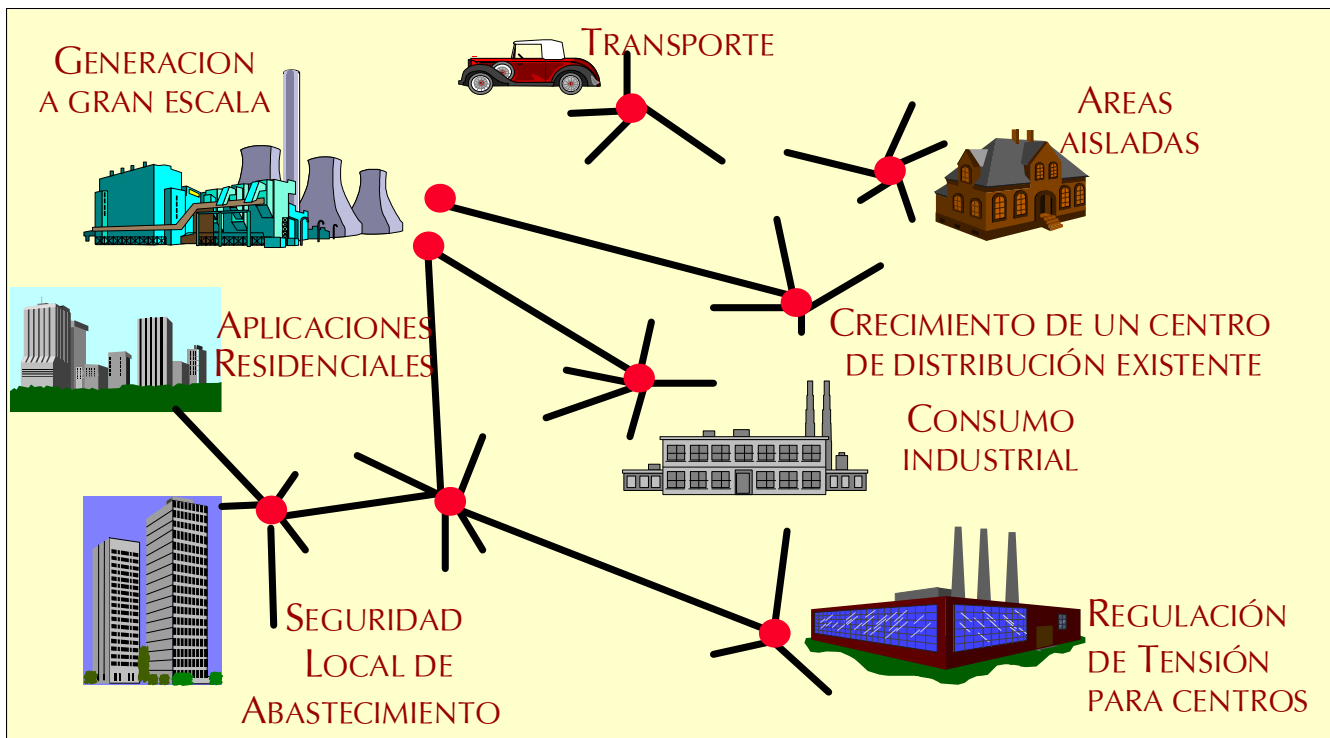


Figura 1. Algunos nichos posibles de aplicación de las pilas de combustible

No se han enunciado todas las posibles aplicaciones pues adicionalmente se ha de considerar que las Pilas de Combustible, debido a sus características son también utilizables en otro tipo de aplicaciones de tipo comercial sustituyendo algunos de los nichos que hasta ahora eran cubiertos por baterías electroquímicas especiales como por ejemplo alimentación de portátiles, cámaras de vídeo y otros pequeños sistemas (micro-consumos) en los cuales aquí no entraremos.

## 2. Generación Distribuida

Hasta no hace mucho tiempo cualquier usuario eléctrico se veía obligado a conectarse a la red de distribución eléctrica si quería tener acceso a la electricidad así el modelo de generación eléctrica centralizado utilizaba un esquema como el representado en la Figura 2 donde la electricidad era generada en Grandes Centrales (Ref. 12), desde allí se transmitía la energía eléctrica, mediante el uso de redes de transporte, hasta los centros locales de consumo, donde era distribuida usando las redes locales de Distribución. Así un pequeño usuario situado cerca de una gran red de transporte quedaba literalmente aislado del consumo dado que era necesario un importante desembolso para poder conectar pequeñas potencias a estas grandes líneas de transporte. El acceso de los usuarios a la red estaba en algún sentido limitado por el crecimiento natural de la red de distribución. De modo espontaneo los usuarios que por estas u otras circunstancias estaban aislados de la red de distribución se autoabastecían utilizando pequeños motores diesel o bien energías renovables.

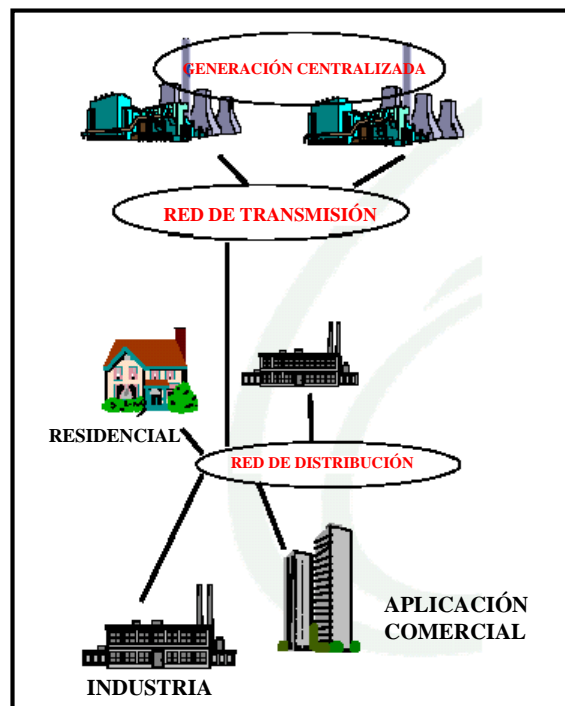


Figura 2. Esquema clásico de Generación, Transporte y distribución eléctrica.

En cierto momento, unido a la mejora de materiales, la disminución y la adaptación de los grandes equipos de generación a las necesidades de optimización energética de



las grandes industrias aparece la cogeneración o autogeneración. Estas grandes industrias con capacidad para producir energía eléctrica a partir de los excedentes de calor de su ciclo de producción crearon la necesidad de rediseñar y aceptar los excedentes estos productores. La potencia de estas instalaciones es relativamente pequeña en comparación con las Grandes Centrales productoras de electricidad.

Con el desarrollo y crecimiento del uso de las Energías Renovables y la mejora de ciertos sistemas de generación independientes de la red (microturbinas, pilas, etc.), la Generación Distribuida está produciendo un efecto revolucionario nunca antes conocido sobre las redes eléctricas y que deberán de incorporar en un futuro a todo este elenco de nuevos generadores como se muestra en la Figura 3.

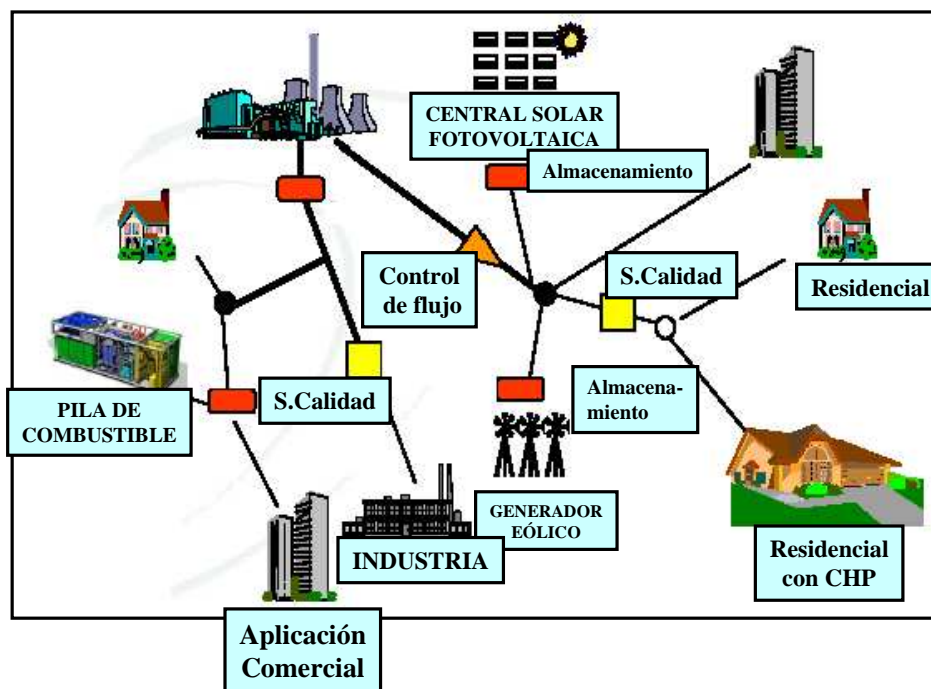


Figura 3. Nuevo concepto de red incorporando la Generación Distribuida.

## 2.1. La Generación Distribuida en las aplicaciones Comerciales e Industriales

### 2.1.1. La cogeneración

La cogeneración básicamente consiste en la producción simultánea de electricidad y calor para abastecer una serie de necesidades energéticas.

Se utilizan distintos sistemas para producir energía eléctrica y al mismo tiempo se aprovecha el calor que desprenden dichos sistemas para abastecer una serie de necesidades térmicas, que varía mucho con el tipo de aplicación.

El rango más usual de potencias típico va desde 1 MW hasta los 20 MW, aunque este intervalo es sólo orientativo debido a la gran cantidad de aplicaciones en las que se puede utilizar la cogeneración.

Los sistemas más utilizados hasta ahora para la producción de energía eléctrica y calórica son el motor de explosión y la turbina de gas.

En los motores de explosión el eje del motor gira solidario a un alternador que se encarga de producir la energía eléctrica. Los motores pueden ser tanto de gas como de gasoil, aunque en los últimos años, debido al desarrollo de infraestructuras para la distribución del gas, el gasoil ha pasado a un segundo plano.

El calor de los gases de escape, refrigeración de camisas, aftercooler y aceite es recuperado para los distintos usos, pudiendo de esta forma satisfacer tanto las necesidades térmicas como eléctricas.

La turbina de gas es la otra forma más extendida para cogenerar; mediante un ciclo Brayton conseguimos electricidad en bornes de un alternador que gira solidario al conjunto compresor turbina.

La Figura 4 representa una turbina de gas típica (ciclo Brayton). El aire es comprimido mediante un compresor que es arrastrado por la turbina. El aire comprimido se mezcla con el combustible (gas natural) en la cámara de combustión y allí se produce la combustión. Los gases resultantes de la combustión abandonan la cámara a alta temperatura y presión, de esta forma se puede aprovechar su estado térmico en una turbina. De la turbina salen los gases calientes, 500 °C, y a baja presión, por lo que son conducidos a una caldera de recuperación donde ceden el calor a otro fluido. Finalmente los gases procedentes de la caldera de recuperación se liberan a la atmósfera.

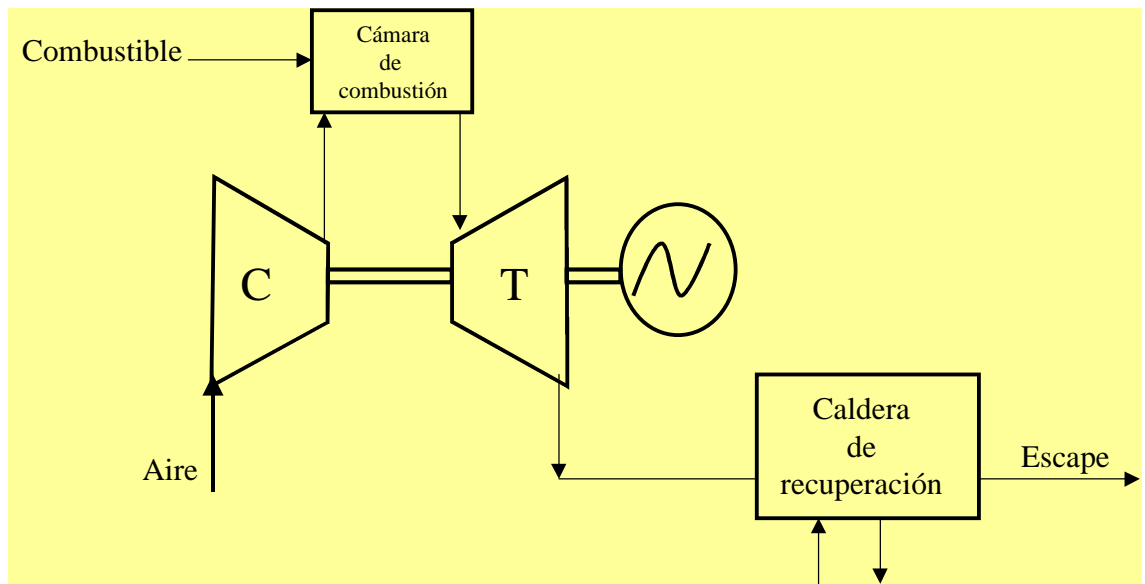


Figura 4. Cogeneración con turbina de Gas

Las pilas de combustible generan electricidad y calor al mismo tiempo, con lo que son equipos idóneos para cogenerar. El estado térmico del calor generado por la pila depende de su tipo, pudiendo llegar a alcanzar los 1000 °C de temperatura.

Dependiendo de las características de las necesidades a cubrir se elegirá un tipo u otro de pila, siendo posible combinar el uso de la pila con el de una turbina de gas.

Hay dos tipos de cogeneración bien diferenciados en cuanto a su uso:

- la cogeneración comercial y
- la cogeneración industrial.

### 2.1.1.1 Cogeneración comercial

La cogeneración comercial es muy utilizada en oficinas, centros comerciales, hospitales, etc. (Ref. 2)

Se busca satisfacer por regla general unas necesidades de electricidad y calor para usos comunes, como son el ACS, la calefacción y el aire acondicionado (ver Figura 5).

Para calefacción y el ACS se emplean depósitos donde se almacena el agua caliente para su posterior uso en el climatizador y en la red de ACS. Las temperaturas varían dependiendo del uso, pero las más habituales son de 45 °C para ACS y calefacción normal y 80 °C para calefacción mediante cortinas de aire en espacios limítrofes con el exterior, como pueden ser las puertas de entrada al recinto desde la calle.

El aire acondicionado se consigue mediante agua fría a 7 °C que atraviesa la batería de frío del climatizador. Para la obtención del agua fría se usa una máquina de absorción alimentada por agua a unos 110 °C aproximadamente.

El suministro eléctrico se realiza a 220 V y 50 Hz gracias a la red y a la energía proporcionada por los alternadores conectados a motores o turbinas.

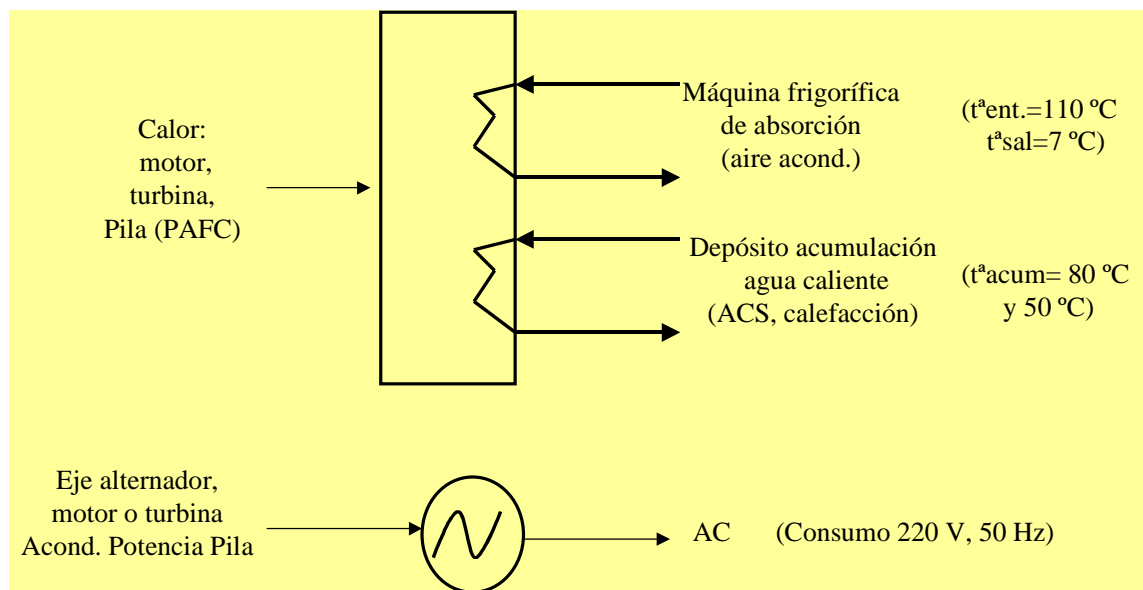


Figura 5. Cogeneración comercial

Las pilas de combustible pueden proporcionar electricidad y calor para satisfacer las distintas necesidades. El calor generado por la pila cumple con los requisitos óptimos para poder ser utilizado tanto para la obtención de agua caliente como de agua fría.

La Figura 5 recoge de forma resumida los distintos usos en la cogeneración comercial y los medios para satisfacer las necesidades que se presentan en este tipo de cogeneración.

Vamos a entrar más en detalle de lo que sería una instalación tipo de esta clase de cogeneración. Para ello analizaremos un ejemplo típico como es el aprovechamiento energético en un centro comercial. En la Figura 6 se muestra un diagrama simplificado típico de un centro comercial.

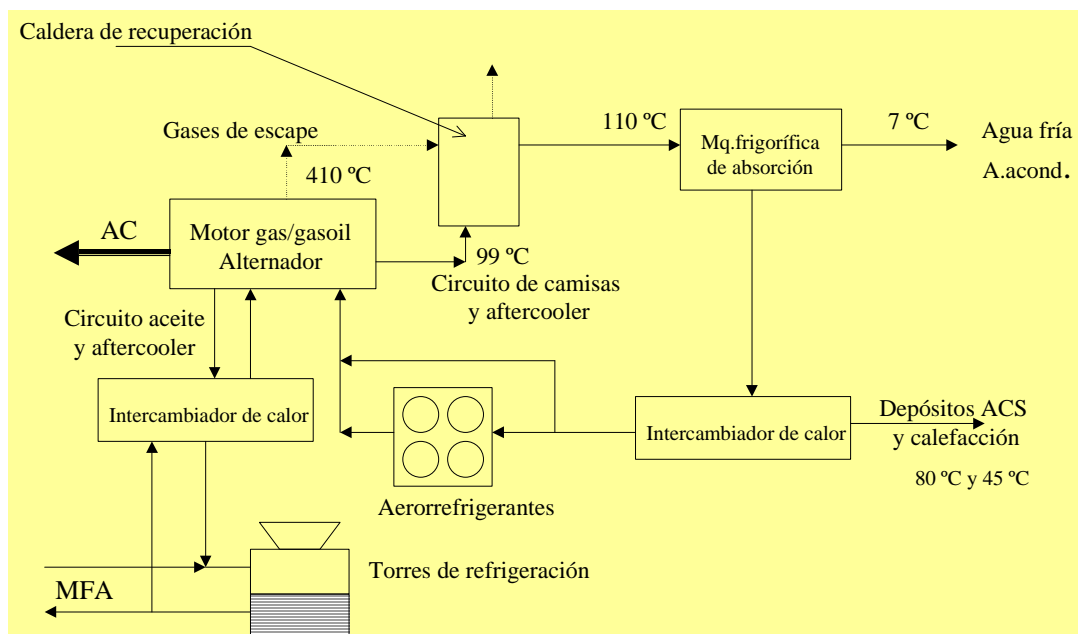


Figura 6. Esquema clásico de un Centro Comercial

La generación de energía, tanto eléctrica como térmica, queda a cargo de varios motores a gas (en general modernos motores de 16 cilindros en V o similares), que suministran una potencia eléctrica de 1 MW cada uno, gracias al alternador acoplado al eje de cada motor.

