

## 4 Tecnologías de generación de energía eléctrica a partir de biogás.

### 4.1 Turbinas y microturbinas.

Generalmente las plantas con turbina de gas se utilizan para cubrir cargas pico, como sistema de respaldo o bien, si se tiene acceso a un combustible barato, para cubrir la carga base. Los componentes básicos de una planta con turbina de gas son: un compresor, una cámara de combustión y una turbina.

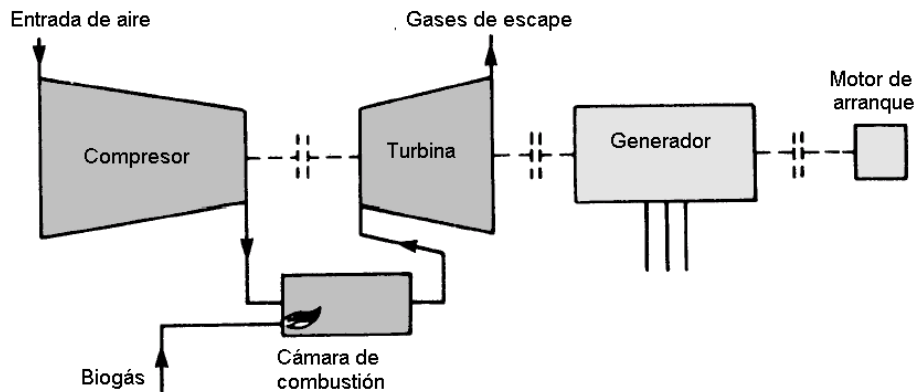


Figura 4.1 Modelo del funcionamiento de una planta con turbina de gas.

Se absorbe aire del ambiente y se comprime en el compresor, éste aire es dividido a la entrada de la cámara de combustión; parte de éste es usado para la combustión, y la otra parte actuará como enfriador. En la cámara de combustión es introducido el biogás y la combustión toma lugar. A la salida de la cámara se une el aire para enfriar con los gases de combustión para pasar a la turbina a una temperatura adecuada, donde se expanden y transfieren su energía a ésta, para finalmente ser expulsados [17].

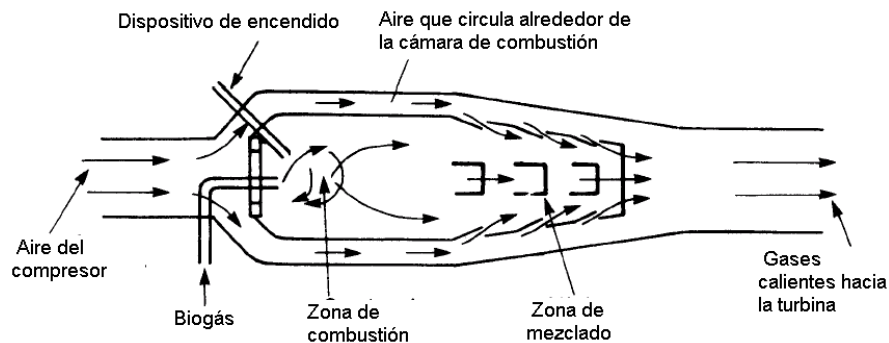


Figura 4.2 Cámara de combustión

Aproximadamente  $\frac{2}{3}$  de la potencia desarrollada por la turbina son utilizados para accionar al compresor el resto se utiliza para producir la potencia eléctrica. La turbina de gas debe ser arrancada con un motor, mientras el compresor corre lo suficientemente rápido para alcanzar los valores adecuados para proporcionar el trabajo deseado. Si la turbina de gas acciona a un generador con excitador independiente, éste puede usarse

como motor de arranque para la turbina [17]. El ciclo ideal que sirve de modelo para el estudio de este tipo de plantas es el Brayton.

