

Tecnologías de Generación Distribuida: Costos y Eficiencia

Francisco M. González-Longatt

Resumen— Este artículo presenta un compendio de las principales tecnologías disponibles de generación distribuida (GD). Algunos factores tecnológicos, financieros, y ambientalistas, han hecho que la GD sea una realidad. Algunas tecnologías están presentes en el mercado desde hace algunos años, como los motores recíprocos, otras como los sistemas fotovoltaicos ha evolucionado y hoy en día son una fuerte alternativa, y junto con la eólica compiten en costos y eficiencia con los tradicionales, siendo una alternativa que a futuro puede ser más atractiva. Las micro turbinas, ha evolucionado y están comercialmente disponibles en tamaños reducidos, pero se espera que la tecnología madure y sea competitiva. Los sistemas de almacenamiento, y las celdas de combustible aun en etapa de desarrollo, representan una alternativa promisoría para el incremento de la participación de la GD en la generación de electricidad a mediano termino. La comparación en costos y eficiencia, apuntan a que las tecnologías de GD susceptibles a penetrar densamente las redes de potencia son las micro turbinas y las celdas de combustible.

Palabras claves—Generación Distribuida, Fuentes de Energía Distribuida, Tecnologías, Costos.

I. INTRODUCCIÓN

Un número de pronósticos dados por las autoridades, estiman que el uso de la energía eléctrica crecerá a 23 trillones de kWh en el 2020, cerca del doble del presente (CIGRE, 1999). Por otra parte, el mercado financiero global se ha desarrollado y, la tecnología ha experimentado acelerado progreso; haciendo posible que el tamaño óptimo de las inversiones nuevas en la producción de electricidad disminuya en relación con el tamaño del mercado y a la capacidad financiera privada. Además los procesos de desregulación, que han aparecido en el mundo entero, están haciendo posible la competencia en el negocio de la generación de electricidad. Y un cambio radical ha aparecido en el comportamiento de los costos de generación en las pasadas décadas, debido a los cambios tecnológicos.

Crecientes presiones ambientalistas globales, han forzado a las empresas eléctrica a mirar hacia fuentes de generación menos agresivas al medio, por lo que las fuentes alternativas han penetrado el sector eléctrico pasando de aplicaciones remotas y/o aisladas con una capacidad minúscula a una

penetración masiva que sobrepasa decenas de MW. De modo que, algunos factores han aparecido motivado a las empresas del sector eléctrico a verificar su visión sobre el negocio desde la raíz, cambiando su paradigma desde empresas gigantes, verticalmente integradas, a un modelo desagregado, con alta penetración de un sistemas de generación con capacidad más pequeña a las tradicionales (más de 5kW y menos de 5MW), no centralmente operadas ni despachadas, con características menos contaminantes y ubicadas lo más cerca posible del consumidor, conocida como *generación distribuida (GD)*. Hoy la generación distribuida es una realidad. En países como Dinamarca el porcentaje de GD alcanza el 37 % y en los Países Bajos el 40 % [1]. A nivel global la capacidad de generación eléctrica se espera que se incremente en un 50% de los próximos 20 años, se proyecta que 7 millones de MW de nueva capacidad de generación sea requerida para atender la demanda en el año 2020; y se estima que el mercado de la GD pueda ser de 1 millón de MW asumiendo un 15% del mercado [2]. La GD se presenta competitiva ante las tradicionales centrales de generación por varios aspectos; en especial, por los cambios asociados a la entrega de potencia muy cerca del consumidor, el cargo por capacidad de la potencia disponible, las pérdidas de transmisión, los peajes de distribución, la confiabilidad, el control de la demanda, las emisiones contaminantes, etc. Y un aspecto en que la generación distribuida ha resultado atractiva a las empresas es el hecho de poder diferir las inversiones en el sistema transmisión, por la capacidad liberada por su instalación cercana al consumidor. Este artículo muestra un análisis comparativo de las tecnologías de fuentes de GD disponible actualmente, tomando como patrones: económico el costo unitario de electricidad y/o energía (US\$/kW y/o US\$/kWh), y la eficiencia (%) de conversión de la fuente.