El calor producido en el motor es disipado por medio de varios sistemas.

El aftercooler del motor, que tiene como función enfriar el aire que sale del compresor del turbo, está dividido en parte alta y baja. Cada parte está refrigerada por un sistema distinto.

El aceite del motor debe ser enfriado ya que si no sufriría un calentamiento inadmisibles para el correcto funcionamiento del motor.

El agua que circula por las camisas del motor para refrigerarlo, alcanza unas temperaturas de hasta 99 °C, con lo que es necesario extraer calor de ella para que pueda seguir refrigerando adecuadamente.

Finalmente los gases de la combustión son expulsados del motor a alta temperatura, 410 °C, y aunque no existe la necesidad de enfriarlos, desde el punto de vista del funcionamiento del motor, podemos aprovechar el calor que llevan.

Los gases de escape son conducidos a una caldera de recuperación de gases, allí ceden su calor al agua procedente de camisas y de la parte alta del aftercooler; consiguiendo elevar la temperatura del agua desde los 99 °C hasta los 110 °C.

El agua que sale de la caldera de recuperación es llevada hasta la máquina de absorción a una temperatura de 110 °C, esta temperatura asegura un buen rendimiento del sistema de producción de frío.

El agua a enfriar por la máquina de frío entra a unos 12 °C, proveniente de la batería de frío del climatizador, y sale a 7 °C, asegurando de este modo la disposición de frío en el climatizador.

El agua que entró en la máquina de absorción a 110 °C la abandona a unos 87 °C, temperatura suficiente para calentar agua para los sistemas de ACS y calefacción. Con este objetivo se hace pasar el agua por unos intercambiadores de calor cuyo circuito secundario se destina a almacenar agua caliente en dos depósitos de 125 m<sup>3</sup> cada uno.

Se almacena el agua a dos temperaturas diferentes: 80 °C para la calefacción de los accesos desde el exterior y 40 °C para la calefacción y el ACS del resto de la instalación.

El agua abandona el circuito primario del intercambiador a una temperatura suficiente para poder ser introducida de nuevo en el motor, completándose de esta manera el circuito.

Se dispone de una batería de aero-refrigerantes para asegurar el enfriamiento del agua en cualquier modo de operación.

La parte baja del aftercooler y el aceite del motor ceden su calor en un intercambiador de calor. El secundario del intercambiador disipa el calor absorbido

en una batería de torres de refrigeración, en las que también disipa calor el circuito del condensador de la máquina de absorción.

### 2.1.1.2 Cogeneración industrial.

En la cogeneración Industrial se busca el abastecimiento de calor y electricidad para los distintos procesos industriales característicos de cada instalación.

Aparece en este tipo de cogeneración la necesidad de vapor para distintos usos, así como la necesidad de calor a alta temperatura.

Ejemplos de esta aplicación se pueden citar muchos debido a la gran variedad de industrias existentes. En este informe analizaremos como ejemplo la cogeneración efectuada en una fábrica de neumáticos y una cerámica.

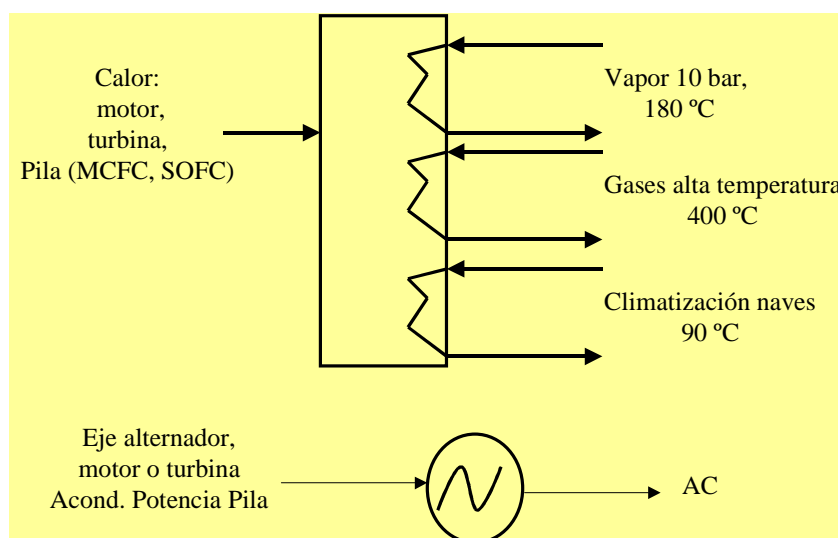


Figura 7. Esquema cogeneración industrial

En la Figura 7 se muestra un esquema de los distintos usos así como los medios disponibles para satisfacer las diversas necesidades en una aplicación Industrial.

Los objetivos primordiales suelen ser abastecer de calor a alta temperatura, 400 °C, para ciertas aplicaciones y de vapor a las instalaciones que lo precisen en las condiciones requeridas. Las condiciones típicas del vapor rondan los 180 °C de temperatura y 10 bares de presión, aunque la gran variedad de procesos industriales hacen difícil dar unas características muy concretas.

Cuando las necesidades primarias son satisfechas, si aún se dispone de excedente de calor se utiliza para la climatización de las naves e instalaciones de la industria en cuestión.

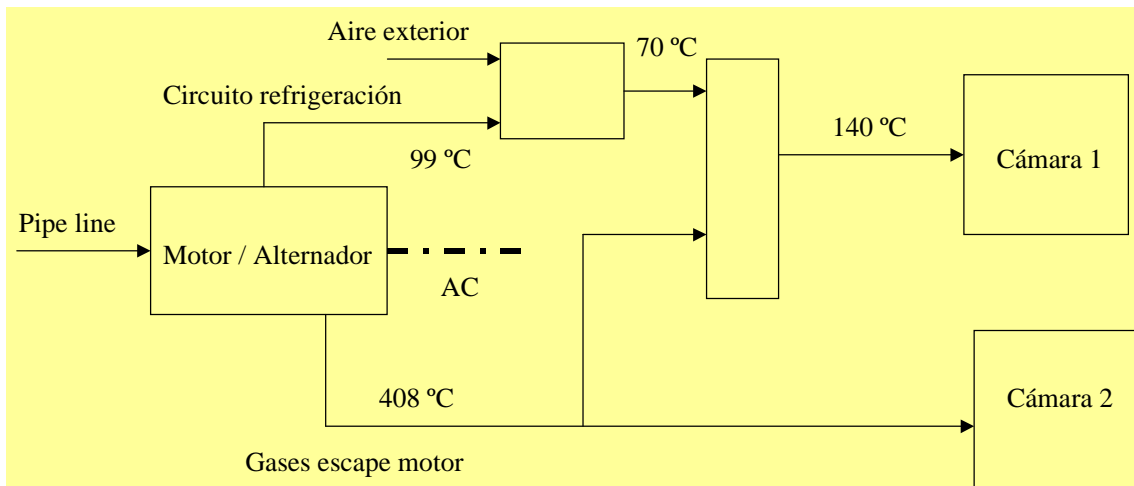


Figura 8. Esquema simplificado de una fábrica de cerámica

En la Figura 8 se muestra el esquema simplificado de una fábrica de cerámica. En ella la necesidad primordial es conseguir dos corrientes de gases a distintas temperaturas para conseguir eliminar la mayor parte de la humedad de los productos elaborados antes de su cocción.

El centro de todo el sistema de cogeneración es un motor de 2 MW de potencia eléctrica, al que se acopla un alternador para producir energía eléctrica para autoconsumo y para venta a la red.

Los gases de escape del motor, a 408 °C, se dividen en dos corrientes, una se mezcla con otra corriente de 70 °C con el fin de alcanzar los 140 °C necesarios para la primera cámara de secado. La otra corriente se introduce directamente en la cámara de secado de alta temperatura.

El circuito de refrigeración del motor, camisas y aftercooler, se enfría con aire exterior. De esta forma conseguimos aumentar la temperatura del aire hasta los 70 °C. Éste aire es el que se mezcla con una de las corrientes de los gases de escape.

El motor es alimentado por el gas natural de la red de que pasa por la zona.



En cogeneración industrial es dónde más se utiliza el esquema de la Figura 4, ya que la alta temperatura de escape de la turbina permite la obtención de un calor de gran calidad. Dicho esquema ya ha sido explicado anteriormente con lo que no nos extenderemos más.

## **2.2. Las Pilas de combustible en las aplicaciones comerciales**

A la vista de las características descritas de los distintos tipos de pilas y de las exigencias de las instalaciones de cogeneración comercial, parece que la pila que mejor se adaptaría a este tipo de usos es la pila de ácido fosfórico (PAFC)

La temperatura normal de operación de las PAFC es de 200 °C, con lo que podremos conseguir un fluido de intercambio a unos 190 °C aproximadamente. Esta temperatura es más que suficiente para generar frío en una máquina de absorción y para almacenar agua caliente para la producción de calefacción y de ACS.

Esta temperatura alta de intercambio permite obtener un alto rendimiento de la máquina de absorción, así como una disminución del volumen del depósito de almacenamiento de agua caliente destinada a distintos usos.

Las características de funcionamiento de este tipo de pila hacen posible una cómoda localización del emplazamiento, un tamaño reducido de la instalación y la operación de una forma segura del sistema.

Con pilas de potencias eléctricas entre 2 y 4 MW podemos satisfacer las necesidades eléctricas y de climatización de un centro comercial, teniendo incluso la posibilidad de exportar electricidad a la red en determinadas horas, dependiendo del modo de funcionamiento de la instalación.

El combustible ideal para esta pila sería el gas natural, debido a la infraestructura de distribución que permite disponer de suministro continuo de gas. La pila dispondría de un reformador capaz de obtener del gas natural una corriente rica en H<sub>2</sub>.

Veamos ahora cómo sería el esquema (Figura 9) de cogeneración comercial con una pila PAFC en un centro comercial. Utilizaremos el mismo centro que se empleó para obtener el esquema simplificado de la Figura 6.

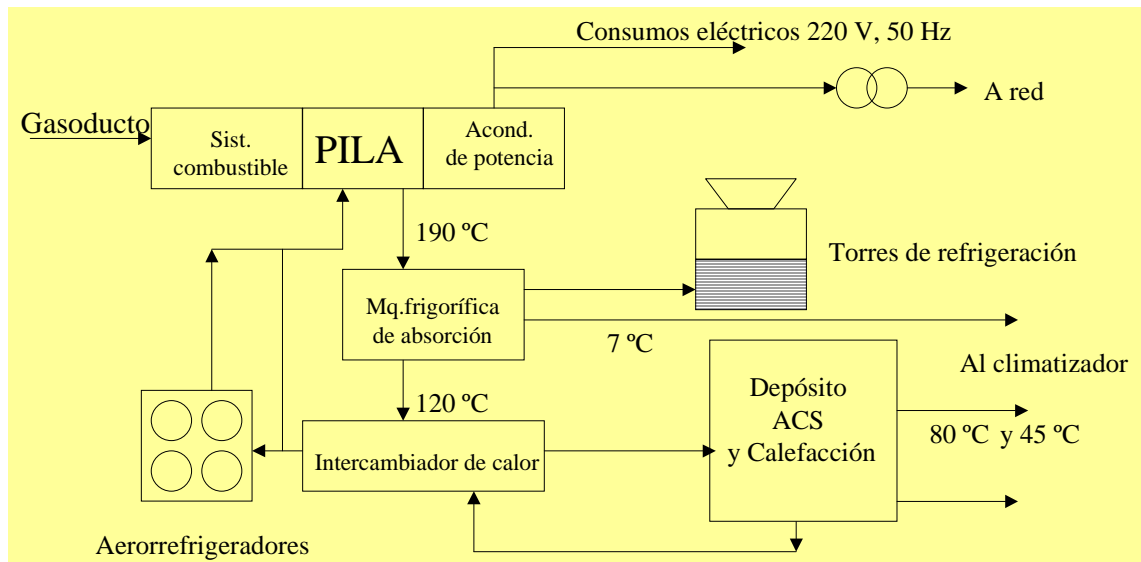


Figura 9. Aplicación comercial con pila de combustible.

La pila tendrá una potencia eléctrica de 3 MW, con lo que estará formada por la unión de varios stacks de cientos de kW.

La potencia suministrada por la pila será en continua por lo que se acompañará la pila de un acondicionador de potencia que suministre fluido eléctrico en corriente alterna, a una tensión y frecuencia adecuada al consumo y con un nivel de armónicos aceptable.

Se dispondrá de un sistema de combustible, constituido principalmente por un reformador capaz de transformar el gas natural en una corriente enriquecida en  $H_2$ .

Gracias al calor aportado por el reformador y la pila, obtendremos una corriente a 190 °C de temperatura. Dicha corriente se hará pasar por la máquina de absorción y gracias a su elevada temperatura se conseguirá un gran rendimiento.

De la máquina de frío saldrá la corriente a unos 120 °C, a esta temperatura se conducirá hasta un intercambiador de calor.

Del intercambiador se conducirá la corriente hasta la pila, para cerrar el circuito. En el lado secundario del intercambiador se producirá el calentamiento del agua, que se almacenará en un depósito para su posterior uso para calefacción y ACS.

El consumo final de ACS y calefacción se hará a 45 °C y 80 °C. La calefacción para las puertas que se abren al exterior será la que utilice el agua a 80 °C, mientras que el resto de la calefacción y todo el ACS será a 45 °C.

Entre el intercambiador de calor y la pila se colocará una batería de aerorefrigeradores en paralelo, para poder refrigerar el circuito en cualquier modo de operación.

Se dispondrá de unas torres de refrigeración para enfriar el agua que sale del condensador de la máquina frigorífica de absorción.

Para el aire acondicionado utilizaremos agua a 7 °C, que se hará pasar por la batería de frío del climatizador. El agua de salida de esta batería, 12 °C, se llevará hasta la máquina frigorífica de absorción, para retornar de nuevo a la batería de frío a 7 °C.

### **2.3. Las pilas de combustible en las aplicaciones industriales**

La cogeneración industrial difiere principalmente de la comercial en la alta temperatura necesaria para satisfacer las distintas necesidades. Por esta razón es normal pensar que las pilas de combustible de alta temperatura son las que mejor se adaptaran a este tipo de cogeneración.

Las pilas de alta temperatura son las de Carbonatos Fundidos (650 °C) y las de Óxidos Sólidos (1000 °C). Las características de ambas son conocidas con lo que ahora nos fijaremos en su adaptación a la cogeneración.

Cómo ya comentamos las necesidades primeras a satisfacer son la producción de vapor en unas condiciones determinadas y la producción de gases a alta temperatura. Una vez conseguido esto, el calor sobrante, si es que sobra, se destinará a la climatización de las naves y demás dependencias que componen la instalación.

Las pilas de Carbonatos Fundidos (MCFC) trabajan a una temperatura de 650 °C, con lo que aprovechando el calor de los gases del reformador y de la pila podemos conseguir vapor de gran calidad y gases calientes a alta temperatura.

Para la obtención de vapor basta con hacer pasar los gases calientes que salen de la pila por una caldera de recuperación, en la que por el lado del secundario entra agua y sale vapor a la presión y temperatura requeridas. En una fábrica de neumáticos, por ejemplo, el vapor de la caldera de recuperación sale a una temperatura de 180 °C aproximadamente y con una presión de 10 bar.

Para la obtención de gases a alta temperatura podemos mezclar los gases que salen de la pila con aire exterior, de esta forma conseguimos regular la temperatura de la corriente final hasta la especificada para nuestro proceso industrial. Este procedimiento es muy utilizado en las fábricas de cerámica, ya que necesitan gases a varias temperaturas para introducir en las distintas cámaras de secado.

Con las pilas de Óxidos Sólidos (SOFC) la forma de funcionar sería distinta, debido a la alta temperatura de los gases que salen de la pila (1000 °C).

Primero haríamos pasar los gases calientes que salen del reformador y de la pila por una turbina de gas, donde se expandirían hasta una temperatura cercana a los 500 °C. La salida de la turbina se haría pasar por una caldera de recuperación para obtener vapor en unas determinadas condiciones.

Esta forma de trabajar nos asegura una mayor producción eléctrica, ya que generamos electricidad por medio de la pila y por el alternador que gira solidario al eje de la turbina.

A la vista de las distintas aplicaciones industriales, las pilas SOFC se utilizarían en instalaciones de gran potencia eléctrica, de un tamaño considerable y de cierta complejidad debido a los distintos equipos necesarios y a las altas temperaturas de trabajo.

A continuación vamos a analizar brevemente el esquema de dos aplicaciones características en cogeneración industrial. El primero corresponde a una fábrica de cerámica en la que usamos una MCFC para abastecer al sistema.

El segundo esquema corresponde a una pila SOFC que usamos para generar electricidad, calor a alta temperatura y vapor.

En la Figura 10 se presenta el esquema que resultaría de aplicar una Pila de Combustible de Carbonatos Fundidos a la fábrica de cerámica que se representó en el esquema simplificado con cogeneración a motor de gas de la Figura 7. Usaremos una pila MCFC en la que agruparemos varias estacas de cientos de kW hasta llegar a una potencia eléctrica de 2 MW.