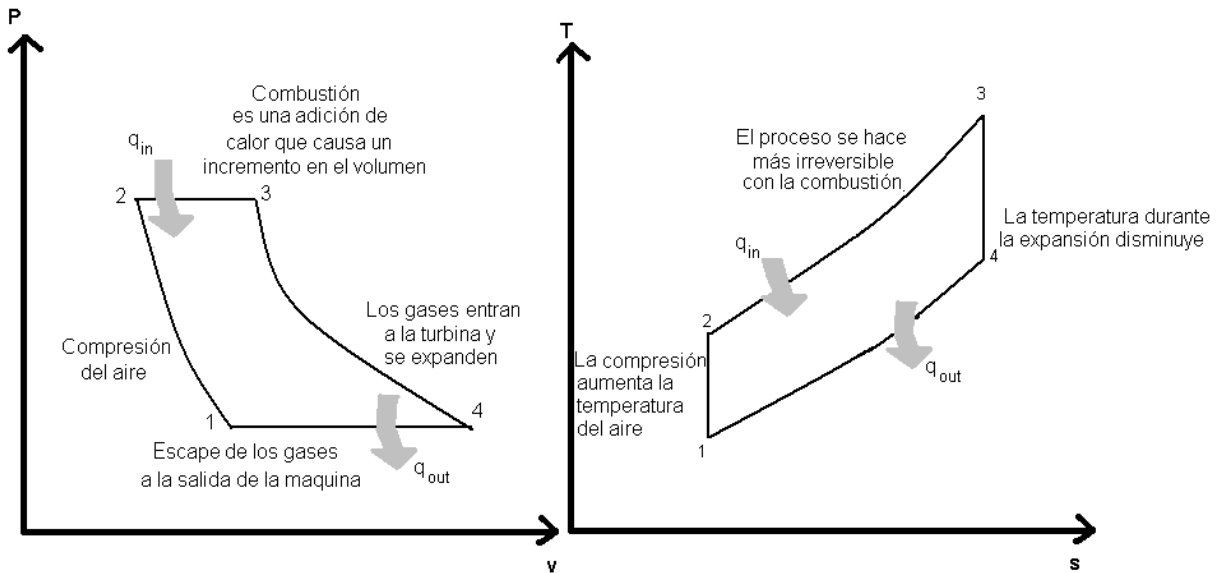


Figura 4.3 a) Diagrama P-v b) Diagrama T-s

A éste modo de operación (Fig. 4.1) se le conoce como ciclo abierto y en ésta modalidad se obtiene alrededor del 25% de eficiencia. Para mejorar ésta, se puede optar por la adición de un intercambiador de calor para aprovechar la energía en los gases de escape lo que incrementa la eficiencia hasta 40%. La forma en que se aprovecha éste calor es transferirlo de los gases de desecho al aire que sale del compresor para la cámara de combustión con lo que disminuye el calor necesario para calentar los gases para la entrada de la turbina. La potencia de salida de la planta no se incrementa pero la disminución en la cantidad de combustible quemado mejora la eficiencia.

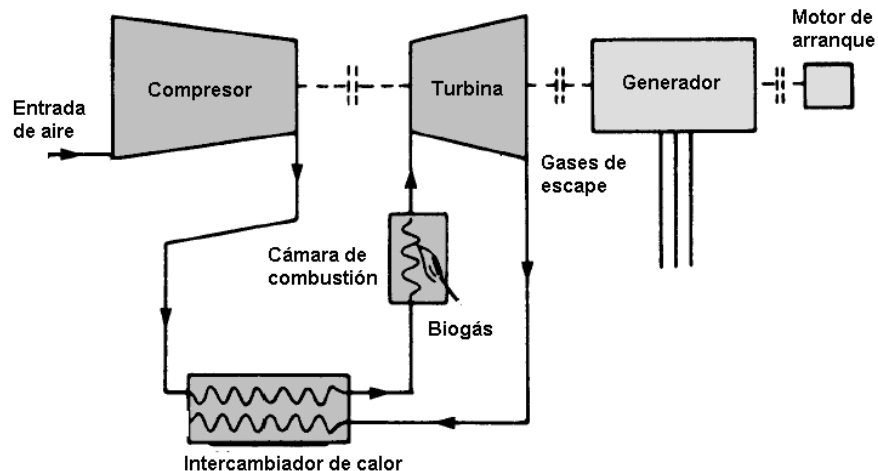


Figura 4.4 Planta con turbina de gas en ciclo cerrado.

Las microturbinas de gas son máquinas de combustión basadas en el mismo principio que las turbinas convencionales con potencias en el rango de 20 kW a 500 kW. Las diferencias principales entre estas y las turbinas de gas son que generalmente trabajan con un

intercambiador de calor y que la salida del generador es corriente eléctrica de alta frecuencia, por lo que es necesaria la incorporación de un rectificador AC/DC y de un inversor que permita obtener una corriente alterna trifásica adecuada [10].

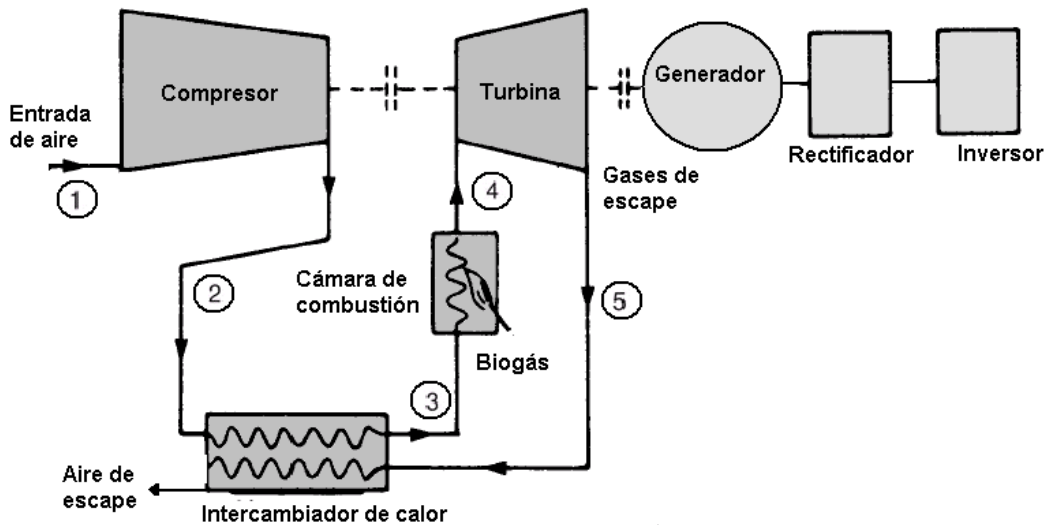


Figura 4.5 Planta de generación con microturbina de gas.