II. TECNOLOGÍAS DISPONIBLES

Algunas FGD son novedosas y aun se mantienen en desarrollo mientras que otras son tecnologías ya maduras y muy afianzadas en el mercado. Algunas son reconocidos por diferentes nombres como generadores de respaldo (*back-up generators*), o generación en sitio (*on-site power*). Las FGD pueden ser agrupadas en función a varios puntos de vista. Un criterio es en función a su agresividad al medio ambiente: fuentes tradicionales y, fuentes alternativas. Aunque un criterio muy común agrupa las tecnologías en: generación y, almacenamiento.

Manuscrito recibido el 04 de Octubre de 2004.

F. M. G. L. Autor está con la Universidad Nacional Experimental Politécnica de la Fuerza Armada Nacional, Carretera Nacional Maracay-Mariara Frente a Base Aérea Mariscal Sucre, Núcleo Maracay, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Maracay, Estado Aragua, Venezuela, Tlf. +58-243-5546954, Fax: +58-244-5546923, E-mail: fglongatt@ieec.org.

TABLA 1
TECNOLOGÍAS DE FUENTES DISTRIBUIDAS DE ENERGÍA [3]

| Tecnologías GD | Comercialmente Disponible | Tecnología Emergente |
|---------------------------|---------------------------|----------------------|
| Micro turbina | X | X |
| Motor Reciprocantes | X | |
| Motor Stirling | | X |
| Celda de Combustible | X | X |
| Almacenamiento de Energía | X | X |
| Sistemas Fotovoltaicos | X | |
| Sistemas Eólicos | X | |
| Sistemas Híbridos | | X |

III. MICRO TURBINAS

Las micro turbinas son pequeños generadores de electricidad que queman combustible (gaseoso o líquido) para crear una rotación de alta velocidad en un generador de electricidad. Evolucionaron de los turbo cargadores de automóviles y camiones, unidades de potencia auxiliar de aviones, y motores de pequeños aeroplanos. Las micro turbinas constituidas por un compresor, combustor, turbina, alternador, recuperador (intercambiador de calor interno) y generador. Las maquinas generalmente rotan sobre las 40.000 rpm, empujando rodamientos en aceite o aire. Las micro turbinas pueden ser clasificadas según el arreglo físico de sus partes componentes. Según el número de ejes: eje sencillo y eje partido. Según el ciclo de calor empleado: ciclo sencillo o recuperado. Un solo eje es el diseño más común debido a que es simple y menos costoso de construir, mientras que el diseño de eje partido no requiere un inversor para cambiar la frecuencia de la potencia AC. Por su parte, la micro turbina de ciclo simple tienen un costo inferior, la confiabilidad más alta, y más calor esta disponible para aplicaciones de cogeneración que en las unidades recuperadas, pero estas últimas poseen un ahorro del 30-40 % de combustible de precalentamiento. Las micro turbinas ofrecen un número de ventajas potenciales: pequeño de partes móviles, tamaño compacto, peso ligero, gran eficiencia, electricidad de bajo costo, y oportunidad de emplear combustibles de desecho.

A. Eficiencia

La eficiencia de la micro turbina es función de varios factores, pero una micro turbina típica, ronda el 30%, con una expectativa de vida útil de 60.000 horas [3]. La temperatura de los gases de escape las hace excelente candidatas a la recuperación del calor, con lo que se puede elevar la eficiencia global del sistema 80% y más.

B. Costos

Las pequeñas micro turbinas, poseen un tamaño entre los 25 y 300 kW, aunque esta tecnología se dispone comercialmente en el mercado, los materiales de alta tecnologías que ameritan esta aplicaciones, apuntan a mantener los costos altos hasta que esta tecnología madure y se establezca plenamente en el mercado. En la actualidad, los costos de las micro turbinas se ubican entre 750 y 900 US\$/kW, muy superior a los 600 US\$/kW de las turbinas de gas clasificadas como pequeñas (500kW a 2 MW). El costo global puede ser menor, si se

considera aplicaciones de cogeneración, donde el calor remanente, puede ser empleado para la producción de mayor cantidad de electricidad o simplemente como fuente de calor.