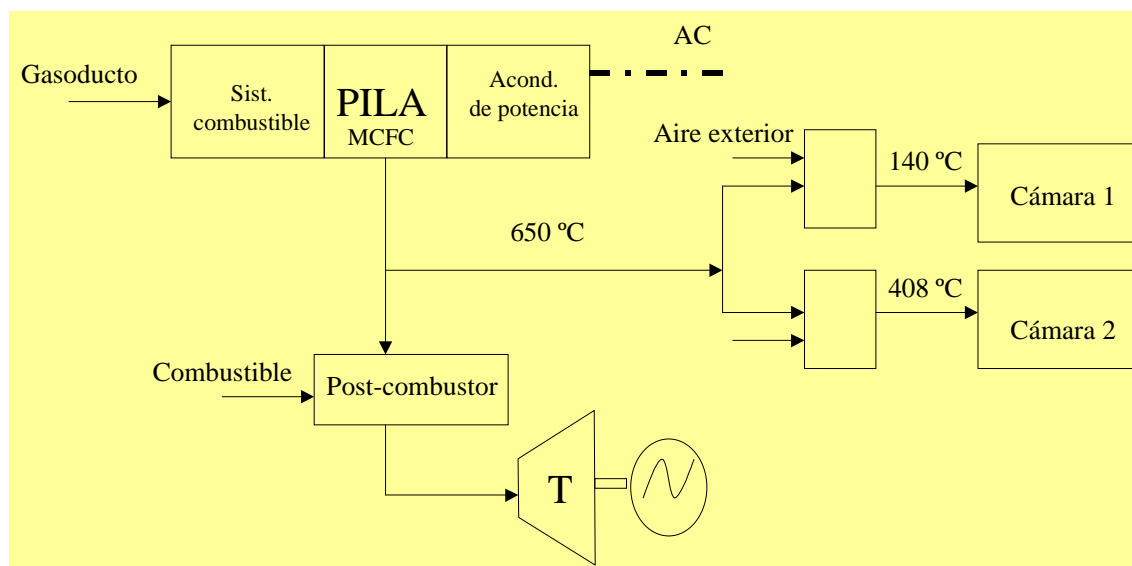


Figura 10. Cogeneración con Pila de combustible en una fábrica de cerámica.

El sistema de combustible se encargará de recibir el gas natural, de una red de gas o de un depósito, y lo adecuará a las condiciones necesarias para ser utilizado por la pila. El reformador, sistema encargado de suministrar una corriente rica en  $H_2$ , podrá ser interno o externo al stack de la pila, gracias a las altas temperaturas de funcionamiento del sistema.

El acondicionador de potencia conseguirá adaptar la corriente eléctrica generada por la pila a los requerimientos del consumo. El consumo se hará tanto a tres fases, con 380 V de tensión entre fases, como a 220 V, tensión fase neutro, y siempre a una frecuencia de 50 Hz.

Los gases de salida de la pila, 650 °C, se dividirán en dos corrientes: la primera se destinará para el calentamiento del aire que se ha de introducir en las distintas cámaras de secado. La segunda se introducirá en un post-combustor, para posteriormente mandar la corriente de gases resultantes a una turbina que girará solidaria a un alternador y producirá corriente eléctrica.

La corriente de gases de la pila, desviada para las cámaras de secado, será a su vez dividida en otras dos corrientes. Cada una de las dos corrientes se mezclarán con distintas proporciones de aire exterior para conseguir dos temperaturas diferentes, una para cada cámara de secado. La cantidad de aire exterior será tal que consigamos una corriente a 140 °C y otra a 408 °C.

El escape de la turbina de gas es alta temperatura, con lo que se podría aprovechar el estado térmico de los gases de salida para la climatización de naves y para la obtención de ACS.

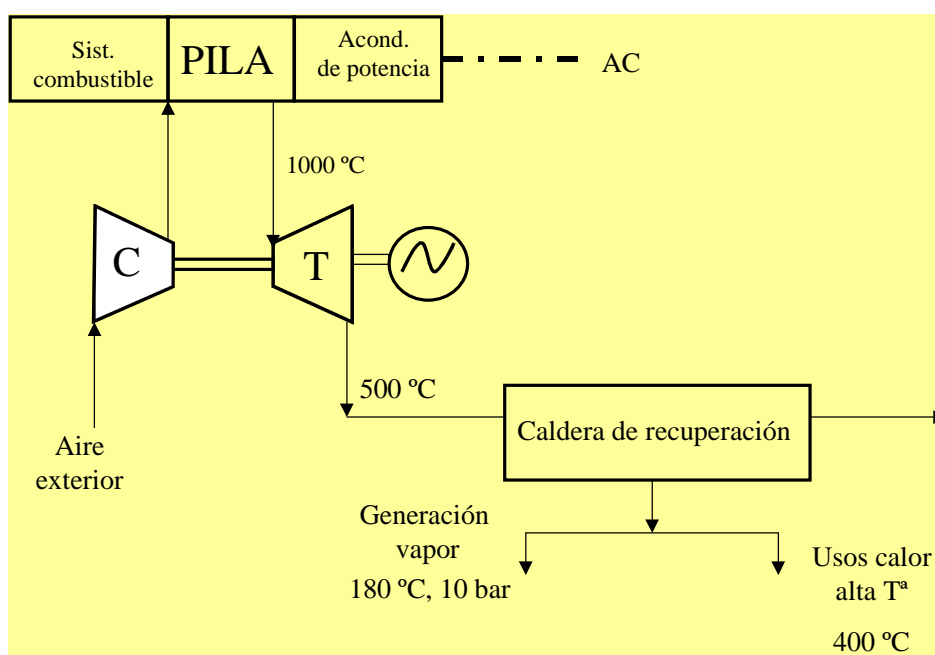


Figura 11. Cogeneración con Pila de combustible SOFC en una fábrica de cerámica

En la Figura 11 se presenta el esquema de una cogeneración industrial con una pila de óxidos sólidos (SOFC). Gracias a la alta temperatura de funcionamiento de este tipo de pilas podemos acoplar a la instalación una turbina de gas inmediatamente después de la pila.

El sistema de combustible y el acondicionador de potencia funcionan de la misma forma que en el caso anterior, con lo que no comentaremos nada más.

Un compresor, que girará solidario con la turbina y con el alternador, será el encargado de comprimir el aire exterior para ser introducido en la pila.

Los gases de salida de la pila, 1000 °C, serán introducidos directamente en la turbina, allí se expandirán hasta alcanzar en el escape una temperatura de 500 °C. Los gases de salida se reconducirán hasta una caldera de recuperación donde se recuperará el calor de los gases de escape, mediante la producción de vapor y otros usos a alta temperatura.

Estos usos a alta temperatura dependerán de la cantidad y la calidad del vapor necesitado. Si necesitamos mucho vapor y de gran calidad la cantidad de calor disponible para los otros usos así como su temperatura pueden determinar su uso en uno u otro sistema.

Para calores residuales de bajo nivel térmico (50 - 80 °C) se aconseja su uso para calefacción y ACS, ya sea con apoyo de una caldera auxiliar o sin ella.

Para calores de 95 °C en adelante es posible la utilización de una máquina frigorífica de absorción para la producción de frío.

Los gases de escape de la caldera de recuperación serán vertidos a la atmósfera a una temperatura aproximada de 120 °C. El bajo contenido en azufre de los gases de escape puede permitir disminuir la temperatura de escape, aumentando con ello el aprovechamiento de calor en la caldera de recuperación.

#### ***2.4. Dimensionamiento de sistemas basados en pilas de combustible.***

Para dimensionar una pila de combustible destinada a una instalación de cogeneración habrá de tenerse en cuenta que tipo de necesidades queremos cubrir con la pila.

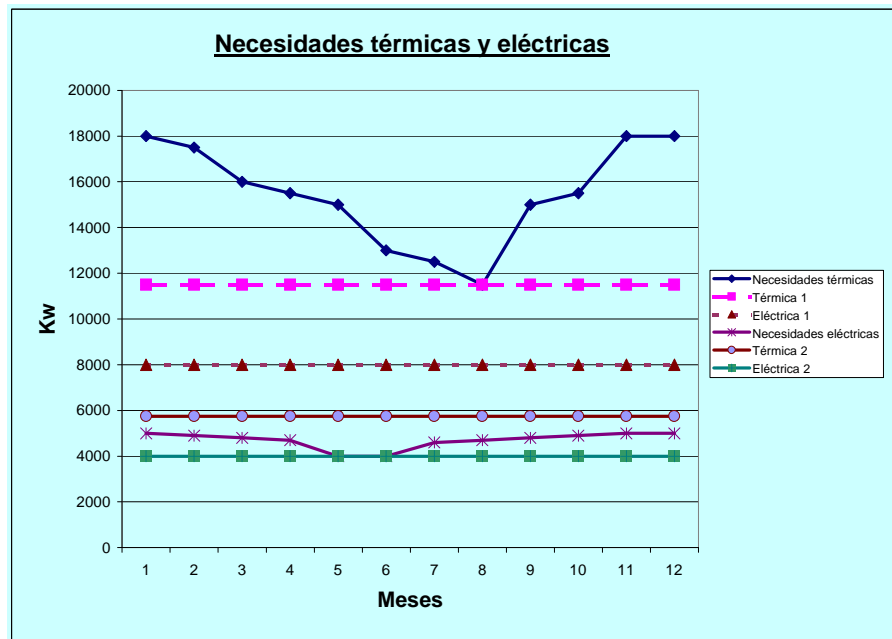


Figura 12. Necesidades térmicas y eléctricas de una instalación industrial tipo.

En la Figura 12 se presenta un gráfico en el que se puede apreciar las necesidades térmicas y eléctricas en una fábrica de neumáticos, así como los distintos niveles de energía que se consiguen dependiendo del diseño de la instalación.

Si queremos cubrir las necesidades mínimas de electricidad obtendremos un potencia de pila más pequeña pero que tendrá que ser complementada con otros sistemas para abastecer el 100 % de nuestras necesidades de calor.

Si el objetivo es suministrar las necesidades mínimas de calor, estaremos con una pila de gran potencia que producirá más electricidad de la que podemos consumir. De esta forma podremos exportar energía a la red con el consiguiente beneficio económico.

Por último, podemos diseñar para una potencia inferior a la necesaria para el abastecimiento de calor y electricidad. Conseguiremos una instalación pequeña y económica, pero tendrá que ser apoyada por la red eléctrica y por otros sistemas que proporcionen el calor necesario.

Si analizamos un poco más profundamente las gráficas de la Figura 12 se puede entender más adecuadamente la influencia que estas tres formas de diseño puede tener en los consumos energéticos de nuestra planta



La leyenda “necesidades térmicas” indica la cantidad de kW térmicos consumidos por la fábrica de neumáticos, en nuestro caso del ejemplo.

Térmica 1 / 2 es la potencia térmica y eléctrica, respectivamente, que genera una pila de combustible diseñada para satisfacer las necesidades térmicas mínimas de la instalación.

Como se puede ver en la figura, la gráfica de térmica 2 está bastante por encima del consumo eléctrico de la planta (necesidades eléctricas), lo cual implica que se puede vender a la red una gran cantidad de energía eléctrica obteniendo la correspondiente bonificación económica.

La gráfica de térmica 1 abastece la demanda térmica sólo en el mes 8, con lo cual dispondremos de algún método auxiliar de generación de energía térmica. Otra opción sería aumentar más la potencia de la pila hasta dar el máximo de energía térmica.

Eléctrica 1 / 2 representan la generación térmica y eléctrica de una pila diseñada para abastecer las necesidades eléctricas del mes de menor consumo. De esta forma, en los meses 5 y 6 la demanda eléctrica coincide con la generación eléctrica de la pila.

Observamos como con este modo de diseño las necesidades térmicas no quedan cubiertas en ningún mes (comparar las gráficas “necesidades térmicas” y “eléctrica 1”) y habría que dotar a la instalación de algún sistema complementario para la producción de calor, asimismo y excepto para los meses 5 y 6 habrá que prever una alimentación eléctrica complementaria para cubrir las necesidades de la planta .

En este último caso podría ser interesante aumentar la potencia de la pila para asegurar los suministros eléctricos al 100%, ya que del consumo térmico seguiríamos muy lejos.

En la Figura 13 se resume, en un pequeño esquema, los tres sistemas de dimensionamiento de una pila para una instalación de cogeneración, así como las principales características del sistema diseñado bajo esos conceptos.

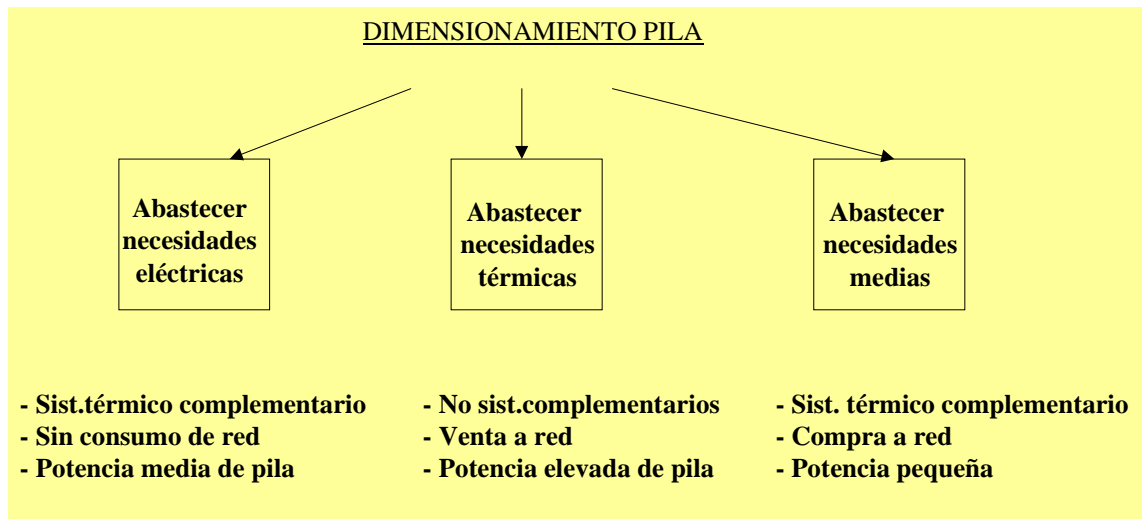


Figura 13. Distintos sistemas para dimensionar un sistema basado en Pilas de Combustible

El sistema diseñado para abastecer las necesidades eléctricas, como ya hemos visto necesitará de un sistema de generación térmico complementario. Presenta la ventaja del ahorro económico que supone no consumir energía de la red, además de que al trabajar con una pila de potencia media tanto el tamaño como la complejidad de la instalación disminuye.

Cuando diseñamos para abastecer las necesidades térmicas estamos consiguiendo vender energía a la red y además no necesitamos el uso de sistemas complementarios para la producción de calor. El inconveniente es la potencia elevada de la pila, el tamaño y la complejidad de la instalación.

Si simplemente queremos que la pila sea un sistema complementario a la producción de electricidad y energía térmica, conseguiremos un sistema pequeño, de baja potencia y que nos permitirá un sustancial ahorro de energía.

La diferencia entre potencia eléctrica y térmica demandada por una instalación puede variar mucho entre una instalación y otra, debido a la gran variedad de procesos existentes en la industria. Por eso cada caso debe ser estudiado específicamente.

## **2.5. Generación Distribuida y su aplicación a nivel residencial**

### 2.5.1. Viviendas sin conexión a red

#### **2.5.1.1 Sistemas actuales de abastecimiento**

Las necesidades básicas de cualquier vivienda, independientemente de que estén o no conectadas a red, son las siguientes: agua (fría y caliente), electricidad, calefacción y aire acondicionado.

Analicemos los productos y tecnologías existentes para satisfacer estas necesidades en viviendas sin conexión a red.

Cubrir la demanda eléctrica es probablemente el mayor problema, debido a que las tecnologías existentes presentan ciertas limitaciones.

El consumo eléctrico se realiza a 220 V y 50 Hz. Hay algunas aplicaciones que necesitan de corriente continua, como pueden ser algunos motores que funcionan a 12 o 24 V.

Hay dos soluciones típicas para suministrar electricidad: el grupo diesel y las energías renovables.

El grupo diesel es la solución que se ha empleado durante mucho tiempo. Consiste en un motor de explosión que está acoplado a un alternador, de tal forma que el motor hace girar el alternador y éste produce la corriente eléctrica. Su funcionamiento es bastante bueno aunque presenta los inconvenientes del elevado consumo, la contaminación y del alto nivel de decibelios.

El elevado consumo obliga a la necesidad de tener un depósito grande de combustible y a la imposibilidad de funcionar las 24 horas del día.

Las energías alternativas es una solución relativamente nueva. Para abastecer de electricidad a sistemas aislados se utilizan las placas solares fotovoltaicas con o sin el apoyo de generadores eólicos.

En cuanto al medioambiente presentan una solución bastante buena, pero presentan ciertas limitaciones en cuanto al precio y sus consumos.

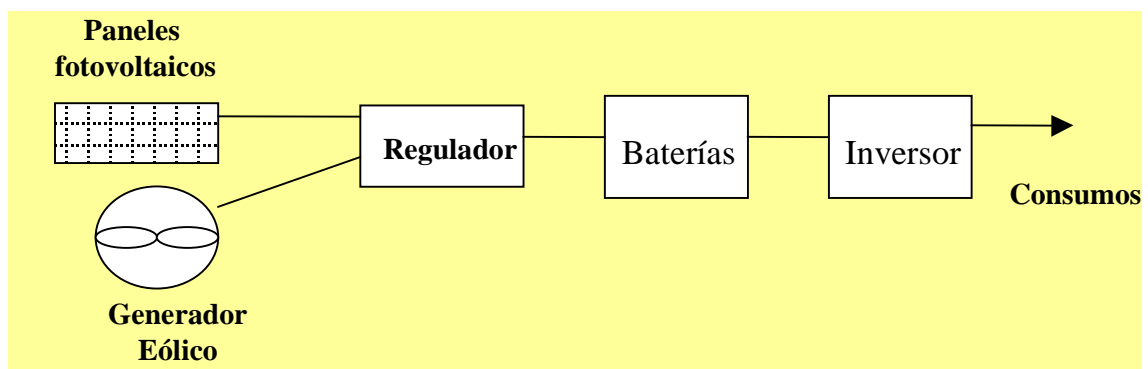


Figura 14. Esquema alimentación instalaciones residenciales aisladas.

Un sistema mixto (fotovoltaico - eólico) está compuesto por una serie de equipos necesarios para garantizar el suministro eléctrico en condiciones adecuadas. Los paneles solares generan electricidad en corriente continua y sólo durante el día, así que debemos de disponer de un grupo inversor que pase de corriente continua a alterna (220 v y 50 Hz) y de un conjunto de baterías en las que almacenar corriente para utilizarla por la noche o en los días de poca o nula insolación. Un regulador se encarga de controlar el estado de carga y descarga de las baterías para el correcto funcionamiento de la instalación.

Para el suministro de calefacción se dispone también de varios sistemas. El más habitual es el de la caldera de fuel oil o gas. En ella se calienta agua hasta una temperatura de 90 °C. Este agua se hace circular por una red de radiadores distribuidos por todas las dependencias de la casa.

Para repartir el agua por la casa se utilizan dos soluciones: el sistema monotubular y el sistema bitubular.

La calefacción por caldera de fuel oil o gas necesita de un depósito de cierto tamaño que asegure el abastecimiento de combustible durante todo el periodo de frío.