## 4.2 Motor de combustión interna.

Los motores de combustión interna pueden ser de dos tipos: de encendido por chispa y de encendido por compresión. Su eficiencia normalmente no excede 30-45%. Los ciclos ideales para modelar este tipo de motores son el ciclo Otto y el Diesel respectivamente.

### 4.2.1 Motores de combustión interna de encendido por chispa.

Los motores de encendido por chispa o motores Otto pueden funcionar con 100% de biogás como combustible. Por ejemplo para la alimentación de gas se requieren elementos extra para su pre-compresión. Pre-comprimiendo y posteriormente enfriando la mezcla la eficiencia puede incrementarse en un factor de 1.5 [10].

En un motor Otto el aire y el combustible entran a través del carburador, cuya función es mezclarlos. Ésta mezcla se comprime hasta una temperatura menor a la de auto-encendido, con el aumento de la relación de compresión aumenta la eficiencia pero si se alcanza la temperatura de auto-ignición el combustible puede “quemarse” antes de tiempo y éste se consumiría más rápidamente, además, se produciría un sonido llamado “golpeteo” del motor. Por lo tanto para el caso de los motores Otto se tiene un control de la relación de compresión de entre 7 y 10 con un máximo de 12. Es posible también adicionar un antidetonante, pero alguno usados son contaminantes.

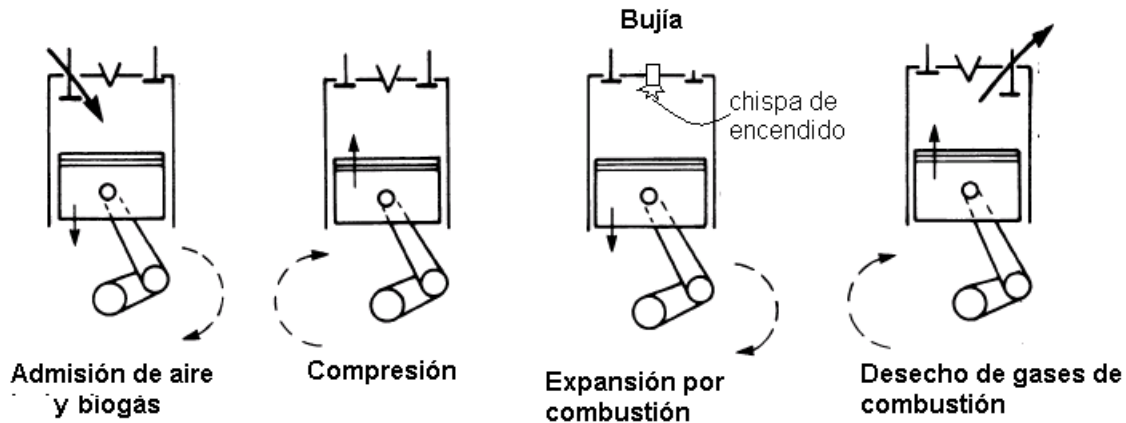


Figura 4.6 Funcionamiento básico motor Otto.

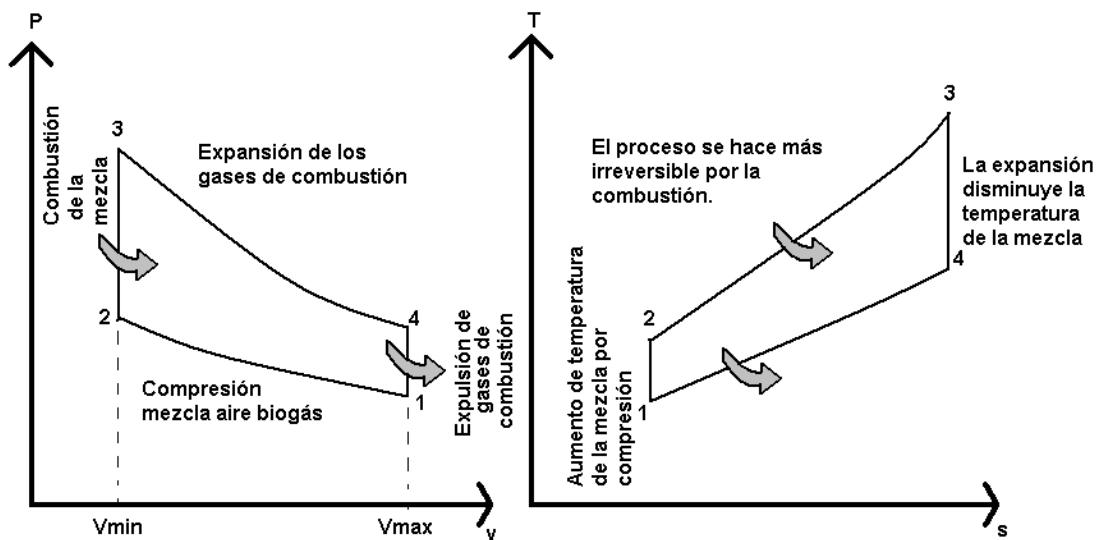


Figura 4.7 a) Diagrama P-v ciclo Otto. b) Diagrama T-s ciclo Otto.