TABLA 2
CARACTERÍSTICAS DE EFICIENCIA DE SISTEMAS DE MICRO TURBINAS [4]

| Características de rendimiento | Capstone modelo 330-30kW | IR Energy System 70LM ² -70kW | Turbec T100-100kW | DTE** - 350kW |
|---|--------------------------|--|-------------------|---------------|
| Capacidad de Electricidad Nominal (kW) | 30 kW | 70 kW | 100 kW | 350 kW |
| Heat Rate Eléctrica (Btu/kWh) | 14,581 | 13,540 | 12,637 | 11,766 |
| Eficiencia Eléctrica (%) | 23.4% | 25.2% | 27.0% | 29.0% |
| Entrada de Combustible (MMBtu/hr) | 0.437 | 0.948 | 1.264 | 4.118 |
| Presión de Gas Combustible Requerida (psig) | 55 | 55 | 75 | 135 |
| Características CHP | | | | |
| Flujo de Escape (lbs/seg) | 0.72 | 1.40 | 1.74 | 5.00 |
| Temp. de Gases de escape (grados F) | 500 | 435 | 500 | 600 |
| Temp. Gases de Escape Intercambiador (grados F) | 150 | 130 | 131 | 140 |
| Calor de salida (MMBtu/hr) | 0.218 | 0.369 | 0.555 | 1.987 |
| Calor de salida (kW equivalentes) | 64 | 108 | 163 | 582 |
| Eficiencia total CHP | 73% | 64% | 71% | 77% |
| Potencia/Heat Ratio | 0.47 | 0.65 | 0.62 | 0.60 |
| Neto Heat Rate (Btu/kWh)10 | 5,509 | 6,952 | 5,703 | 4,668 |
| Eficiencia Eléctrica efectiva | 62% | 49% | 60% | 73% |

* Modelo de dos ejes.

** Actualmente en desarrollo

TABLA 3
CARACTERÍSTICAS DE COSTOS DE SISTEMAS DE MICRO TURBINAS [4]

| Características de costos | Capstone modelo 330-30kW | IR Energy System 70LM ² -70kW | Turbec T100-100kW | DTE** - 350kW |
|---|--------------------------|--|-------------------|---------------|
| Capacidad de Electricidad Nominal (kW) | 30 kW | 70 kW | 100 kW | 350 kW |
| Costos (US\$/kW) | | | | |
| Equipos | | | | |
| Micro turbina | 1000 | 980 | 750 | 700 |
| Compresor de Gas | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Recuperador de Calor | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Control / Monitoreo | 179 | 143 | 120 | 57 |
| Total de Equipos | 1179 | 1123 | 870 | 757 |
| Trabajo y Materiales | 300 | 200 | 140 | 112 |
| Total de Capital | 1479 | 1323 | 1010 | 869 |
| Proyecto y Construcción | 266 | 245 | 188 | 206 |
| Ingeniería y Pagos | 130 | 85 | 64 | 44 |
| Contingencia de proyecto | 56 | 50 | 38 | 34 |
| Financiamiento del proyecto (intereses) | 31 | 27 | 21 | 18 |
| Costo Total de la Planta (US\$/kW) | 1962 | 1729 | 1320 | 1171 |

IV. MOTORES RECIPROCANTES

Los motores reciprocantes, o a pistón, es la mas común y técnicamente madura de tecnología FGD. También son llamados motores de combustión interna (*IC: internal combustion*), los motores reciprocantes requieren combustible, aire, compresión y una fuentes de combustión para trabajar. Dependiendo de la fuente de ignición ellos se agrupan en dos categorías: (1) motores de ignición por chispa (*SI: spark-ignited*), típicamente emplean la gasolina o el gas natural como combustible, o (2) motores de ignición por compresión (*CI: compression ignition*), típicamente trabajan con combustible diesel. Los motores reciprocantes comercialmente disponibles están en un rango de potencias de 0.5kW a 6.5 MW. Ofrecen un bajo costo de capital, fácil instalación, proveen confiabilidad, una muy buen característica de seguimiento de la carga y la posibilidad de recuperación de calor. Las posibilidades de aplicación de los motores reciprocantes incluye: generación primaria o continua, *peak shaving*, respaldo, *Premium power*, generación remota, generación en *stand-by*. Los motores pueden operar con combustible generado por tratamiento de desechos (metano) y otros bio-combustibles (*biofuel*).

A. Eficiencia

Los motores reciprocantes pueden operar con un amplio espectro de combustibles incluyendo el gas natural, diesel, gas de desecho, biogases, etc. Los motores de tamaño grandes pueden durar 20-30 años mientras motores más pequeños (<1MW) tienden a tener vidas útiles cortas.

Los motores reciprocantes poseen eficiencias en un rango entre 25 a 45%. En general los motores diesel son más eficientes que los motores a gas natural, debido a que ellos operan a mayor relación de compresión.