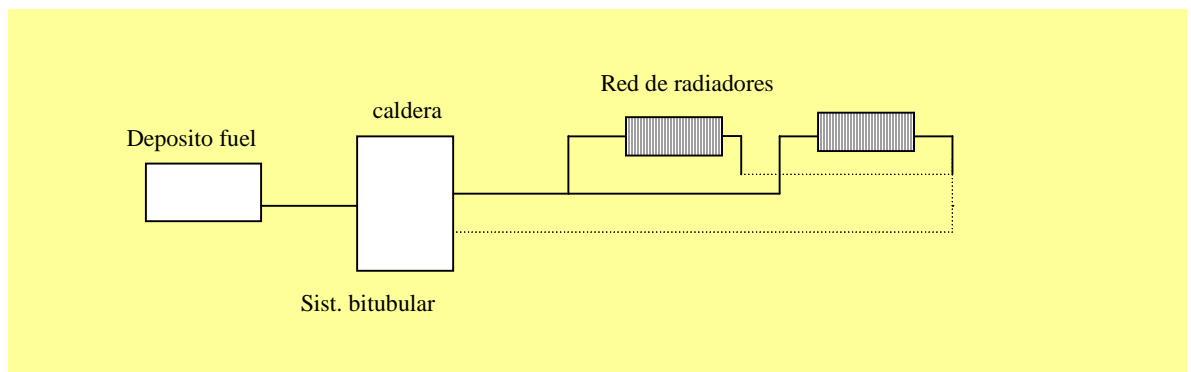


Figura 15. Sistema de calefacción clásico.

Otro sistema de calefacción menos extendido es el de calefacción por suelo radiante. El agua circula a una temperatura de 40 °C por una red de tuberías por debajo del suelo, ocupando la mayor parte de la superficie de las distintas estancias.

El uso de las energías renovables para abastecer las necesidades de calefacción también es posible. Se utilizan paneles solares térmicos, por los que circula el agua para ser calentada por la radiación solar. Este sistema necesita de un sistema de apoyo para satisfacer el 100 % de las necesidades de calefacción. Se utiliza mediante el sistema de suelo radiante.

Mediante bombas de calor también podemos conseguir las condiciones de confort necesarias para una casa. Presentan el problema del alto consumo eléctrico, aunque tienen la ventaja de poder proporcionar aire acondicionado durante el verano.

Las necesidades de calor de una casa se calculan de forma bastante aproximada suponiendo una cifra de 80 Kcal/h m<sup>2</sup> (93 W/m<sup>2</sup>).

Para el abastecimiento de ACS disponemos de varios sistemas.

El primero de ellos sería el sistema directo, en el que mediante un calentador de gas se calienta directamente el agua que se va a consumir.

El segundo consiste en utilizar la caldera de la calefacción para calentar agua que es almacenada en un depósito para su posterior consumo. Este es un método indirecto, ya que no se calienta el agua según se va consumiendo. Este sistema necesita de un depósito donde entra agua de la red para ser calentada por un serpentín de agua caliente que proviene de la caldera. El serpentín no es más que un intercambiador de calor que se encuentra en el fondo del depósito.

El agua circula por el serpentín a una temperatura próxima a los 90 °C, consiguiéndose una temperatura de acumulación de 45 - 50 °C. La preparación del agua del depósito se debe hacer en los momentos que no hay consumo de ACS, o éste es muy bajo, y con un tiempo recomendado de preparación de 2 horas.

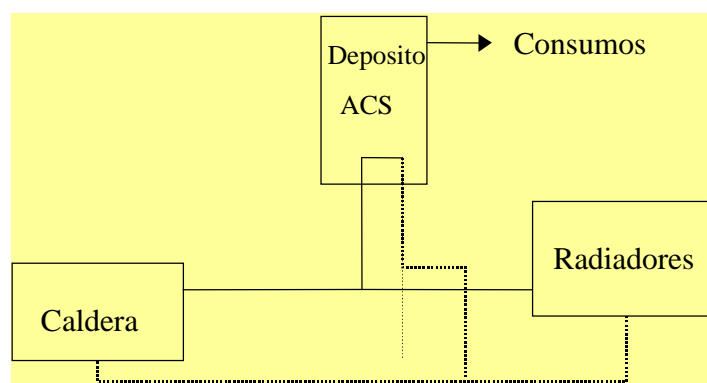
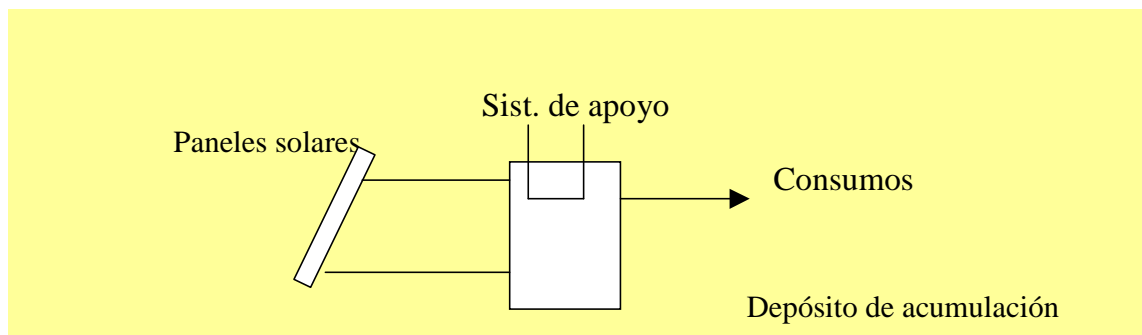


Figura 16. Sistema mixto ACS - calefacción

En el caso de calentamiento por calentador, sistema directo, no necesitamos depósito ya que lo que se calienta es lo que se consume. El calentador funciona con gas, así que debemos de disponer de un depósito de gas o de un número suficiente de bombonas de butano que aseguren el abastecimiento durante largos periodos de tiempo.

Las energías renovables, en concreto la solar térmica, también son utilizadas para el abastecimiento de ACS. Necesitan de un sistema de apoyo para no tener un superficie de colectores solares excesiva.



Para no tener dos clases de combustibles en estas instalaciones es recomendable que el sistema de calefacción y el de ACS utilicen el mismo tipo de combustible.

### 2.5.1.2 Selección del tipo de Pila de Combustible

Si queremos integrar un sistema de pila de combustible en una vivienda sin conexión a red, el tipo de pila más adecuado por el momento es la denominada de Membrana polimérica (PEMFC) aunque existe algún fabricante trabajando sobre otro tipo de solución.

Trabajaremos sobre esta clase de pila ya que se encuentra en un grado de desarrollo bastante avanzado para estas aplicaciones y son

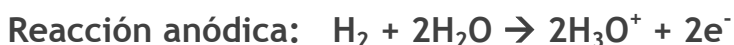
las que el mercado está ofreciendo fundamentalmente para este tipo de aplicaciones, gracias al empuje que le ha dado el sector del automóvil, con lo que en poco tiempo serán comerciales. Además, trabaja a una temperatura de 80 °C, lo que permite operar el sistema con cierta seguridad y sencillez en los equipos.

Es capaz de proporcionar electricidad y calor a baja temperatura para suplir las necesidades de electricidad, agua caliente, calefacción y aire acondicionado.

Es una pila de las denominadas de baja temperatura ya que trabaja a 80 °C; para ello debe estar refrigerada, de este modo mantenemos la temperatura de funcionamiento a la vez que aprovechamos el calor extraído para calefacción y agua caliente. El fluido refrigerante será agua.

Estos son algunos datos característicos de las PEMFC:

Temperatura	80 - 100 °C
Combustible	Hidrógeno, Gas Natural Reformado Externo
Refrigerante	Agua
Presión	=< 1 atm
Voltaje celda	0.92 voltios
Densidad de corriente	2.1 KA/m <sup>2</sup>
Rendimiento eléctrico	55 %
Venenos	CO, compuestos de S



Gracias a los materiales de construcción intrínsecos, es posible su operación sostenida a densidades de corriente muy elevadas. Estos



atributos le proporciona una capacidad de arranque rápido y la posibilidad de hacer una pila compacta y ligera. Entre otros atributos interesantes destaca la ausencia de fluido corrosivo, con su peligro de fugas, que proporciona una baja sensibilidad a la orientación.

La operación a baja temperatura tiene la ventaja de que la celda puede ponerse en marcha rápidamente desde las condiciones ambientales, especialmente cuando existe H<sub>2</sub> disponible. El inconveniente es que requiere catalizador de Pt para promover la reacción electroquímica.

El Pt a 80 °C puede tolerar solamente unas pocas ppm de CO. Los hidrocarburos reformados suelen contener un 1 % de CO. Por lo tanto, si esta pila se va a alimentar con hidrocarburos reformados como metanol o gas natural, es necesario un sistema con un mecanismo que reduzca a mínimos el contenido de CO en el gas combustible a la celda.

Uno de los puntos clave de las celdas de polímero es la necesidad de mantener la membrana polimérica fuertemente hidratada para lograr una conductividad iónica adecuada. Existe un paso de agua del ánodo al cátodo por electro-ósmosis con el protón que supone entre 1 y 2,5 moléculas de agua por protón. La retrodifusión de agua desde el cátodo al ánodo a través de una membrana de pequeño espesor equilibra a la electroósmosis con el resultado de un transporte neto de agua de casi cero durante su operación.

Sin embargo, si no se controla el balance de agua en la celda puede producirse un desequilibrio entre la producción de agua y su evaporación dentro de la misma, lo que puede dar por resultado o una inundación de los electrodos o una deshidratación de la membrana, siendo ambas situaciones muy negativas para su funcionamiento. La

adherencia de la membrana al electrodo se verá afectada negativamente si se produce su deshidratación. El contacto íntimo entre la membrana y la superficie del electrodo es de suma importancia ya que no existe un electrolito líquido libre que pueda formar un puente conductor. Si lo que sucede es que se elimina más agua de la que se produce, entonces se hace imprescindible humidificar el gas anódico entrante. La práctica más utilizada para scontrolar este problema es humidificar los gases reactantes que entran a la pila.

El material standard para el electrolito más utilizado en la actualidad es la membrana polimérica basada en teflón completamente fluorado.

Los electrodos actuales se moldean como películas finas que contienen un 10 % de Pt sobre soporte de carbón con un peso específico de 4 mg / cm<sup>2</sup>. Estas películas de electrodo se adhieren a las membranas por ambas caras. Los colectores de corriente, que se sitúan adyacentes a la cara posterior de los electrodos, son piezas de papel hifrífobo de fieltro de carbón, los que además proporciona cierta rigidez a la celda. La placa bipolar se fabrica de material de grafito. La refrigeración se logra bombeando agua a través de refrigerantes integrados dentro de la pila, permitiendo un salto térmico siempre inferior a 10 °C a través de la celda. Las partes conductoras de la estructura de la pila se fabrican de titanio y las no conductoras de polisulfona.

La introducción de la pila se haría de una forma totalmente integrada ya que tanto reformador (si lo hubiese), purificadores, stack y acondicionador de potencia serían equipos compactos contenidos en un mismo pack.

El agua de refrigeración de la pila se utilizaría para calentar un depósito de agua (para cubrir las necesidades de ACS) y para circular por una red de radiadores o de tubos (en caso de suelo radiante) con objeto de satisfacer las necesidades de calefacción. Otra opción es utilizar una red de fan coils por la que circule agua caliente o fría según la época.

Se necesitaría un depósito de combustible para almacenar el gas que ha de abastecer a la pila. Este depósito se instalaría fuera de la casa a una distancia de seguridad y podría ser enterrado o superficial. El combustible utilizado podría ser gas natural. Mediante un reformador se acondicionaría el gas de entrada a la pila para que tuviese un alto contenido en H<sub>2</sub>.

Para la obtención de frío utilizaremos un equipo de ventana, fan coil o un split, que serán alimentados por la energía eléctrica que genera la pila.

El carácter modular y portátil de este tipo de pilas, así como su tamaño, permite ir ampliando la potencia de la instalación según las necesidades.

La baja temperatura de la pila (80 °C) le permite un rápido arranque que no supera los 10 minutos.

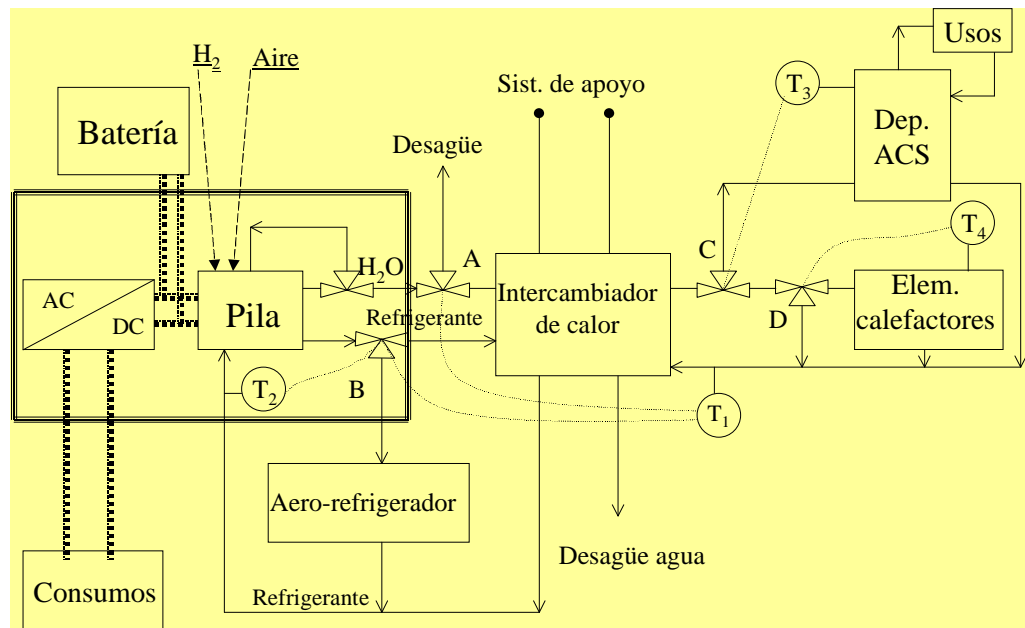


Figura 17. Diagrama de bloques de una aplicación residencial remota

Como el funcionamiento de la pila lleva implícito la generación de calor trataremos de aprovechar al máximo ese calor para satisfacer las necesidades de ACS y calefacción.

Con este objeto trataremos de minimizar la emisión de calor a la atmósfera. En cualquier caso se dispondrá de una batería de aero refrigeradores para cuando no sea posible aprovechar el calor residual de la pila.

Una pila de combustible genera aproximadamente la misma cantidad de kW térmicos que eléctricos. Este calor proviene tanto del reformador como de la refrigeración de la pila.

El esquema típico de una instalación residencial remota sería la que se presenta en la Figura 17 (soluciones propuestas en Ref. 3). La pila funcionará tratando de abastecer las necesidades de calor de ACS y calefacción, independientemente de las necesidades eléctricas. Este funcionamiento implica que unas veces generaremos más electricidad

de la necesaria y otras menos. Con lo que surge la necesidad de instalar un conjunto de baterías que funcionarán como generador o acumulador dependiendo de la demanda y la generación.

El sistema será regulado por una serie de válvulas que actuarán dependiendo de los valores de temperatura que se detecten en unos sensores, permitiendo la apertura total o parcial de las distintas válvulas.

Otra forma de funcionar sería sin baterías. La calefacción utilizaría una bomba de calor (en verano tendríamos aire acondicionado) que estaría alimentada por la electricidad que da la pila. El calor excedente de la pila se acumularía en forma de agua caliente en un depósito, para ser utilizada como ACS.

El esquema de funcionamiento de la aplicación residencial remota sin baterías se esquematiza en la Figura 18.

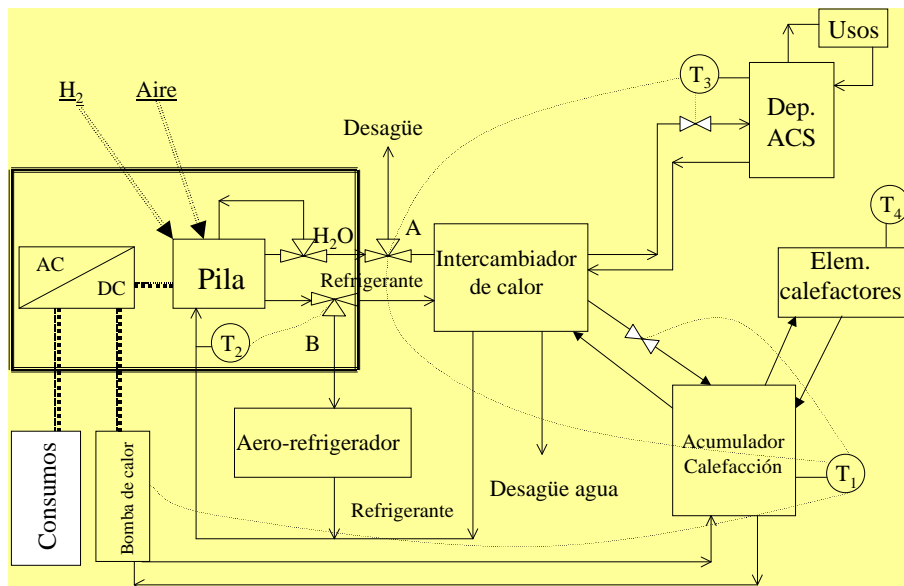
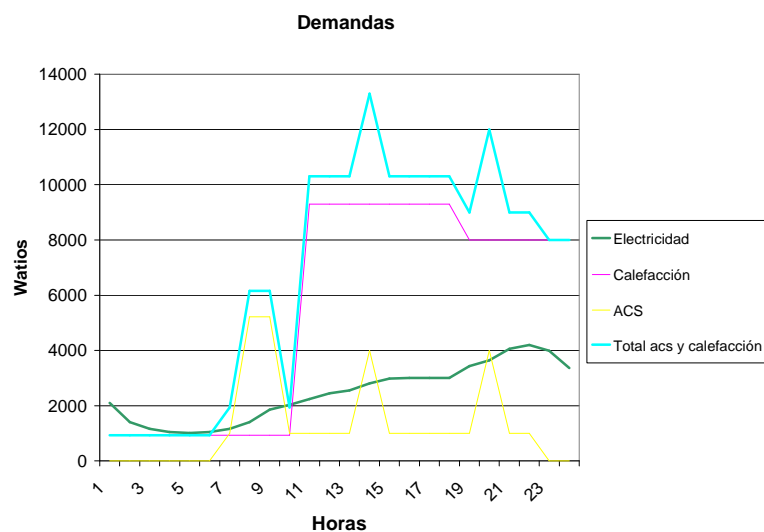


Figura 18. Diagrama de bloques de una aplicación residencial remota sin baterías.

Esta última forma de funcionar es la más apropiada, ya que la energía sobrante es térmica, que es más barata y fácil de acumular que si sobrase energía eléctrica.

### 2.5.1.3 Integración de las pilas de combustible

Hasta ahora se ha analizado con que sistemas podemos abastecer las necesidades de viviendas sin conexión a la red, el tipo de necesidades, así como el tipo de pila con el que realizaríamos el suministro de las necesidades energéticas. Se analizará a continuación cómo se puede integrar una pila de combustible en una aplicación residencial para abastecerla de electricidad, calor y frío.



Gráfica 1. Análisis de la demanda energética de una aplicación residencial.