Motores Otto cuentan con controles de encendido de la chispa, por medio de la descarga de un capacitor lo que permite un encendido exacto lo que resulta en mejoras en los tiempos de combustión que provoca una disminución en las emisiones y más tiempo de servicio en el sistema de encendido. Es posible trabajar con gas natural, al inicio de la operación de la planta, cuando el biogás que se extrae no tiene la suficiente calidad para usarse en los motores [17].

No es recomendable que se elimine por completo el  $\text{CO}_2$  y el  $\text{CO}$  del biogás, ya que estos compuestos impiden que el biogás detone cuando se somete a compresión. Pero a la vez, si existe una cantidad excesiva (>45 % por volumen) provoca una pérdida en fuerza de los motores [18].

#### 4.2.2 Motores de combustión interna de encendido por compresión.

Este tipo de planta se usa para cubrir la carga base donde no hay una estación de alimentación, como reserva o para disminuir los costos en una instalación durante los

periodos pico. Requieren algunas modificaciones para permitirles que funcionen principalmente con biogás complementado con combustible Diesel; esto es una operación de combustible dual con hasta el 60% del requerimiento de combustible Diesel reemplazado por biogás [19].

El aire se comprime hasta alcanzar una temperatura mayor a la temperatura de autoencendido del combustible, y la combustión ocurre al contacto cuando éste es inyectado (bujía y carburador sustituidos por inyector de combustible). Como solo se comprime el aire se evitan problemas de autoencendido. Las relaciones de compresión para este motor van de 12 a 24.

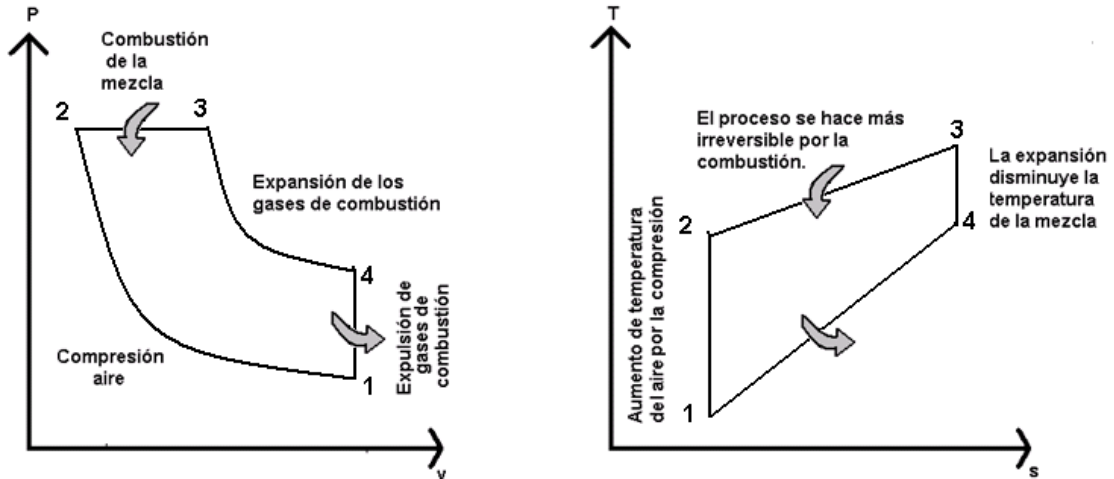


Figura 4.8 a) Diagramas P-v ciclo Diesel. b) Diagrama T-s ciclo Diesel.

La mayoría de los motores Diesel pueden ser modificados para su operación con combustible dual. En muchos casos, el arreglo más sencillo es el de conectar el tubo del suministro de biogás directamente al tubo de admisión de aire de motor, después del filtro.

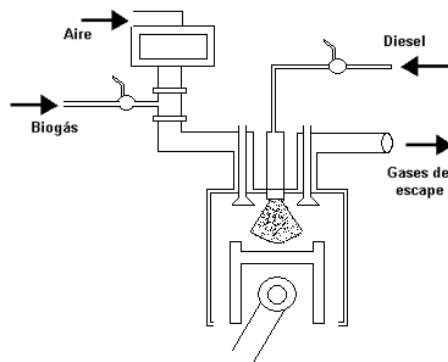


Figura 4.9 Modificación para motor Diesel.

Al aumentar el nivel de sustitución de biogás a más de 60 %, se tiene una reducción de la eficiencia promedio respecto al modo Diesel de entre 3 y 10% [19]. Para asegurar una operación satisfactoria con combustible dual, el  $H_2S$  del biogás debe ser removido.

### 4.3 Celdas de hidrógeno.

Las celdas de hidrógeno o de combustible son dispositivos capaces de convertir directamente la energía química producida entre un combustible y un oxidante<sup>4</sup>, en energía eléctrica, liberando agua y calor.