En el futuro los fabricantes apuntan hacia el logro de un mas bajo consumo de combustible y una eficiencia en eje mas alta, 50 a 55% en motores grandes (> 1MW) para el año 2010. En particular, la eficiencia de los motores a gas natural se espera que se mejore y se aproxime al de los motores diesel. Las emisiones descontroladas de NOx de los motores reciprocantes (especialmente motores diesel) son las mas altas de todas las tecnologías FGD.

B. Costos

Los motores reciprocantes de combustión interna son la tecnología tradicional para plantas de emergencia en todo el mundo. Ellos poseen el mas bajo costo inicial de todas las tecnologías FGD. El costo de capital de un conjunto de un generador que usa gas como combustible tiene un paquete que varia en un rango desde los 300US\$/kW a los 900US\$/kW, dependiendo del tamaño, tipo de combustible, y el tipo de motor. El costo de motor en general (US\$/kW) incrementa con el tamaño. El costo total de instalación puede ser 50-100% más que el costo del motor mismo. Costos adicionales incluyen los balances de los equipos de la planta, honorarios de instalación, honorarios de la ingeniería, y otros gastos de dueño. El gas natural es usualmente menos costoso que el combustible diesel para el mismo contenido de calor. Si el

motor de combustión interna es para ser usado un gran numero de horas por año, el costo total de operar la unidad a gas puede ser mas bajo. El gas natural puede no estar disponible en todas las localizaciones, mientras que el diesel puede ser transportado donde sea. Sin embargo, el motor de diesel tiene una emisiones contaminantes altas, de modo que su uso puede ser restrictivo en algunos lugares con normativas ambientalistas severas. El costo de mantenimiento de un motor combustión interna a gas y de diesel varía entre 0.007-0.015 US\$/kWh y 0.005-0.010 US\$/kWh, respectivamente

TABLA 4

CARACTERÍSTICAS DE EFICIENCIA DE MOTORES RECIPROCANTES [4]

| Características de Eficiencia | MAN | Cummins | Caterpillar | Caterpillar | Wartsila |
|---|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| | 150 kW a 100 kW | GSK19G 300 kW | r G3516 LE 800 kW | r G3616 LE 3 MW | 5238 LN 5 MW |
| <i>Capacidad de Electricidad Nominal (kW)</i> | 100 | 300 | 800 | 3000 | 5000 |
| <i>Costo Total Instalado (US\$/kW)</i> | 1515 | 1200 | 1000 | 920 | 920 |
| <i>Heat Reat Electrico (BTU/kWh)</i> | 11147 | 10967 | 10246 | 9492 | 8758 |
| <i>Eficiencia Electrica (%)</i> | 30.6% | 31.1% | 33.3% | 36% | 39% |
| <i>Velocidad del motor (rpm)</i> | 1800 | 1800 | 1200 | 900 | 720 |
| <i>Entrada de Combustible (MMBTU/h)</i> | 1.11 | 3.29 | 8.20 | 28.48 | 43.79 |
| <i>Presión de gas Requerida (psig)</i> | <3 | <3 | <3 | 43 | 65 |
| <i>Características de CHP</i> | | | | | |
| <i>Flujo de Escape (1000lb/h)</i> | 1.0 | 3.3 | 10.9 | 48.4 | 67.1 |
| <i>Temperatura de escape (°F)</i> | 1060 | 1067 | 869 | 668 | 698 |
| <i>Calor recuperado desde el escape (MMBTU/h)</i> | 0.20 | 0.82 | 2.12 | 5.54 | 7.16 |
| <i>Calor recuperado desde la chaqueta de enfriamiento (MMBTU/h)</i> | 0.37 | 0.69 | 1.09 | 4.37 | 6.28 |
| <i>Calor recuperado del sistema de lubricación (MMBTU/h)</i> | 0 | 0 | 0.29 | 1.22 | 1.94 |
| <i>Total de Calor Recuperado (MMBTU/h)</i> | 0.57 | 1.51 | 3.50 | 11.12 | 15.83 |
| <i>Total de Calor Recuperado (kW)</i> | 167 | 443 | 1025 | 2359 | 4508 |
| <i>Forma de calor recuperado</i> | H ₂ O Caliente | H ₂ O Caliente | H ₂ O Caliente | H ₂ O Caliente | H ₂ O Caliente |
| <i>Eficiencia Total (%)</i> | 81% | 77% | 76% | 75% | 74% |
| <i>Potencia/Heat Rate</i> | 0.60 | 0.68 | 0.78 | 0.92 | 1.11 |
| <i>Heat Rate Neto (BTU/kWh)</i> | 4063 | 4687 | 4774 | 4857 | 4914 |
| <i>Eficiencia Eléctrica Efectiva (%)</i> | 84% | 73% | 71% | 70% | 69% |