En primer lugar es necesario conocer la demanda energética de la instalación a lo largo de un día. La Gráfica 1 ofrece el resultado de este análisis, para una instalación tipo en ella pueden observarse los perfiles de demanda para electricidad, calefacción y ACS. A la gráfica

se ha añadido una curva nueva que es la suma de las necesidades térmicas de calefacción y de ACS.

Observando la Gráfica 1 podemos apreciar la gran diferencia existente entre la cantidad de kW eléctricos y térmicos necesarios en la instalación. Teniendo en cuenta que una pila produce aproximadamente el mismo número de kW eléctricos que de térmicos resultaría que una pila que siguiera la curva de demanda eléctrica no proporcionaría las necesidades térmicas suficientes requeridas por la vivienda.

Para solucionar este problema, ya que se busca que la pila abastezca todas las necesidades de la casa, es posible optar por dos soluciones distintas. La primera de ellas consistiría en producir electricidad en exceso, cuando las necesidades de calor lo requieran, almacenándola en unas baterías que devolverían la energía eléctrica al sistema cuando no hubiese necesidades de calor.

Este sistema es muy costoso debido al alto precio que presentan las baterías. Un esquema de este sistema es el representado de forma esquemática en la Figura 17.

El refrigerante que abandona la pila en el esquema de la Figura 17, acumulará el calor de refrigerar la pila, y en caso de tener reformador parte del calor del reformador. El refrigerante es introducido en un intercambiador en el que cede el calor al agua que va al depósito de acumulación de ACS y al circuito de calefacción. En caso de no necesitar calor para el ACS y la calefacción se abre la válvula B que hace que el refrigerante pase por una batería de aerefrigerantes, para robarle el calor al refrigerante y así poder mantener la temperatura de la pila. La pila produce electricidad en corriente continua con lo que se conecta con un acondicionador de potencia

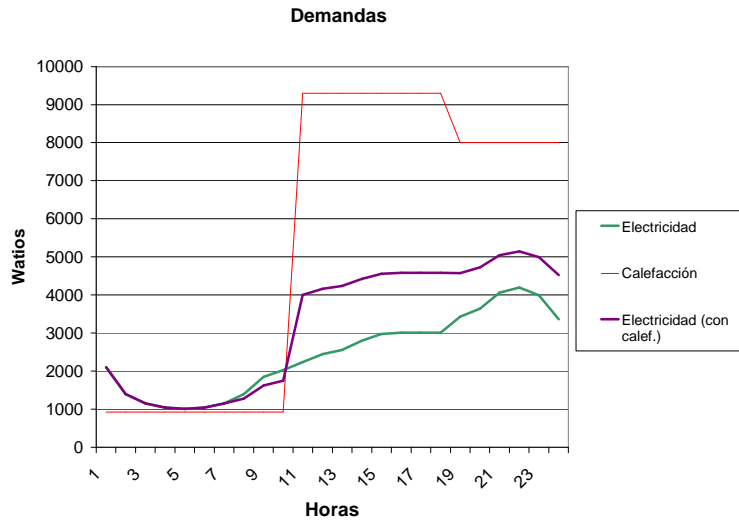
para poder suministrar la corriente eléctrica para el consumo en las condiciones necesarias. Entre el acondicionador de potencia y la pila se conecta una serie de baterías para poder almacenar la energía sobrante y suministrar energía en los momentos en que la pila no produzca la suficiente. Una serie de termostatos controlan las temperaturas en cada parte de la instalación, actuando si fuese preciso sobre unas servo-válvulas que se encargan de mantener la instalación en las condiciones requeridas.

La otra solución para el total abastecimiento de energía con la pila viene esquematizada en la Figura 18. Este sistema prescinde del uso de baterías y además permite la producción de frío para el aire acondicionado.

Con este método se abastecerá, con el calor que nos proporciona la pila, las necesidades de ACS y una pequeña parte de las de calefacción. Para el abastecimiento de calefacción contaremos con una bomba de calor, que se encargará de producir agua caliente. Este agua es acumulada en un depósito para su posterior uso en el circuito de calefacción. El circuito de calefacción estará constituido por un sistema de fan-coils. Este mismo sistema es el que se utilizará en verano para la producción de aire acondicionado.

Para abastecer las necesidades de calefacción con una bomba de calor, se necesitará aumentar la potencia eléctrica de la pila. Por cada kW eléctrico se pueden conseguir tres kW térmicos en una bomba de calor, además al aumentar la potencia eléctrica de la pila se aumentará consecuentemente, la cantidad de calor cedido por la pila. El resultado se representa en la Gráfica 2.

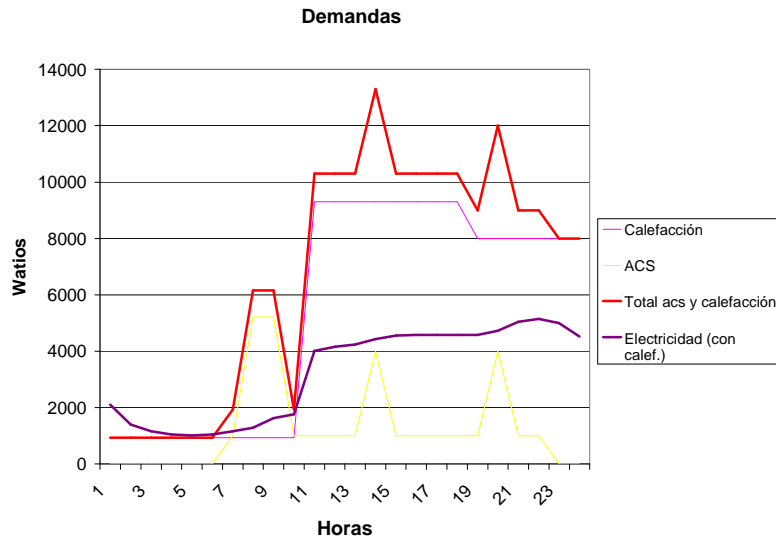




Gráfica 2. Necesidades energéticas utilizando bomba de calor

En la Gráfica 2 aparecen dibujadas la curva de demanda de calefacción, la de electricidad antigua y la nueva. La diferencia entre las dos curvas de demanda eléctrica es la potencia que absorbe la bomba de calor. La nueva curva de demanda eléctrica se ha incrementado hasta un nivel que permitirá satisfacer las necesidades de calefacción y de electricidad.

Se representa en la Gráfica 3, todas las curvas de demanda, donde se ha incluido la nueva curva de demanda eléctrica y la curva de la demanda térmica total (térmica + ACS).



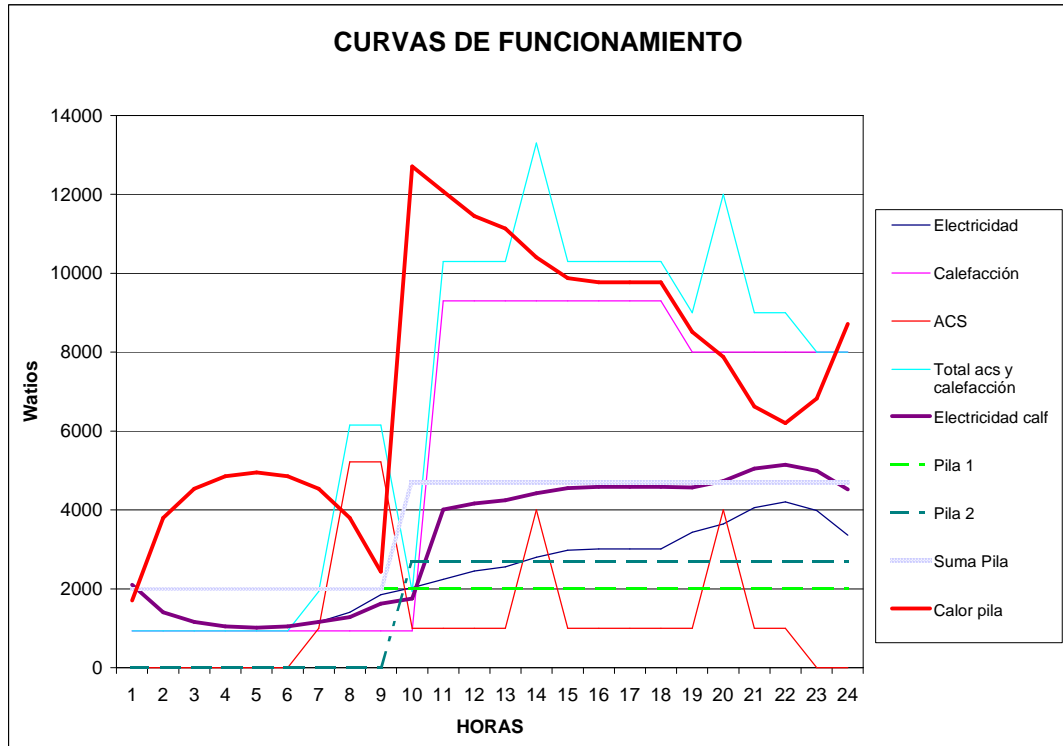
Gráfica 3. Demandas eléctricas y térmicas globales.

El funcionamiento de la instalación será sin baterías, se debe encontrar para ello, una forma de operación en la que no existan ni excedentes ni falta de suministro eléctrico.

Se analizarán dos formas de funcionamiento, en ambas se pretende que la pila funcione de forma bastante constante, para evitar tener que estar variando la potencia de la pila constantemente para adecuarse a las distintas demandas.

La primera opción de funcionamiento consistirá en operar con dos pilas base. Dos pilas de baja potencia (< 3 kW) manteniendo constantemente el mismo nivel de potencia una vez que empiezan a funcionar. Una de ellas funciona las 24 h. del día a una potencia de 2000 W, la segunda arranca a las 10 de la mañana para operar hasta las 12 de la noche a una potencia de 2700 W. Este sistema presenta la ventaja de que al tener dos pilas, en caso de avería de unas de ellas, se podría funcionar con una, abasteciendo parte de las necesidades de la instalación. Además, el funcionamiento al mismo nivel de potencia,

sin subidas ni bajadas de la misma, proporciona una operación más fácil y segura.



Gráfica 4. Modo de potencia constante con dos pilas en aplicación residencial.

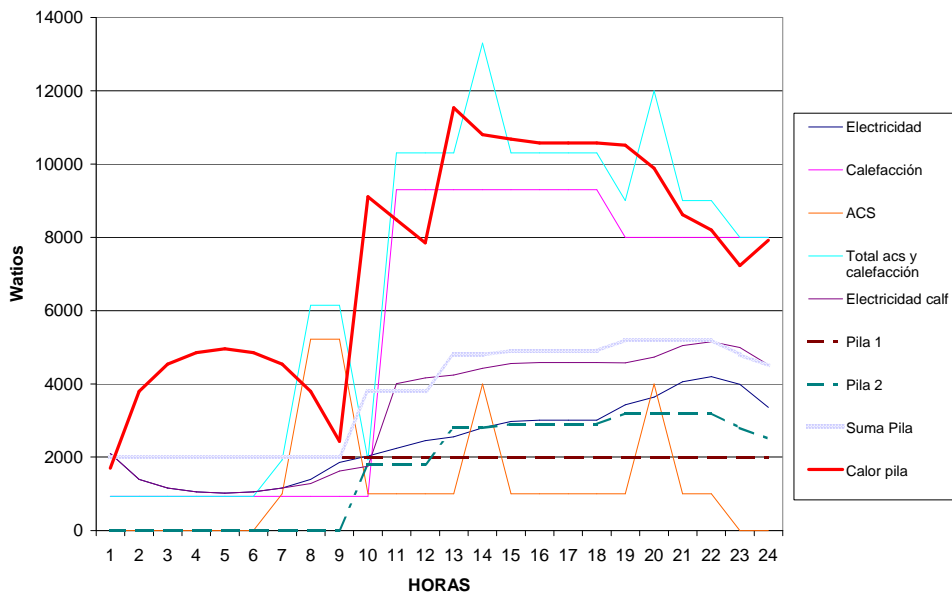
En la Gráfica 4 se representa esta forma de funcionamiento. También se ha representado el calor cedido al sistema por la pila y la bomba de calor. Este calor debe ser mayor o igual al demandado por el sistema a lo largo del día. Si analizamos el calor cedido al sistema a lo largo del día observamos que unas veces estamos por encima de la demanda total y otras por debajo. Esto hace necesario un sistema de acumulación de agua caliente del que podamos servirnos cuando falta calor en la instalación y podamos almacenar cuando estemos produciendo calor por encima de la demanda. Los niveles de potencia de las pilas deben estar calculados para que siempre se puedan situar por encima de la demanda eléctrica primaria (sin bomba de calor) y

para que el balance de producción - consumo de calor esté equilibrado durante las 24 horas.

Se aprovecharán las horas nocturnas, a partir de la 1 de la mañana, para acumular calor para calefacción y ACS, pues a las 8 y 11 de la mañana se producen las puntas de consumo de ACS y calefacción respectivamente. Este pico se aprecia en el gráfico en las horas de madrugada y corresponde al calor generado por la bomba de calor. El calor que genera la pila permanece constante, porque la potencia de la pila está fijada en 2 kW, pero al descender la demanda eléctrica y estar la pila a potencia constante, cada vez es mayor la potencia destinada al funcionamiento de la bomba de calor. A partir de las 14 horas vemos en el gráfico como la producción de calor está por debajo de la demanda hasta que finaliza el día. Esto implica que hemos tenido que estar acumulando calor durante el resto del día, con lo que se necesitará un depósito de acumulación de cierto tamaño.

La segunda opción de funcionamiento consistirá en operar sólo con una pila base, mientras que con la otra se realizará un seguimiento de potencia según las necesidades de la instalación. En la Gráfica 5 vienen representadas las curvas características de este modo de funcionamiento.

**CURVAS DE FUNCIONAMIENTO**



Gráfica 5. Modo de seguimiento con dos pilas en aplicación residencial

La filosofía del funcionamiento es igual a la del primer caso. La novedad de este sistema consiste en que se regula más la potencia de la pila, y de este modo efectuamos un seguimiento de la demanda en cada momento. Como resultado de esta forma de operar, tenemos que el depósito de acumulación es más pequeño, alternándose durante el día los periodos en los que acumulamos o cedemos energía térmica.

El inconveniente de este sistema es que durante todo el día estamos regulando la potencia de la pila, ya que va siguiendo a la demanda de energía de la instalación. La pila que actúa como base, tiene la misma potencia que su homóloga del caso anterior, pero la que sigue a la demanda es de mayor potencia que cualquiera de las pilas del primer caso. Esto puede encarecer la instalación, aunque en caso de avería de la pila base disponemos de mayor potencia, con lo que conseguiríamos un abastecimiento mínimo mejor que en el primer caso.

A la hora de elegir entre estas dos formas de operación, es más sencilla la primera, aunque se necesitará disponer de un depósito de acumulación más grande, pero el modo de operación sería más cómodo y seguro. En una instalación aislada de red el espacio disponible no suele representar un problema por lo que disponer de un depósito de mayor tamaño no sería en principio un inconveniente. Sin embargo, a un sistema de abastecimiento se le pide la mayor simplicidad posible, de forma que no haya que estar pendiente de su funcionamiento.

La Figura 18 representa el esquema de una instalación que funcionara con una de las dos formas expuestas anteriormente.

La caja que aparece en la figura doblemente rayada, representa el paquete en el que estaría incluida la pila, el acondicionador de potencia y el reformador si lo hubiese. Todo de tal forma que para el consumidor represente un solo equipo.

El calor del reformador y de refrigeración de la pila se transfiere al intercambiador de calor, allí cede su calor al agua que llega hasta el depósito de acumulación de ACS, si sobrara calor se enviaría al depósito de acumulación de calefacción. Como en este tipo de viviendas el espacio, en general, no supone un problema se puede disponer de dos depósitos distintos y de esta forma independizar el sistema de ACS y el de calefacción.

La bomba de calor, que está conectada a la pila, calienta agua para cederle su calor al depósito de acumulación de calefacción. La calefacción consistirá en una red de tuberías de agua que llevarán el calor hasta una serie de fan-coils distribuidos por toda la casa. En verano, y gracias a la independencia del sistema de ACS y el de calefacción, se puede invertir el ciclo en la bomba de calor para

obtener agua fría y utilizar los fan-coils para proporcionar aire acondicionado.

Una batería de aero-refrigerantes se encargará de enfriar el refrigerante de la pila, cuando por cualquier causa no se aproveche su calor.

## 2.5.2. Viviendas con conexión a red

### 2.5.2.1 Sistemas actuales de abastecimiento

En esta clase de viviendas el abastecimiento de electricidad no es ningún problema, ya que la red suministra potencia con una fiabilidad muy alta. Esta característica hace que se pueda utilizar incluso la calefacción eléctrica. El uso de aire acondicionado no es ningún problema ya que disponemos de potencia suficiente como para satisfacer las necesidades de frío.

Para el suministro de calefacción hay múltiples sistemas. La mayoría de ellos ya han sido explicados en el caso de viviendas sin conexión a red. Como sistemas nuevos, que no se usen en el caso de sin conexión a red, sólo cabe nombrar el de calefacción eléctrica y el de calentador instantáneo de ACS y calefacción.

La calefacción eléctrica consiste en aprovechar el calor generado por el efecto Joule. Este calor es proporcional a la intensidad que circula y al cuadrado de la resistencia del conductor. El efecto Joule se puede usar directamente mediante una batería de resistencias a través de la

cual circula el aire, o alternativamente mediante el calentamiento de agua que se almacena en unas superficies por las que pasa el aire.

El calentador instantáneo de ACS y calefacción se utiliza en viviendas pequeñas, en las que no hay demasiados radiadores. En un mismo calentador de pared se calienta el agua del circuito de calefacción cuando lo indica un termostato, o se calienta instantáneamente el ACS que se va a consumir.

Para el abastecimiento de ACS se pueden usar los sistemas a base de caldera de gas o fuel oil, que calientan tanto el agua de la calefacción como el del ACS. También son muy usados los calentadores instantáneos de gas.

En este tipo de viviendas aparece la posibilidad de calentar agua para consumo mediante resistencias eléctricas. El agua calentada por este método se almacena en un depósito para su posterior uso. Es común el uso de la electricidad en las horas de la noche, tarifa nocturna, para almacenar energía en forma de agua caliente para las necesidades de ACS y calefacción. La razón es que por la noche el precio del kW eléctrico es mucho más barato que durante el día.

Hay varias soluciones para obtener el aire acondicionado en una casa con conexión a red: Equipos de ventana, sistema split y multi-split.

Su funcionamiento está basado en el ciclo frigorífico clásico: compresor, condensador, válvula de laminado y evaporador. Se impulsa aire a la habitación mediante un ventilador que hace pasar al aire a través del evaporador, consiguiendo de esta forma que el aire entre a la habitación a una temperatura aproximada de 11 °C. El aire de la calle se impulsa a través del condensador para poder condensar el fluido frigorígeno.



En zonas climáticas como Madrid las necesidades de frío se calculan a razón de 115 frigorías/h m<sup>2</sup>.