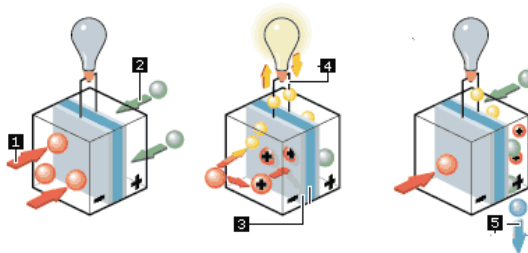
Las celdas se componen de dos electrodos –ánodo y cátodo- separados por un electrolito sólido o líquido. El H<sub>2</sub> entra al ánodo donde el catalizador permite la oxidación de éste, el electrolito deja pasar solo iones positivos y no electrones libres del ánodo al cátodo; por lo que el electrolito no debe ser conductor eléctrico. Los electrodos están conectados por un conductor, es por éste por el que viajan los electrones y pasan a través de la carga, finalmente en el cátodo se unen el hidrógeno, el oxígeno y los electrones, por lo que al final se libera agua y calor. El tipo de electrolito utilizado determina la temperatura de operación. El límite teórico de voltaje desarrollado por una celda es de 1.23 V, la corriente es de 0.5 A/cm<sup>2</sup> desarrollando una potencia de 0.35 W/cm<sup>2</sup>, por lo que para generar más potencia las celdas están conectadas en serie formando pilas [17].

#### 4.3.1 Reformado del biogás.

El H<sub>2</sub> es el combustible de las celdas y puede ser suministrado puro o puede extraerse, mediante el reformado, de otras sustancias tales como el biogás. El oxígeno que se requiere se puede obtener directamente del aire o puede suministrarse en su forma pura. Existen diversos métodos de reformado los más utilizados:

- Steam methane reforming (SMR). Reformado con vapor de agua.
- Dry methane reforming (DMR). Reformado con CO<sub>2</sub>, también denominado reformado seco, que aprovecha el contenido de éste gas en el biogás.
- Catalytic partial oxidation of methane (POM). Oxidación parcial catalítica.
- Autothermal reforming, (ATR). Reformado auto-térmico.

● Electrón    ● Oxígeno  
● Hidrógeno   ● Agua



1.-Entrada de hidrógeno al ánodo

2.-Entrada de oxígeno al cátodo

3.-Paso de iones positivos a través del electrolito

4.-Paso de electrones a través del conductor

5.- Unión de hidrógeno, oxígeno y electrones en agua

Figura 4.10 Principio de funcionamiento de una celda de hidrógeno.

En función del tipo de celda, el proceso de reformado del biogás puede ser externo o interno. El reformado externo tiene lugar en reactores diseñados para este propósito, mientras que el reformado interno se produce en el ánodo de la propia pila de combustible. La opción más habitual es la de reformado externo. No obstante, en las pilas de

<sup>4</sup> El término oxidación se refiere a la reacción que involucra la pérdida de electrones.

combustible MCFC y SOFC, las elevadas temperaturas de operación permiten que tenga lugar el reformado interno del biogás y la posterior separación del ion hidrógeno.

En función de su electrolito las celdas se pueden clasificar en [8]:

Tipo de celda / electrolito	Conductor iónico	Temperatura de operación	Combustible	Rendimiento / Rango de potencia	Aplicaciones
PEFC / Polímero sólido (Nafion®)	H <sup>+</sup>	60 – 80 °C	H <sup>2</sup> puro (tolera CO <sub>2</sub> , 10 ppm CO)	35-45 % / 5-250 kW	- Transporte - Portátil - Estacionaria de baja potencia
AFC / KOH	OH <sup>-</sup>	50 – 100 °C	H <sup>2</sup> puro	40-50% / 5-150 kW	Espacio
PAFC / Ácido fosfórico	H <sup>+</sup>	200 –220 °C	H <sup>2</sup> puro (tolera CO <sub>2</sub> , 1% CO)	40-45% / 50kW -11 MW	Estacionaria de media potencia
MCFC / Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> - K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	600– 700 °C	H <sup>2</sup> , CO, CH <sub>4</sub> , otros HCs (consume CO <sub>2</sub> en cátodo)	45-50% / 100 kW – 2 MW	Estacionaria de alta potencia
SOFC / ZrO <sub>2</sub> - Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	O <sup>2-</sup>	800 -1000°C	H <sup>2</sup> , CO, CH <sub>4</sub> , otros HCs (tolera CO <sub>2</sub> )	45-50% / 100-250 kW	- Estacionaria de media potencia - Transporte (APU)

Tabla 4.1 Características de distintos tipo de celdas de combustible [8].

#### 4.3.2 Celdas de combustible alcalinas (AFC).

Su temperatura de operación es entre 120 y 200°C. Requiere un gas rico en H<sub>2</sub> como combustible, libre de cualquier sustancia que pudiera hacer reacción con el electrolito como por ejemplo el CO<sub>2</sub> y el CO. Generan electricidad a más del 40% de eficiencia - y cerca del 85% si el vapor que ésta produce es empleado en cogeneración – Existen en producción comercial unidades de alrededor de 200kW. Este tipo de celdas no se aplica para generación distribuida.

#### 4.3.3 Celdas de combustible de ácido fosfórico (PAFC).

Las PAFC se alimentan principalmente con gas natural. Su temperatura de operación va de los 150 a 220°C. En la actualidad son las más usadas con biogás. Es importante la total remoción del CO pues actúa como veneno. El calor de desecho puede utilizarse para calentar agua o aire operando presión atmosférica. Este tipo de celdas se utiliza para generación distribuida.