TABLA 5
CARACTERÍSTICAS DE COSTOS DE MOTORES RECIPROCANTES [4]

| Características de Costos | MAN | Cummins | Caterpillar | Caterpillar | Wartsila |
|---|------------------|---------------|-------------------|-----------------|--------------|
| | 150 kW a 100 kW | GSK19G 300 kW | r G3516 LE 800 kW | r G3616 LE 3 MW | 5238 LN 5 MW |
| Capacidad de Electricidad Nominal (kW) | 100 | 300 | 800 | 3000 | 5000 |
| | Costos (US\$/kW) | | | | |
| Equipos | | | | | |
| Paquete de Generador | 260 | 230 | 269 | 400 | 450 |
| Recuperador de Calor | 205 | 179 | 89 | 65 | 40 |
| Interconexión /Eléctrica | 260 | 90 | 40 | 22 | 12 |
| Total de Equipos | 725 | 499 | 398 | 487 | 502 |
| Trabajo y Materiales | 359 | 400 | 379 | 216 | 200 |
| Total de Capital | 1084 | 899 | 777 | 703 | 702 |
| Proyecto y Construcción | 235 | 158 | 121 | 95 | 95 |
| Ingeniería y Pagos | 129 | 81 | 45 | 41 | 41 |
| Contingencia de proyecto | 43 | 34 | 28 | 25 | 25 |
| Financiamiento del proyecto (intereses) | 24 | 25 | 31 | 55 | 55 |
| Costo Total de la Planta (US\$/kW) | 1515 | 1197 | 1002 | 919 | 919 |

V. CELDAS DE COMBUSTIBLE (FUEL CELLS)

Una celda de combustible es un equipo de conversión electroquímico que convierte el hidrógeno y el oxígeno en electricidad y calor. Esta es muy semejante a una batería que puede ser recargada mientras se entrega potencia de ella. En vez de recargarse usando electricidad, una celda de combustible usa el hidrógeno y el oxígeno. Constructivamente costa de dos electrodos: un ánodo y un cátodo, separado por un electrolito. La primera celda de combustible operativa fue producida por Sir William Grove en 1842. La tecnología avanzó poco a poco por los años, pero tomó un salto gigantesco en 1960, cuando *General Electric* produjo la primera aplicación práctica de la celda de combustible, cuando esta proveyó de energía eléctrica a las cápsulas espaciales Gemini y Apollo. La diferencia principal entre la mayoría de celdas de combustible es el tipo de electrolito. Algunos tipos de electrolito empleados en celdas de combustible son: ácido fosfórico, carbonato fundido, el óxido sólido, y la membrana de intercambio [5].

Ácido Fosfórico (PAFC: Phosphoric Acid Fuel Cells). Las celdas de combustible de ácido fosfórico son generalmente consideradas la primera generación de la tecnología. Esas celdas de combustible operan alrededor de los 200° C (400°F) y alcanzan una eficiencia de combustible-electricidad de 40 a 45 en una base de calor de bajo valor (*LHV lower heating value*)

Carbonato Fundido (MCFC: Molten Carbonate Fuel Cells). La tecnología de carbonato fundido posee el potencial para alcanzar una eficiencia de electricidad-combustible de 50 a 60 % LHV. La temperatura de operación para las celdas de carbonato fundido (MCFC) es de alrededor de 650°C

(1200°F), lo cual permiten una eficiencia mayor al 85% LHV en aplicaciones de ciclo combinado. Las MCFC han sido operados con hidrógeno, monóxido de carbono, gas natural, propano, gas asociado, diesel marino, y productos de gasificación de carbón.