### 2.5.2.2 Selección del tipo de Pila de Combustible

En el apartado 2.5.1.2 ya fue presentado un análisis de las características de las Pilas de Combustible a fin de evaluar cual era el tipo de pila más adecuado para aquella aplicación. Al igual que en las viviendas sin conexión a red, el tipo de pila más aconsejable para viviendas con conexión a red, por todas las ventajas ya citadas, es la PEMFC.

En cuanto al combustible, el más cómodo de usar sería el gas natural, debido a la infraestructura existente en gran parte de las ciudades. Las casas sin acceso a la red de distribución de gas tendrían que recurrir a los depósitos de gas propano o butano.

En un futuro se podría utilizar la red de gas existente para el suministro de H<sub>2</sub>, pero a día de hoy la obtención de hidrógeno es todavía una técnica muy cara.

Puesto que nuestra pila va a ser alimentada por gas natural, necesitaremos de un reformador que convierta la corriente de gas natural en una corriente de gas rica en H<sub>2</sub>. El reformador estará totalmente integrado en el conjunto de la pila así como el acondicionador de potencia.

El acondicionador de potencia deberá de ser de gran calidad ya que en este tipo de aplicaciones surge la posibilidad de ceder energía a red. Se convertirá la corriente continua que genera la pila a corriente

alterna a 220 V y 50 Hz. El nivel de armónicos debe cuidadosamente controlado para no producir distorsiones en el sistema.

Además de los contadores obligatorios en las viviendas se instalarán unos contadores que permitan el cómputo de la energía que se vende a red.

En el siguiente apartado vamos a analizar las distintas formas posibles de integrar una pila de combustible en una casa con conexión a red.

### 2.5.2.3 Integración de las pilas de combustible

Para la integración de las pilas de combustible, en una vivienda con sistemas descentralizados y conexión a la red, existen varias posibilidades de funcionamiento. Aquí vamos a tratar de estudiar las soluciones más óptimas para el usuario, es decir, aquellas que le supongan el máximo ahorro y confort.

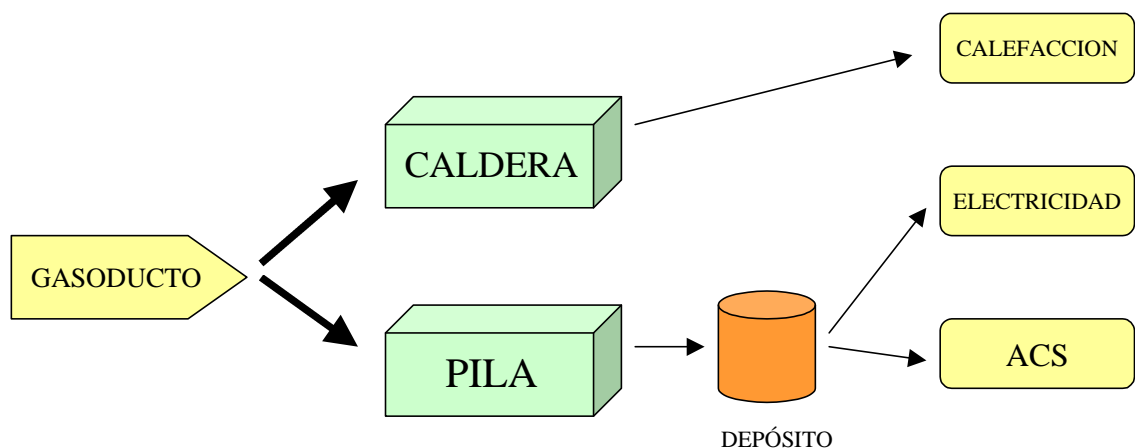


Figura 19. Gestión del suministro energético en una vivienda conectada a red.

En Figura 19 se presenta un esquema del primer caso que se va a analizar (Ref. 3).

Trataremos de asegurar el total abastecimiento de ACS mediante el calor generado en la pila, de tal forma que aprovechemos todo este calor desperdiciar nada, de este modo conseguiremos aumentar el rendimiento global de la instalación.

Supondremos para los casos que vamos a estudiar que hasta la casa llega la red de distribución de gas natural.

El suministro de calefacción se hará con una caldera de gas natural, esta forma es la más cómoda ya que disponemos de una tubería de gas “in situ”. En la caldera se calentará el agua que circulará por la red de radiadores distribuidos por toda la casa.

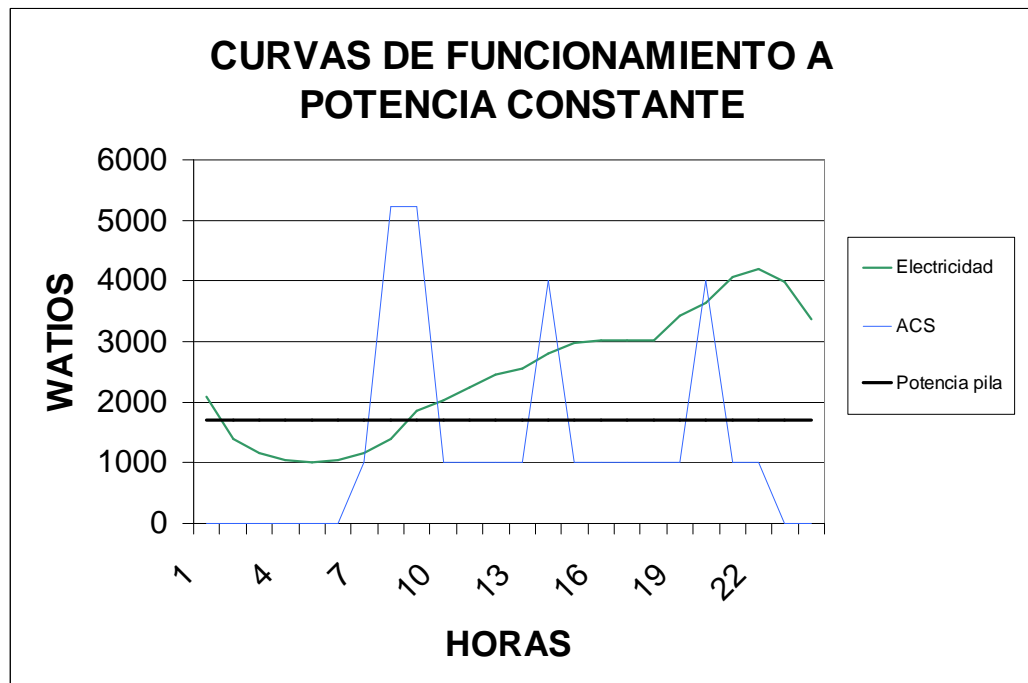
La demanda eléctrica será cubierta tanto por la red como por la pila. Esta doble posibilidad de suministro, acompañada a la posibilidad de ceder energía a la red, nos obligará a disponer de todos los equipos eléctricos necesarios para el correcto funcionamiento de la instalación. Estos equipos incluyen, además del acondicionador de potencia integrado en el sistema de la pila, los contadores y protecciones oportunas para este modo de funcionamiento.

El suministro de ACS se realizará mediante depósito de acumulación, con el fin de poder ir almacenando el calor que cede la pila en los momentos de baja o nula demanda de ACS. Todo el calor producido por la pila será utilizado para satisfacer las necesidades de ACS, sin que sobre ni falte nada. Esto nos obligará a que la pila funcione a un régimen que nos garantice este modo de operación.

La pila funcionará a potencia constante las 24 horas del día. Esta característica de funcionamiento hace que tengamos que consumir de la red más de un 30 % de nuestras necesidades.

En la Gráfica 6 se representan las demandas de ACS y electricidad así como la potencia a la que funcionaría la pila.

Vemos como durante las horas de madrugada y primeras horas de la mañana, la pila genera más calor y electricidad que la que le demanda la instalación. Este calor lo almacenamos en forma de agua caliente en un depósito para satisfacer la demanda de ACS. La electricidad que no se consume se cede a la red, consiguiendo unos ingresos que ayudan a amortizar antes la instalación.



Gráfica 6. Funcionamiento de la Pila a Potencia constante

La pila funciona a una potencia constante de 1700 W, lo cual quiere decir que durante el resto del día la generación de la pila se situará por debajo de la demanda y se deberá mantener la conexión con la red. En cuanto a la demanda de ACS, se van alternando los periodos en los que se sitúa por encima o por debajo de la demanda.

La instalación con este tipo de funcionamiento se caracteriza por su simplicidad y reducido tamaño, ya que la pila es de baja potencia y el acumulador de ACS es de tamaño reducido.

Como inconveniente a este tipo de solución, frente a las que veremos a continuación, es el elevado consumo de red en horario en el que no se dispone de la tarifa nocturna.

En la Figura 20 se puede observar el esquema propuesto para la instalación. Las líneas gruesas de un solo trazo representan el circuito de calefacción, los consumos a 90 °C será el agua que pase por los radiadores. Las líneas de punto y raya representan el circuito de ACS. Vemos cómo el calor que sale de la pila llega hasta el depósito de agua, la calienta y vuelve para cerrar el circuito. Desde el depósito se alimenta con agua a 45 °C todos los consumos. Las líneas de doble trazo representan el circuito eléctrico. Del acondicionador de potencia la energía eléctrica ya sale apta para el consumo o para ser vendida a la red de baja tensión.

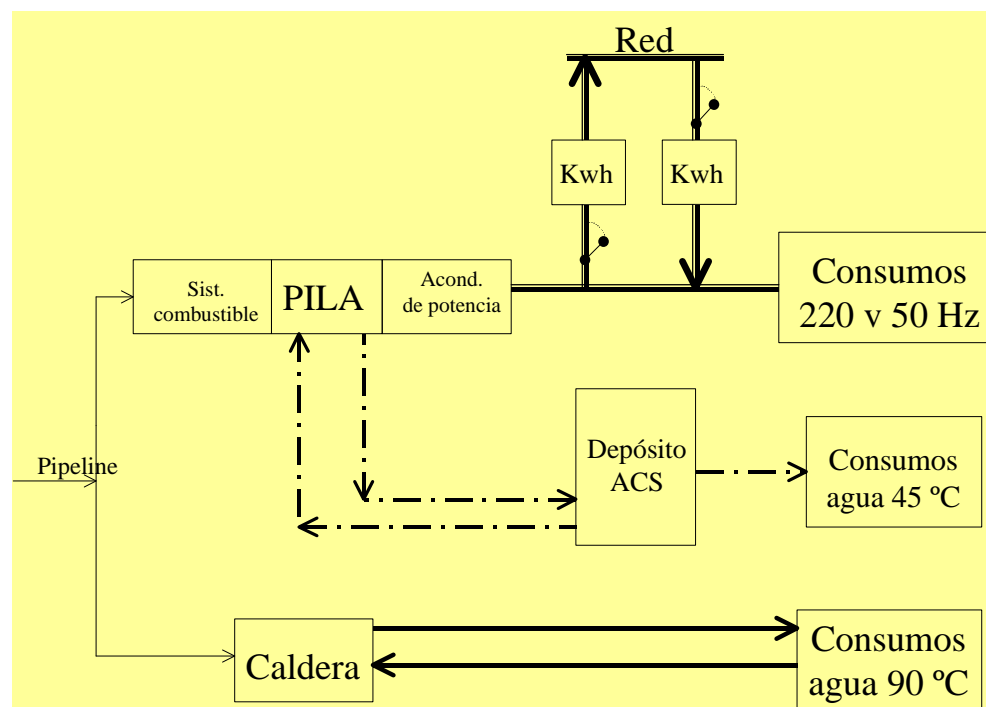


Figura 20. Esquema de utilización de una pila en una vivienda conectada a red.

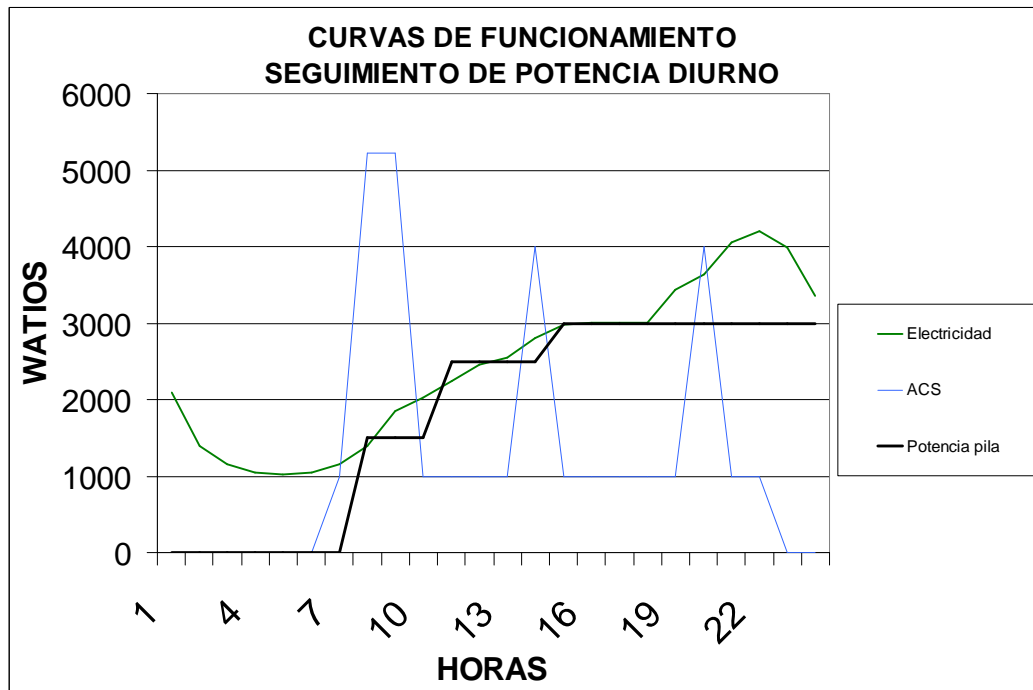
La segunda solución que se propone para este tipo de instalaciones, sigue un esquema muy parecido al anterior. La calefacción se solucionará, también, mediante una caldera de gas y una red de radiadores, siendo su funcionamiento independiente del de la pila. El ACS se abastecerá por un sistema de acumulación, aprovechando todo el calor de la pila.

En la Gráfica 7 están representadas las curvas de funcionamiento de la instalación. La pila está toda la noche sin funcionar y conectándose a las 9 de la mañana. En este caso la Pila realizará un seguimiento de la demanda alternándose los momentos en que se cede energía a la red o se consume de ella. En todo caso, son cantidades de energía muy pequeñas por encima o por debajo de la demanda. Cuando a las siete de la tarde se inicia la subida en la demanda, para llegar al máximo a las once de la noche, la pila se mantendrá a potencia constante, 3000 W, con objeto de no aumentar innecesariamente la potencia de la pila para su utilización en tan sólo unas pocas horas.

Durante el día se aprovecharán los momentos de mayor producción de calor que el que se demanda para almacenarlo en un depósito de acumulación, que deberá ser más grande que en el caso anterior.

Este sistema tiene la ventaja de que se consume una pequeña cantidad de la red, con el consiguiente ahorro que ello supone para el usuario. Sólo en dos momentos del día se tendrá un consumo apreciable de la red. El primero de ellos se produce durante la noche y el segundo en las horas que dura la punta del consumo. Durante la noche se puede utilizar la tarifa nocturna, esto unido al bajo consumo durante la noche hace que el ahorro sea mayor. En las horas que dura

la punta, aproximadamente 4 horas, la máxima diferencia de potencia es de 1 kW.



Gráfica 7. Funcionamiento de la pila en seguimiento de potencia diurna.

La instalación sigue siendo muy simple y de reducido tamaño, y sólo el depósito de acumulación aumenta un poco sus dimensiones. La gran diferencia con el caso anterior es el aumento en la potencia, tamaño, de la pila; hemos pasado de una pila de 1700 W, a una de 3000 W.

El esquema de este tipo de instalaciones es la misma que para el caso anterior (Figura 20), siendo los comentarios a realizar del mismo tipo que los efectuados para el anterior modo de funcionamiento.

Por último, analizaremos el tercer modo de operación. En la Figura 21 aparece dibujado un esquema de la instalación, en la que se utilizará el calor de la pila, no sólo para satisfacer las necesidades de ACS sino también para realizar el suministro de calefacción.

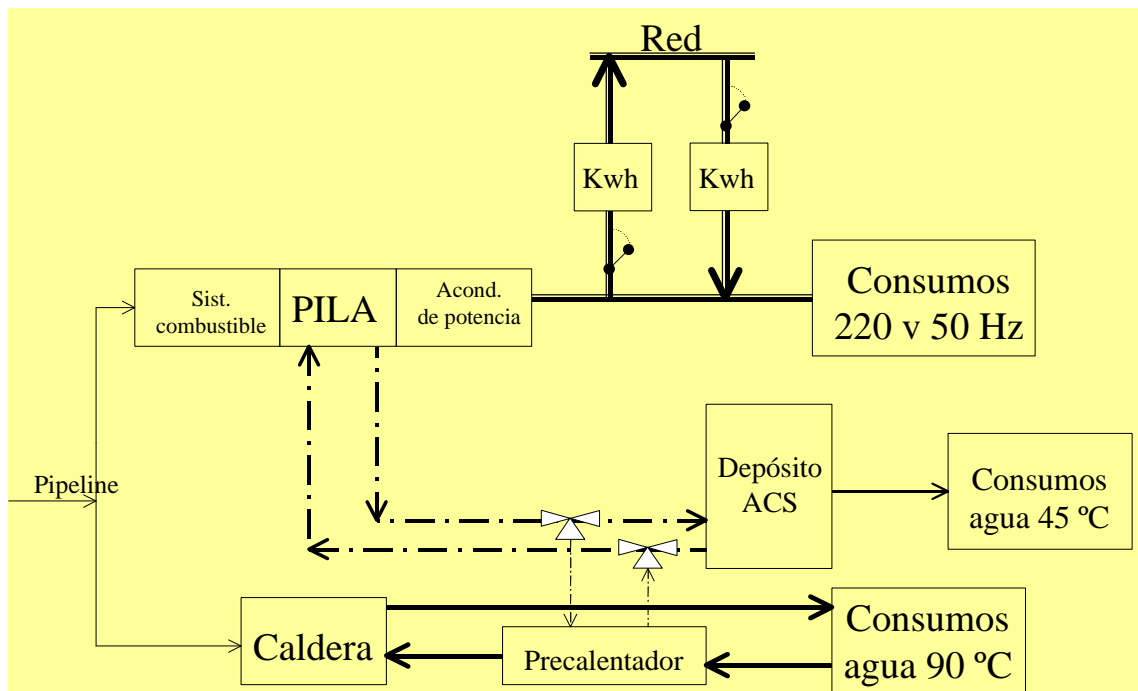


Figura 21. Utilización de una pila cubriendo necesidades de calefacción.

La calefacción ahora no se realiza tan sólo con una caldera de gas. El calor obtenido de la pila, y una vez satisfecha la demanda de ACS, es enviado a un precalentador situado en el retorno del circuito de calefacción. De esta forma se consigue aumentar la temperatura del agua que se dirige a la caldera, para conseguir una disminución en el consumo de ésta. El precalentador no funcionará siempre, sólo dará servicio cuando las necesidades de ACS queden cubiertas.