#### 4.3.4 Celdas de combustible de carbonato fundido (MCFC).

Operan a una temperatura de 600 a 700°C; en las MCFC el CH<sub>4</sub> y el vapor son convertidos en un gas rico en H<sub>2</sub> en el ánodo. Su calor residual puede emplearse para

cogeneración. Muchas desventajas que presentan las celdas de baja temperatura son eliminadas en las celdas de alta temperatura. El reformado del biogás es interno, el CO puede utilizarse directamente como combustible y el calor residual tiene una temperatura suficiente para calentar el aire para una turbina de gas o para calentar agua para una turbina de vapor, o bien para cogeneración. Otra ventaja es que opera eficientemente con combustibles que contengan CO<sub>2</sub>. Entre las desventajas de trabajar a altas temperaturas esta el desgaste mecánico que puede llegar a tener los materiales. Este tipo de celdas se utiliza para generación distribuida.

#### 4.3.5 Celdas de combustible de óxido sólido (SOFC).

Su temperatura de operación va de 600 a 1000 °C. Características como su alta tolerancia a los contaminantes que trae el combustible, las altas temperaturas a las que trabaja que hace que no requiera catalizadores y el manejo directo del combustible las hace muy atractivas, el uso de un electrólito sólido elimina problemas de corrosión. Tiempo de vida largo, de 20 o más años. Las eficiencias de generación de potencia pueden alcanzar un 50%. Parte del calor que libera es utilizado para precalentar el aire que se utilizara en la misma celda. Se puede utilizar el CO como combustible y a diferencia de la MCFC no requiere CO<sub>2</sub>. Este tipo de celdas se utiliza para generación distribuida.

#### 4.3.6 Celdas de combustible poliméricas (PEMFC).

Su temperatura de operación es de 80°C. Esto como consecuencia permite alcanzar la temperatura de operación de forma rápida, pero el calor residual del proceso no puede utilizarse para cogeneración. El electrolito en esta celda es una membrana de intercambio de iones (un polímero) el único líquido en esta celda es el agua, por lo tanto los problemas de corrosión son mínimos. Se requiere un gas rico en H<sub>2</sub> como combustible, libre de CO - que es un veneno a bajas temperaturas-. Este tipo de celdas se utiliza para generación distribuida.