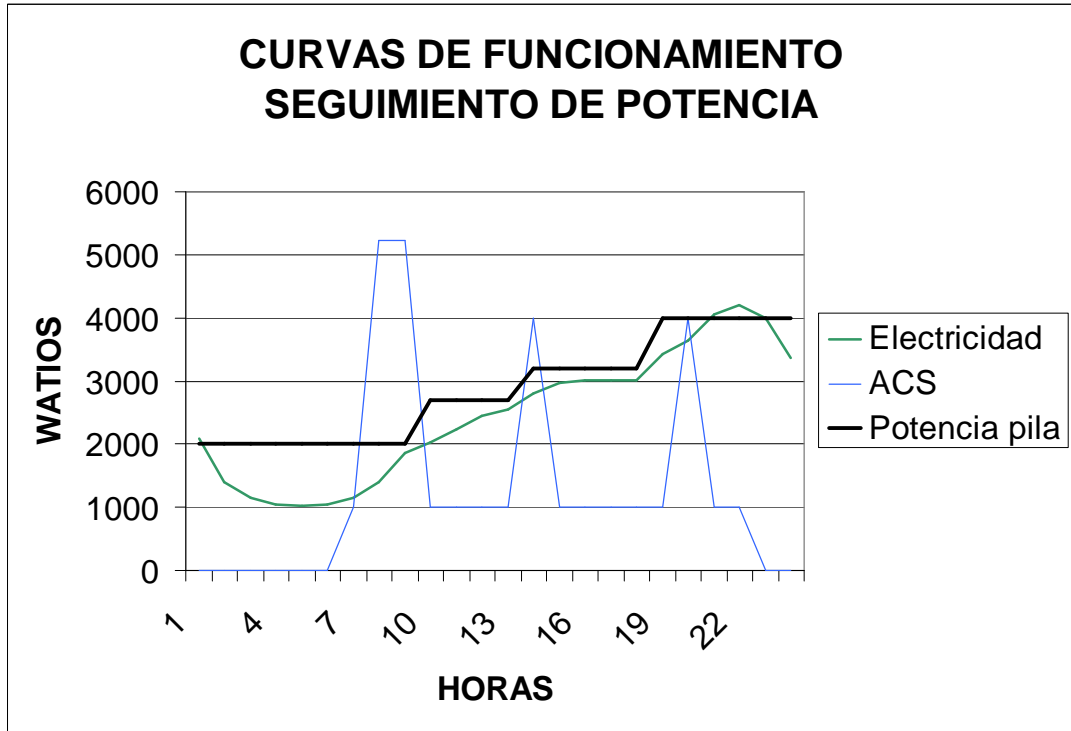
El resto de la instalación es igual que en los casos anteriores, como se puede concluir de la observación de la Figura 21.

En la Gráfica 8 están representadas las curvas de demanda de ACS y electricidad, así como la curva de potencia de la pila.

La pila funciona durante todo el día a una potencia superior a la demandada por la instalación, mediante sucesivos escalones se va ajustando a la demanda pero siempre por encima de ella. Sólo durante



un espacio de una o dos horas la demanda supera a la producción de la pila, se trata del momento en que la vivienda está en las horas de máxima demanda.



Gráfica 8. Funcionamiento de la pila en seguimiento de potencia

Como consecuencia de este modo de funcionamiento la pila es de gran potencia, 4 kW, más del doble que en el primer caso. Debido al alto nivel de potencia de esta pila, el calor generado es bastante mayor al requerido por el sistema de ACS, con lo que en vez de desperdiciar este calor se utilizará en un precalentador del sistema de calefacción. El total aprovechamiento del calor generado por la pila queda garantizado gracias a la interconexión del circuito de refrigeración de la pila y el sistema de calefacción.

Tabla 1. Análisis comparativo de los diferentes sistemas de gestión residencial conectados a red

	VENTAJAS	DESVENTAJAS
CASO 1	<p>Uso todo el calor de FC. Instalación simple. Pila pequeña, baja potencia. Total abastecimiento ACS. Depósito de acumulación pequeño. Cedemos energía a red. Funcionamiento a un solo nivel de potencia.</p>	<p>Elevado consumo de red. No abastece de calefacción. Cedemos energía a la red en horas valle. Funciona las 24 h.</p>
CASO 2	<p>Uso todo el calor de FC. Instalación simple. Total abastecimiento ACS. Cedemos energía a la red y consumimos según el momento del día. Funcionamiento a diferentes niveles de potencia.</p>	<p>No abastece de calefacción. Pila de media potencia. Funcionamiento a varios niveles, control más complejo. Depósito de acumulación de ACS grande.</p>
CASO 3	<p>Uso todo el calor de FC. Total abastecimiento de ACS y parte de calefacción. Mínimo consumo de red. Cedemos energía a red.</p>	<p>Funciona las 24 h. Abastece una parte importante de la calefacción. Funcionamiento a varios niveles de potencia. Pila de elevada potencia. Instalación compleja. Sistema de control complejo.</p>

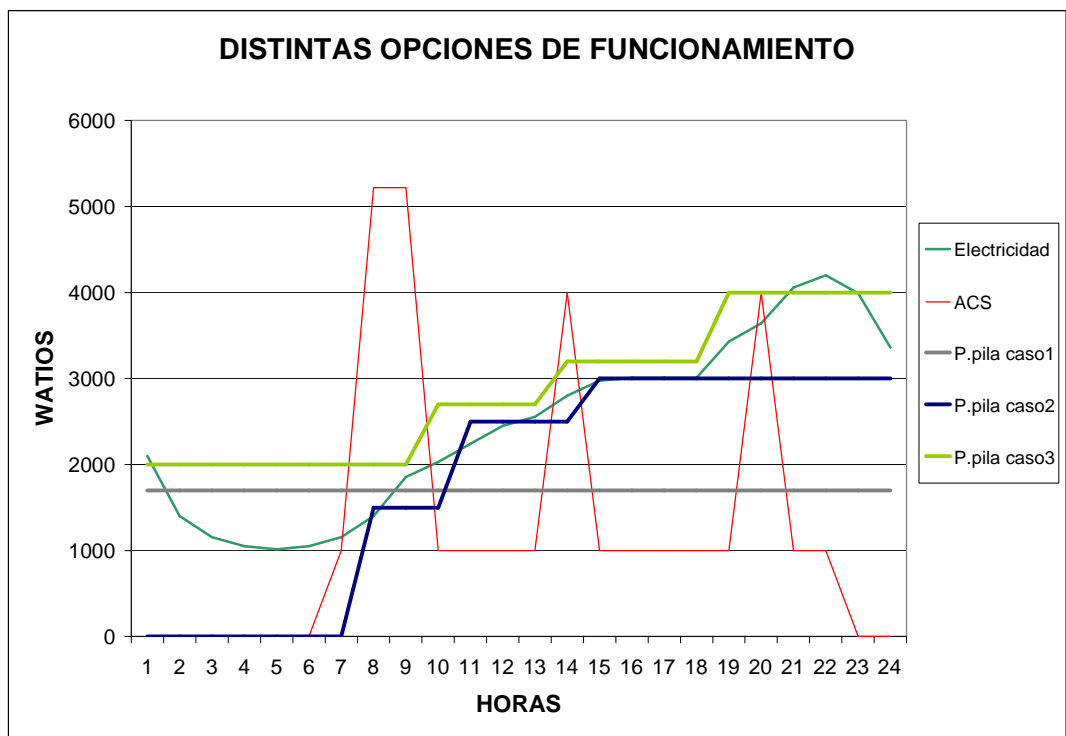
Mediante escalones de potencia vamos siguiendo con la pila la curva de demanda eléctrica, pero siempre por encima, de tal forma que podemos estar vendiendo todo el día energía a la red.

Para la acumulación de la energía térmica se necesitará un depósito de gran tamaño de tal forma que no se desaproveche la energía térmica procedente de la pila.

La instalación será de mayor tamaño, debido principalmente al tamaño de la pila y al sistema de transferencia de calor desde la pila hasta el sistema de calefacción. La operación será ligeramente más compleja debida a los continuos cambios de potencia de la pila para efectuar el seguimiento de la demanda.

En la Tabla 1 se presenta un cuadro resumen con las principales ventajas y desventajas de cada uno de los tres tipos de instalación.

De los tres casos, el tercero es el que mayor ahorro supone para el usuario, ya que es el que menos consume de red y además el que más exporta a la red. Sin embargo es la solución que más complica la instalación, tanto en cuanto a sistemas y dimensiones cómo a funcionamiento. Por esta razón, el sistema más apropiado para una casa que dispone de conexión a red sería el primer caso, ya que la instalación es muy simple, de pequeño tamaño y también supone un importante ahorro frente a la solución tradicional



Gráfica 9. Resumen de todos los casos.

En la Gráfica 9 se representan las curvas de funcionamiento de los tres sistemas explicados anteriormente. Podemos apreciar como en el caso 1 la pila es de reducido tamaño, de fácil operación y supone un importante ahorro en cuanto a consumo eléctrico y térmico.

### 3. Otras aplicaciones de Generación Distribuida de electricidad.

Ya se ha comentado en este trabajo que las posibilidades de utilización de las Pilas de Combustible eran muy amplias y de hecho sus específicas características pueden ser consideradas como idóneas para su utilización en aplicaciones de Generación Distribuida. En este apartado nos ocuparemos de aquellas aplicaciones específicamente dedicadas a la producción de energía eléctrica pero que no pueden ser consideradas, por su tamaño y ubicación, como de Generación centralizada. Así si observamos la Figura 22 podemos ver como existen un innumerable grupo de aplicaciones ligadas a las redes de distribución de energía eléctrica (Ref. 12).

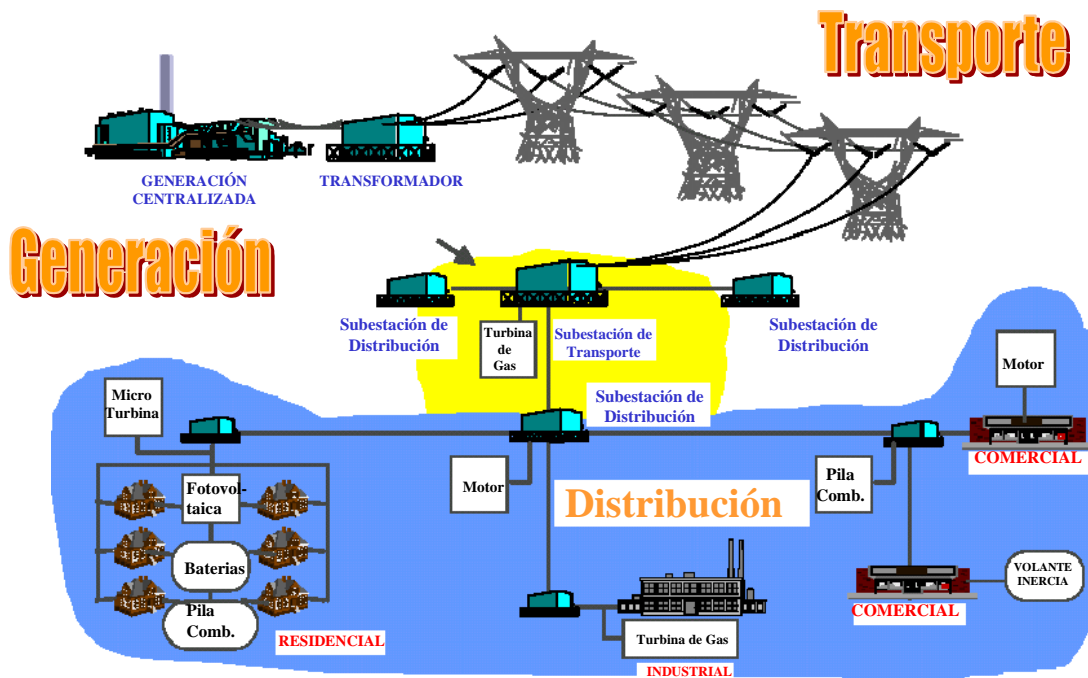


Figura 22. Aplicaciones de las Pilas en las redes de Distribución.

Ya en la Figura 1 se apuntaban algunas de estas aplicaciones, que se pueden resumir en la Tabla 2.

Tabla 2. Características de las aplicaciones de generación de electricidad en la generación distribuida.

Aplicación	Función	Características
Ampliación de centros	Refuerzo de potencia en zonas de Distribución, sin necesidad de ampliar las líneas de acceso.	Potencias entre los 250 kW y los 40 MW, sistema estacionario ó portátil, control remoto,

		conexión a red.
Regulación de tensión	Permite asegurar un suministro de calidad en líneas largas o que presentan fluctuaciones de la tensión de red.	Potencias entre 5 y 20 MW, alta fiabilidad, sistema centralizado, control remoto, sistema de control de tensión.
Seguridad local de abastecimiento	Aseguramiento de la calidad estándar de la red con adición de sistemas de alta fiabilidad próximos al centro de consumo.	Potencias superiores a 10 MW, sistema integrado, integración de procesador en la pila de combustible, conexión a red, alta calidad de suministro, inversor con capacidades autónomas.
Laminación de cargas	Permite eliminar los picos de consumo, sin necesidad de ampliar los servicios de la red.	Potencias entre 5 y 50 MW, estacionarios o móviles gestión autónoma, sistema modular, inversores seguidores de red de gran potencia.
Suministros de alta calidad	Permite ofrecer servicios de alta calidad de suministro a clientes que lo soliciten.	Potencias entre 1 y 20 MW, estacionarios o móviles, gestión autónoma, sistema modular, inversores autónomos.

Las aplicaciones presentadas cubren un amplio espectro de posibilidades en cuanto a rango de potencia, pues pueden fluctuar desde varios kW hasta decenas de MW.

Las aplicaciones para Energía Eléctrica están marcadas por su robustez y duración, a cualquier aplicación de este tipo se le exige una vida media elevada (40.000 horas) con un mantenimiento mínimo, en otro caso no serían competitivas con los sistemas de generación convencional.

Se tiende a funcionar en puntos de operación con menor densidad de corriente que en otras aplicaciones, buscando la mejor eficiencia y el menor coste de operación posible. Este modo de operación es en general el modo de funcionamiento elegido para los sistemas estacionarios.

Dadas las potencias involucradas estas aplicaciones tenderán a utilizar tecnologías que operan a altas temperaturas, en las cuales la conjunción de generación eléctrica y la obtención de calor (que se transformará a su vez en energía eléctrica) daría lugar a un rango de potencias variando entre los 100 kW y los 50 MW ó incluso más.

Estas aplicaciones están todavía sujetas a desarrollos a futuros dado su coste actual.

Lógicamente en muchos casos se involucra en el esquema de operación ciclos con turbina que mejoran sustancialmente la eficiencia del sistema.

El funcionamiento a presión en estos sistemas permitirá incrementar la respuesta de la pila pero comprometerá el coste de todo el sistema, por lo que deberá ser analizado cuidadosamente. No obstante lo anterior, resulta también posible utilizar pilas de baja temperatura para alguna de estas aplicaciones.

A continuación se presentarán varios ejemplos para ilustrar adecuadamente las aplicaciones propuestas y su forma de funcionamiento.

En primer lugar ofreceremos una solución propuesta por Ballard precisamente con una pila PEMFC (Ref. 10, Ref. 11).

La utilización de pilas PEMFC involucra al menos dos cuestiones de tipo técnico a resolver, para estas aplicaciones de gran potencia, la primera de ellas se refiere a la baja temperatura de funcionamiento que provoca que la producción de vapor sea de baja calidad en lo que se refiere a su posible uso como fluido caloritámico y la propia gestión del agua en el sistema ya que por otro lado resulta necesario para el adecuado funcionamiento de la Pila, un exceso o un defecto en la cantidad de agua involucrada en el funcionamiento de la misma provocará fuertes disminuciones en la eficiencia de la misma. Al tratarse de una Pila PEMFC, el tratamiento de los gases exige un considerable esfuerzo considerando la gran sensibilidad que estas pilas presentan al CO, CO<sub>2</sub> y metano. El gas entra directamente a un compresor y al sistema de limpieza de gases, teniendo en cuenta que la fuente utilizada es gas natural, el sistema de limpieza de gases deberá incluir un desulfurador, ya que en otro caso el azufre actuaría de veneno con los catalizadores existentes. A continuación la corriente de alimentación es hidratada en un vaporizador. El vaporizador utiliza como fuente energética la corriente de salida del reformador. A continua la corriente de entrada de gas humidificado pasa al reformador de vapor. La corriente de alimentación tras el reformado de vapor sigue conteniendo una importante cantidad de CO por lo que pasará consecutivamente a un

convertidor Shift y un reactor de oxidación selectivo o reactor catalítico, reduciéndose así el contenido de CO a entre 10 y 50 ppm, valores ya aptos para ser introducidos en la Pila.

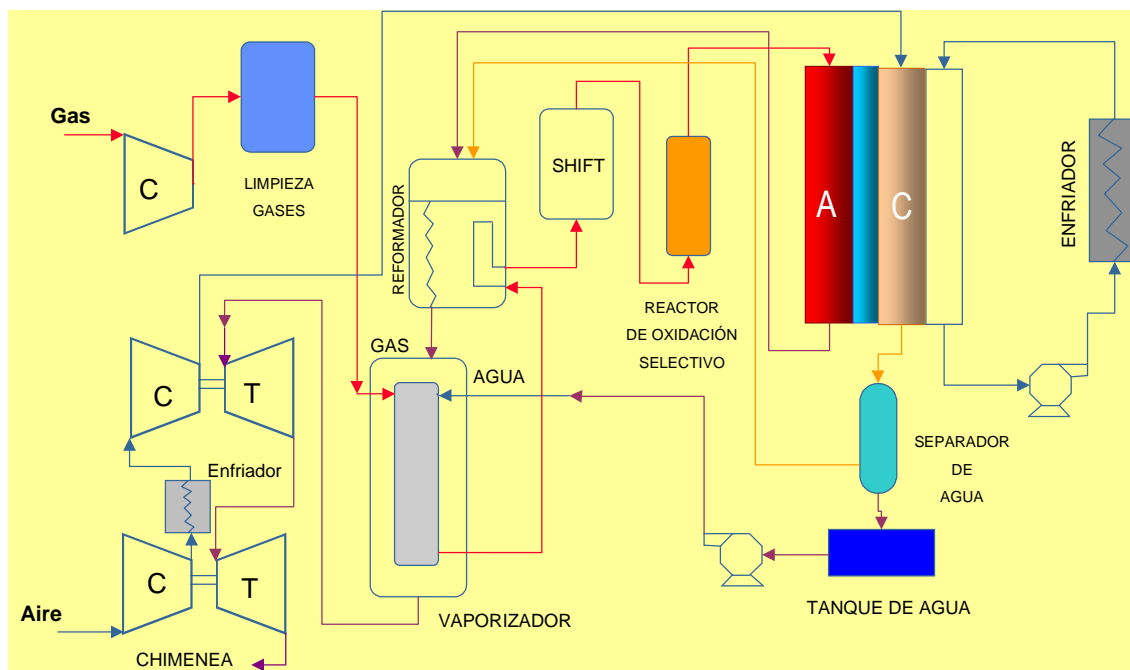


Figura 23. Planta de producción con pila PEMFC y alimentada con gas natural.

Por su parte el aire ambiente antes de ser introducido en la Pila es comprimido en dos etapas, para controlar la temperatura del aire de alimentación, ya que de hecho debe ser enfriado a la salida del primer compresor. La energía necesaria para la compresión es aportada por la expansión de los exhaustos de salida del proceso en sendas turbinas.

El aire así tratado es directamente alimentado a la pila. La salida del oxidante es conducida a un tanque separador de agua donde se recupera parte de la misma y se reutiliza en la humidificación de la corriente de entrada de gas. Por otro lado ambas corrientes de salida son utilizadas para proveer el calor requerido en el reformador de vapor. Por otro lado la salida de los exhaustos del reformador son utilizados a su vez para proveer la energía necesaria en el vaporizador. Finalmente la corriente de exhaustos (calor y presión residuales) es conducida a los turbo - expansores que proveen la energía necesaria para la compresión del aire de entrada.

Los valores de referencia para esta aplicación son los siguientes:

- Temperatura de operación : 80 °C

- Presión de operación: 3-4 atm.
- Densidad de potencia: 180 - 250 mW/cm<sup>2</sup>.
- Potencia de la planta: 250 kW

A continuación expondremos un ejemplo de planta de producción utilizando una pila de alta temperatura, muchos esquemas de este tipo han sido presentados para ilustrar las posibilidades de las pilas de carbonatos fundidos (MCFC), por distintos fabricantes.

El esquema propuesto en este caso parte de un estudio inicial de MCFC Power. Al igual que el anterior ejemplo el gas natural es limpiado en una unidad de tratamiento de gas eliminando el azufre que pueda contener. Se añade vapor a la corriente de entrada y esta mezcla es alimentada al reformador de vapor. El gas así reformado es alimentado directamente a la pila, que opera típicamente a una temperatura de 650 °C y 3 atmosferas. En este caso no son necesarios los pasos intermedios de tratamiento del gas de entrada para eliminar el CO pues en estas pilas este material es también un combustible, susceptible de ser utilizado.

Los exhaustos del gas son re-alimentados junto con parte del oxidante utilizado para proveer energía al reformador de vapor. Una soplante situada en esta corriente de reciclo se encargará a su vez de mantener la presión en el reformador y a la entrada de la pila. Esta corriente de reciclo es adecuadamente mezclada con aire comprimido y alimentado a la pila para proveer el dióxido de carbono necesario en el cátodo.

La corriente de salida del cátodo es dividida en dos una que se envía al reformador de vapor y reciclada y otra parte que es conducida a un turbo-generador que permite por un lado generar la energía necesaria para mover un compresor y el generador eléctrico.



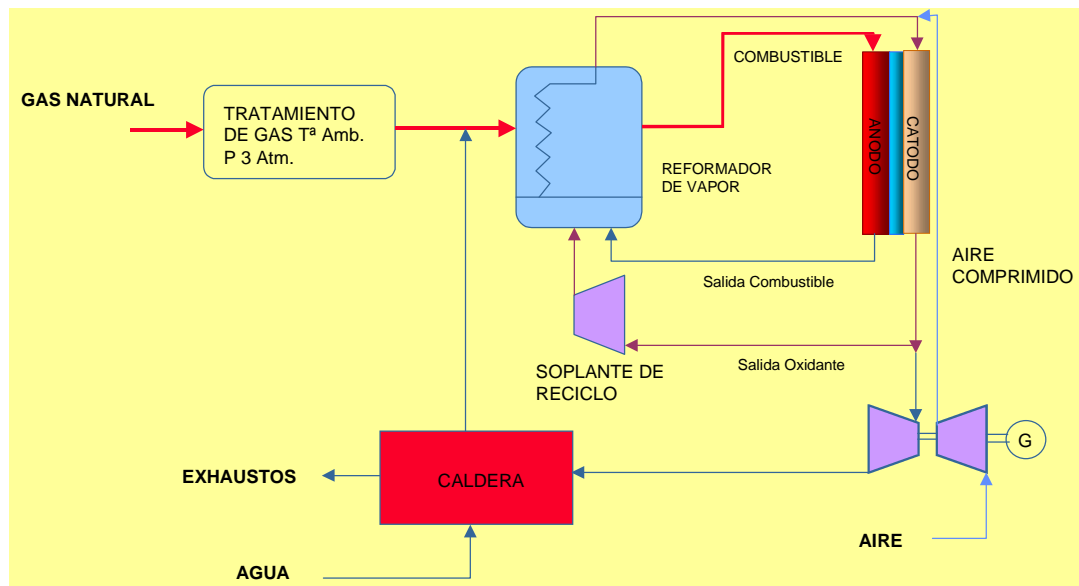


Figura 24. Esquema de una planta de Carbonatos Fundidos utilizando Gas Natural.

Los exhaustos del turbo-generador son conducidos a una caldera donde se genera el vapor necesario para el reformador de vapor.

Los valores de referencia para esta aplicación son los siguientes:

- Temperatura de operación : 650 °C
- Presión de operación: 3-4 atm.
- Potencia de la planta: 1.1 MW

#### 4. Generación Centralizada de electricidad.

La generación centralizada de electricidad está en la actualidad lejos de poder ser utilizada ya que como se analizó en anteriores capítulos las potencias actuales de las plantas disponibles no permiten llegar a las potencias que se usan para en estas aplicaciones, típicamente superiores a 200 MW.

En estas aplicaciones es aplicable todo lo comentado anteriormente con respecto al tipo de pila a utilizar y de hecho las propuestas que se pueden encontrar en la literatura utilizan siempre Pilas de alta temperatura. Las horas de operación aquí son ya críticas, ya que la posibilidad de usos de las pilas en estos sistemas vendrá fuertemente condicionada por el aumento de su vida útil.

El ejemplo propuesto aquí ha sido seleccionado cuidadosamente entre los disponibles a fin de ilustrar un proceso que pueda ser de gran interés para España, donde disponemos de abundante carbón de pobres características en su mayoría, no por ello desdeñable como fuente autóctona y no dependiente del exterior de energía. La propuesta, recogida en una de las publicaciones del Departamento de Energía Americano (Ref. 17), incorpora un gasificador de carbón, ya que este será el combustible base utilizado, adecuadamente gasificado. La planta propuesta podría tener unas dimensiones de 500MW, ya en un orden de magnitud de las plantas de generación centralizada.

La propuesta utiliza una pila de combustible de Óxidos Sólidos (SOFC), del tipo Siemens Westinghouse (Ref. 14, Ref. 16) y consiste en un gasificador tipo Destec en cascada con dos pilas funcionando a dos niveles distintos de presión, junto con una turbina con recalentamiento integrado y una turbina de vapor recalentado en ciclo de cola.

La parte de alta presión del ciclo operará a 15 atmósferas para disponer de un ratio razonable para la turbina de gas, una presión de 30 atmósferas ofrecería un ratio más adecuado pero sería poco realista para la pila.

El gasificador Destec es del tipo de lecho arrastrado (Ref. 15) y será alimentado con una mezcla de agua y carbón y oxígeno prácticamente puro (95%), opera con eficiencias bastante altas (84%). El gas de salida (>1.000 °C) debe ser enfriado lo que se consigue interponiendo un enfriador que será el encargado de suministrar vapor al ciclo de cola. A continuación el gas enfriado ( $\approx 600$  °C) pasa por un desulfurador en

caliente y por un desulfurador de óxido de zinc sucesivamente donde se disminuirá el contenido de azufre a niveles inferiores a 1 ppm antes de alimentar la pila de alta presión (400°C). Otra parte de la corriente saliente se expande en una turbina hasta valores de  $\approx 4$  atmósferas (220°C) y se lleva a la pila de baja presión.

Por su parte el aire es comprimido hasta las 15 atmósferas de trabajo y unos 400°C, aún deberá ser aumentada su temperatura antes de entrar al cátodo de la pila de alta presión.

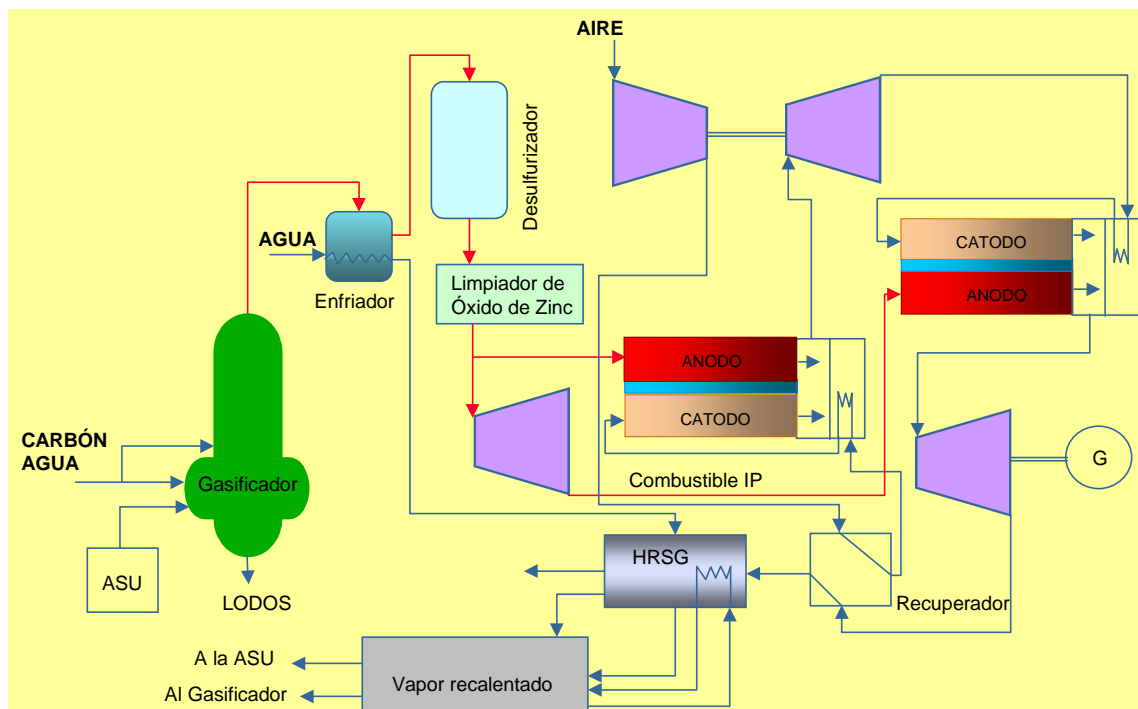


Figura 25. Planta de Pila de combustible utilizando gas carbón.

Los exhaustos de la pila, carburante y oxidante son quemados en una cámara interna lo que permitirá suministrar más calor a la corriente oxidante antes de entrar en la pila.

Los exhaustos de la pila de alta presión ( $\approx 1.000^{\circ}\text{C}$ ) serán conducidos a una turbina de expansión cuya energía será utilizada para mover los compresores necesarios. Esta corriente de alimentación es directamente alimentada a la pila de baja presión, ya que aunque viciado todavía contiene una cantidad importante de oxígeno (14%).

De nuevo el carburante y oxidante exhaustos son quemados y se envían directamente a una turbina de baja presión, este grupo turbina generador produce a su vez en el entorno de 150 MW. Los exhaustos de salida de la turbina de baja presión todavía

mantienen una temperatura de alrededor de los 700°C por lo que pueden ser utilizados para el precalentamiento de la corriente de oxidante de entrada en la pila de alta presión. Tras este intercambiador la corriente habrá descendido su nivel calórico entre 100-150°C pero aún puede ser utilizado para suministrar calor al ciclo de cola.

El vapor generado en el ciclo de cola será utilizado en una turbina con recalentamiento y que permitirá a su vez obtener una generación eléctrica de alrededor de 120 MW adicionales así como vapor suficiente para alimentarla Unidad de Suministro de Aire (ASU) y el calentamiento de la mezcla agua carbón del gasificador.

Las potencias eléctricas suministradas por la planta se distribuirán como sigue:

Generación de las pilas (alta y baja presión):	311 MW
Pedidas de conversión (Inversor):	10 MW
Generación neta de las Pilas:	301 MW
Turbina de exhaustos:	134 MW
Turbina ciclo de cola:	120 MW
Expansor de carburante:	10 MW
Potencia total:	565 MW
Potencia auxiliar:	41 MW
Potencia neta total:	524 MW

Ver también otras opciones presentes en Ref. 18.

## 5. Transporte y automoción.

Finalmente y a modo de reflexión se analizará el esquema seguido en transporte utilizando Pilas de Combustible como elemento motor.

En primer lugar se ha de tener en cuenta que el vehículo en cuestión para que sea totalmente comparable con los vehículos comerciales debe disponer de todo lo necesario para su puesta en marcha, operación en distintos regímenes y finalmente su desconexión o parada.

Por otro lado deberán estar resueltos los problemas de reposición de combustible y no por último menos importante todos los elementos deberán situarse en el vehículo de forma adecuada y segura.

En principio todos los vehículos ligeros, que son a los que nos referiremos en este apartado están montado pilas de tipo PEMFC, en el ejemplo escogido de la Figura 26 se ha optado por utilizar como combustible metanol, como caso más complicado, ya que en caso de utilizar hidrógeno directamente bastará con eliminar el reformador y depurador de combustible aunque habrá que solucionar la problemática inherente al almacenamiento del hidrógeno, con los problemas de seguridad que ello pueda comportar.

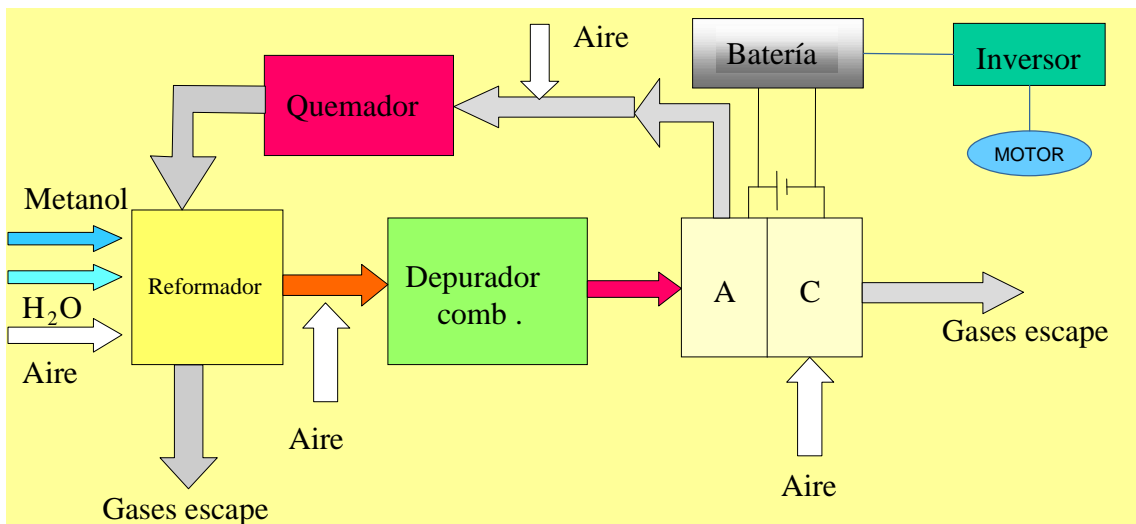


Figura 26. Esquema interno de un vehículo a Pila de Combustible.

Así el vehículo alimentará el reformador con metanol y agua, la energía necesaria para la puesta en marcha del reformador, el vapor necesario en el reformado y pila será

inicialmente suministrada por un quemador que utilizará igualmente metanol como carburante. Se incorporará un depurador, constituido básicamente por un reformador catalítico, encargado de eliminar el posible CO presente en la corriente de salida del reformador, antes de suministrarlo a la pila.

La pila por su parte generará energía en corriente continua que alimentará a una batería de almacenamiento. La batería de almacenamiento debe estar calculada de manera que permita disponer de la energía suficiente para la puesta en marcha del vehículo y para atender las variaciones de carga en periodo de funcionamiento.

Otros vehículos son obviamente susceptibles de utilizar pilas de combustible para su funcionamiento como aviones, barcos y submarinos. Para estos últimos se habla de pilas de alta temperatura ya que los submarinos requieren de suministro permanente de energía y por tanto el problema de marcha / parada que exige un gran esfuerzo energético y en muchos casos involucra esfuerzos mecánicos y energéticos considerables no parece tan problemático, como en los vehículos automóviles. En cualquier caso estos diseños están actualmente en desarrollo.

## 6. BIBLIOGRAFIA Y REFERENCIAS

- Ref. 1. Practical Strategies to reduce the complexity and cost of fuel cell to facilitate early and succesfull implementation with electricity storage. Comercially viable electricity storage. J.García Martín. IIR ENERGY SERIES.
- Ref. 2. Integración de las pilas de combustible en los procesos Industriales y Comerciales. IBERDROLA. Javier Bonilla, J.García Martín, J.Tagle.
- Ref. 3. Integración de pilas de combustible en viviendas. IBERDROLA. Javier Bonilla, J.García Martín, J.Tagle.
- Ref. 4. Fuel Cells. Green Power. Office of Advanced Automotives Technologies. U.S.Department of Energy. Joann Milliken.
- Ref. 5. Energy technologies for the 21<sup>st</sup> century. IEA.OECD.
- Ref. 6. Engineering evaluation of enrgy systems. Arthur P. Fraas. Mc Graw Hill.
- Ref. 7. Fuel cells. Clean power, clean transport, clean future. David Hart & Ausilio Bauen. FT Energy.
- Ref. 8. European Fuel Cell projects 1995 - 2000. European Commission.
- Ref. 9. Manual de Pilas de Combustible. IBERDROLA. J.García Martín, A. Pantoja et al.
- Ref. 10. Tolerance for PEMFC. David P. Wilkinson (Ballard Power Systems). Symposium on new materials for fuel cells. Montreal-1997.
- Ref. 11. Fuel cell handbook. J.H.Hirschenhofer, D.B.Stauffer, R.R.Engleman & M.G.Klett. Parsons corporation.
- Ref. 12. Analysis of distributed energy resources. EPRI.
- Ref. 13. Fuel Cell Handbook . Appleby,A.J., Van Nostrand Reinhold.
- Ref. 14. SOFC Demonstration Plant in Norway by Siemens Westinghouse and Norske Shell. Siemens-Westinghouse.
- Ref. 15. Gasification. The key to a cleaner future. David J.White. FT Energy.
- Ref. 16 Solid Oxide Fuel Cell Combined Cycles. F.P.Bevc, W.L.Lundberg & D.M.Bachovchin. International Gas Turbine aeroengine Congress. Birmingham. UK.
- Ref. 17. Parsons Energy, work for U.S. DOE.

Ref. 18. Different options for integrated coal gasification fuel cell power generation plants and their potential to reduced Co2 emissions. D.Jansen, A.B.J.Oudhuis, J.S.Ribberink. Conference on gasification power plants. San Francisco. USA.