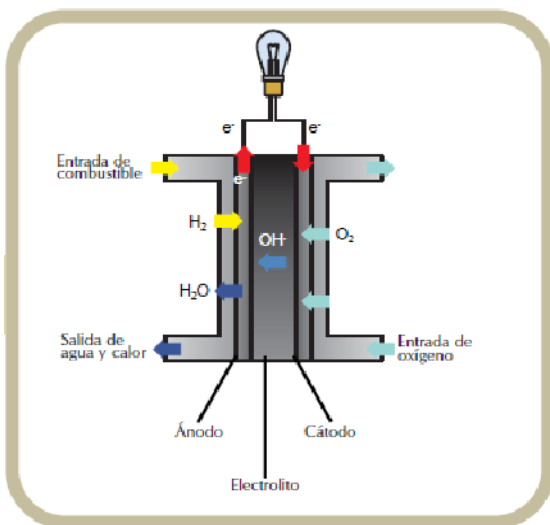


Figura 4.11 Celda tipo AFC

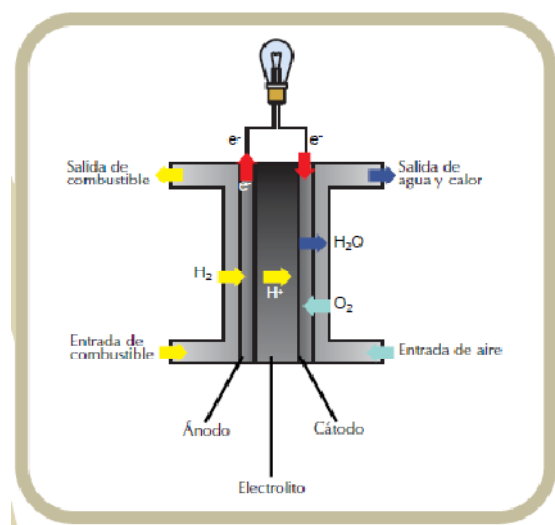


Figura 4.12 Celda tipo PAFC



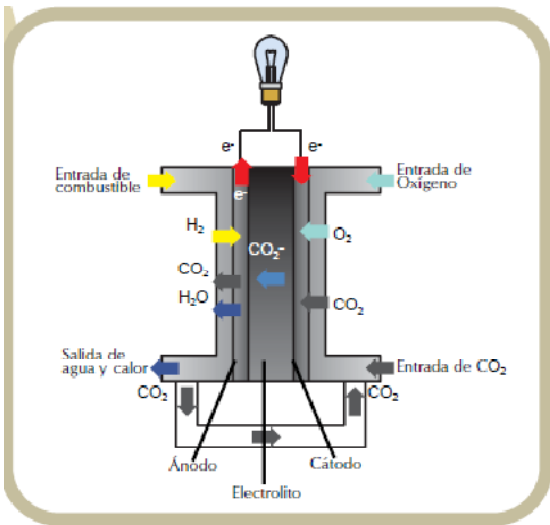


Figura 4.13 Celda tipo MCFC

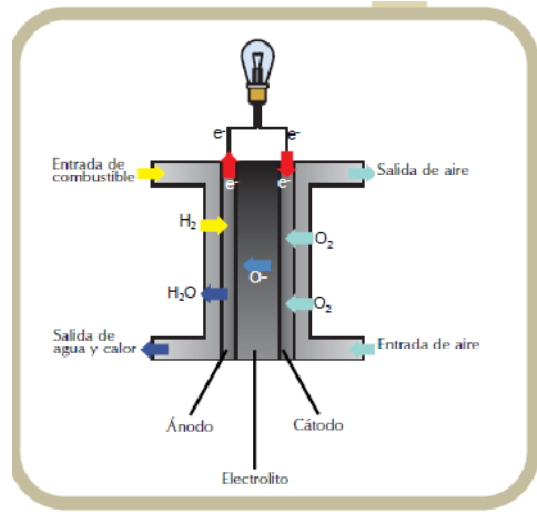


Figura 4.14 Celda tipo SOFC

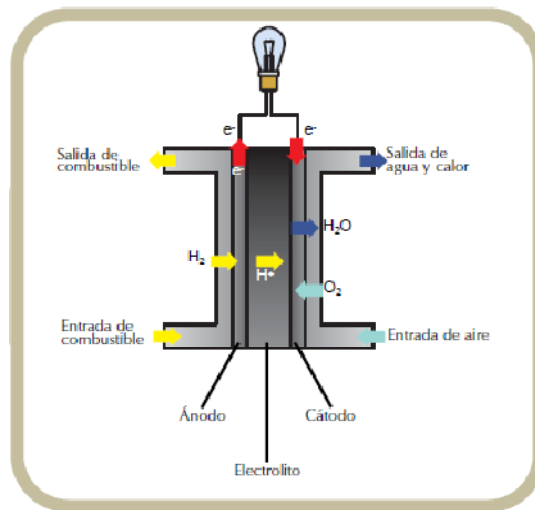


Figura 4.15 Celda tipo PEMFC

### 4.3.7 Limpieza del biogás para celdas de combustible.

La sensibilidad de las celdas de combustible a determinado tipo de compuestos implica que, previamente a su uso, el biogás debe someterse a una etapa de limpieza.

Compuesto	PEMFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC
H <sub>2</sub>	Combustible	Combustible	Combustible	Combustible	Combustible
CH <sub>4</sub>	Inerte	Veneno	Inerte	Combustible	Combustible
CO <sub>2</sub>	Diluyente	Veneno	Diluyente	Reactivo	Diluyente
CO	< 10 ppm	Veneno	< 1 %	Combustible	Combustible
H <sub>2</sub> S	< 200 ppb	Veneno	Veneno < 50 ppm	Veneno 0.1-0.5 ppm H <sub>2</sub> S	Veneno < 1 ppm H <sub>2</sub> S

Tabla 4.2 Tolerancia de los distintos tipos de pilas de combustible a diferentes compuestos [8].

#### 4.4 Comparación entre tecnologías de generación de energía eléctrica.

Aunque las turbinas responden con rapidez a los cambios en la demanda por su relativamente poca inercia, su eficiencia se ve más afectada en función del porcentaje de plena carga al que se encuentre operando en comparación con otras tecnologías como los motores Otto y Diesel.

Las elevadas temperaturas de operación de las MCFC y SOFC las convierten en candidatas idóneas a su utilización, pensando en el reformado interno que se hace del CH<sub>4</sub>, así como que el CO del biogás, cuya presencia produce el envenenamiento de celdas de combustible de baja temperatura, es un combustible adicional para las de alta temperatura, y son más tolerantes a las impurezas.

El motor Diesel produce más potencia que el motor Otto y ocupa menos espacio que un el segundo con misma potencia. Los motores de encendido por compresión son más económicos y tiene una mayor eficiencia que los motores Otto.

A continuación para cada tecnología se muestran distintas características importantes [5] [8] [10].

Turbinas de gas		
Combustible	100% Biogás	
Tamaño	100 kW-50 MW	
Eficiencia (%)	25-40 %	
Emisiones (kg/MWh)	CO <sub>2</sub>	545-700
	NO <sub>x</sub>	1.8-5
	SO <sub>2</sub>	0.14-0.18
	CO	0.5-4.5
Disponibilidad (%)	90-98	
Tiempo de arranque	10 min - 1 h	
Superficie (m <sup>2</sup> /kW)	0.003-0.01	

Tabla 4.3 Características generales turbinas de gas.

Microturbinas		
Combustible	100% Biogás	
Tamaño	20-500 kW	
Eficiencia (%)	20-30	
Emisiones (kg/MWh)	CO <sub>2</sub>	590-800
	NO <sub>x</sub>	0.09-0.64
	SO <sub>2</sub>	despreciable
	CO	0.14-0.82
Disponibilidad (%)	90-98	
Tiempo de arranque	60	
Superficie (m <sup>2</sup> /kW)	0.025-0.065	

Tabla 4.4 Características generales microturbinas.

Motores de combustión interna.		
Combustible	Diesel	Biogás 60%, Diesel 40%
	Otto	100% Biogás
Tamaño	5 kW-5 MW	
Eficiencia (%)	30-45	
Emisiones (kg/MWh)	CO <sub>2</sub>	590-800
	NO <sub>x</sub>	4.5-18.6
	SO <sub>2</sub>	0.18-1.36
	CO	0.18-4
Disponibilidad (%)	90-95	
Tiempo de arranque	10	
Superficie (m <sup>2</sup> /kW)	0.003-0.03	

Tabla 4.5 Características generales MCI.

Celdas de hidrógeno alta temperatura		
Combustible	100% Biogás	
Tamaño (MW)	Baja Temp.	1 kW-200 kW
	Alta Temp.	1 kW-10 MW
Eficiencia (%)	30-50	
Emisiones (kg/MWh)	CO <sub>2</sub>	360-630
	NO <sub>x</sub>	<0.023
	SO <sub>2</sub>	0
	CO	0.005-0.055
Disponibilidad (%)	Superior al 95	
Tiempo de arranque	3-48 h	
Superficie (m <sup>2</sup> /kW)	0.06-0.11	

Tabla 4.6 Características generales Celdas de hidrógeno.

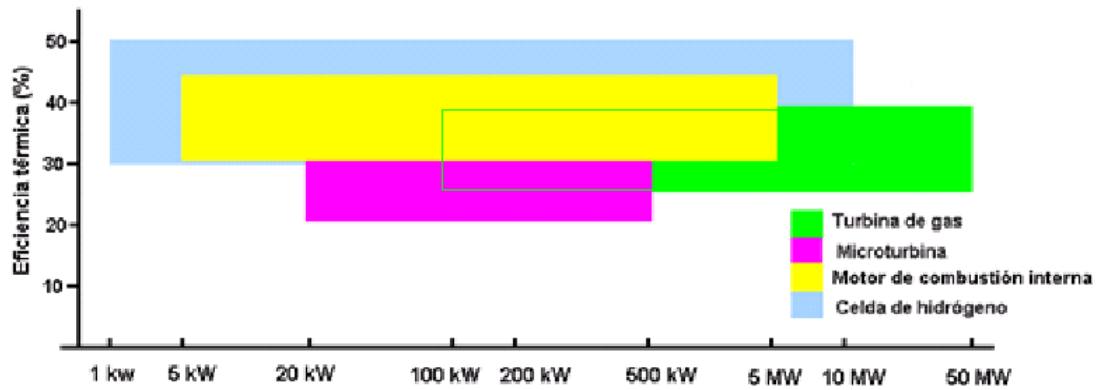


Figura 4.16 Potencias y eficiencias por tipo de planta

### 4.5 Cogeneración.

La cogeneración se define como la producción de dos tipos de energía –comúnmente eléctrica y térmica - a partir de una sola fuente de combustible. La cogeneración es una forma eficiente de recuperar calor y generar electricidad [20].

Para cada una de las máquinas mencionadas anteriormente una opción para provechar la gran cantidad de calor de los gases de escape, o el calor residual por las reacciones químicas, se encuentra a través de la utilización de éste para la producción de vapor o el secado de un determinado proceso industrial. Se puede pensar también en el modo de ciclo combinado donde el calor residual se emplea para calentar agua para accionar una turbina de vapor.

Cuando se hace trabajar una microturbina sin recuperador de calor, en aplicaciones de cogeneración, la eficiencia eléctrica disminuye a un 15-18%, pero el rendimiento total puede ser del orden de un 80% [5].

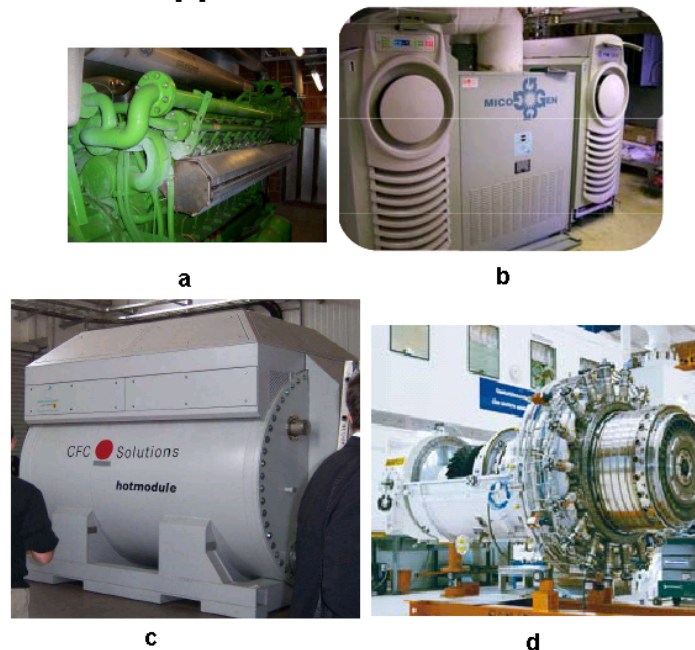


Figura 4.17 a) Motor Otto. b) Microturbina. c) MCFC. d) Turbina de gas.