TABLA 6
COMPARACIÓN DE TECNOLOGÍAS DE CELDAS DE COMBUSTIBLE [5]

| | PAFC | SOFC | MCFC | PEMFC |
|--------------------------------------|--|---|---|---|
| <i>Comercialmente Disponible</i> | Si | No | No | No |
| <i>Rango de Capacidad</i> | 100 a 200kW | 1kW a 10MW | 250kW a 10MW | 3 a 250kW |
| <i>Combustible</i> | Gas natural, gas landfill, gas diesel, gas propano | Gas natural, hidrogeno, gas landfill, fuel oil | Gas natural, hidrogeno | Gas natural, hidrogeno, propano, diesel |
| <i>Reformante</i> | Externo | Externo/Interno | Externo/Interno | Externo |
| <i>Eficiencia Temp. de Operación</i> | 36-42% 375°F (190°C) | 45-60% 1830°F (1000°C) | 45-55% 1200°F (650°C) | 30-40% 175°F (80°C) |
| <i>Contaminación</i> | Cercano a cero | Cercano a cero | Cercano a cero | Cercano a cero |
| <i>Otras características</i> | Cogen (agua caliente) | Cogen agua caliente, vapor de alta y baja presión | Cogen agua caliente, vapor de alta y baja presión | Cogen, agua 80 °C |

Oxido Sólido (SOFC: Solid Oxide Fuel Cells). Las celdas de combustible de oxido sólido operan a una temperatura de hasta 1000° C (1800° F), la cual incrementa el rendimiento por el uso del ciclo combinado. Un sistema de oxido sólido por lo general usa un material duro de cerámica en vez de un electrolito líquido. La construcción de cerámica de estado sólido permite manejar más altas temperaturas permitiendo más flexibilidad en la selección del combustible, y contribuye en la estabilidad y confiabilidad. Como con las MCFC, las SOFC son capaces de una eficiencia de combustible-electricidad de 50 a 60 % de LHC, y a eficiencia térmica total del sistema llega hasta 85% LHV en aplicaciones de ciclo combinado.

Membrana de Intercambio de Protón (PEMFC: Proton Exchange Membrane Fuel Cells). Estas celdas operan a relativamente bajas temperaturas (alrededor de 200 °C), poseen una alta densidad de potencia, que puede variar su salida rápidamente para responder a cambios en la demanda de potencia, y son ideales para satisfacer aplicaciones donde el arranque rápido es requerido (por ejemplo, el transporte y la generación de poder).

A. Eficiencia

Las celdas de combustible prometen entregar una eficiencia de conversión eléctrica en el rango de 40% a 60%. Una eficiencia de conversión total de energía (aproximándose al 90%), son posibles cuando son usadas aplicaciones de cogeneración, donde tanto el calor como la electricidad de la reacción son utilizadas. Otra característica promisorias es la muy baja emisión contaminante de las celdas de combustible. Debido a que ellas producen electricidad sin combustión, los productos usuales de la combustión no están presentes. Las celdas de combustible también operan silenciosamente y confiablemente. Las celdas de combustible están siendo desarrolladas en un rango de tamaños entre unos pocos kW hasta unos pocos MW. Sin embargo, las unidades más grandes

(hasta 20MW) y mas pequeñas micro celdas de combustible (para equipos portátiles electrónicos) están también siendo investigados. La fuerza detrás del desarrollo de las celdas de combustible no esta solo en la industria eléctrica, sino en la industria de los automóviles transporte. Este interés cruzado ha ayudado a acelerar el progreso hacia las celdas de combustibles comerciales.

PAFC. La eficiencia de conversión de las celdas de combustible de ácido fosfórico ha sido demostrada en el rango de 35-40%. La confiabilidad ha sido buena para algunas unidades en servicio.

MCFC. Las evaluaciones de los vendedores han colocado la eficiencia de las MCFC en alrededor de 50%.

SOFC. Las evaluaciones de los vendedores han ubicado la eficiencia eléctrica (LHV) en alrededor de 50%. Con SOFC/gas turbinas híbridas, cuando la celda de combustible es usada como un ciclo magnífico, la eficacia total eléctrica puede exceder el 60 %.

PEMFC. Se estima que el muy probable cerca del término, la eficacia optimizada por costo de tecnología PEMFC estará en la gama de 30-33 %. La eficacia podría aumentar al nivel del 40 % en hacia el 2005 si los siguientes logros técnicos son realizados:

TABLA 7
CARACTERÍSTICAS DE EFICIENCIA DE CELDAS DE COMBUSTIBLE [4]

| Características de Eficiencia y Costos ¹ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <i>Tipo de Celda</i> | PAFC | PEM | PEM | MCFC | MCFC | SOFC |
| <i>Capacidad de Electricidad Nominal (kW)</i> | 200 | 10 | 200 | 250 | 2000 | 100 |
| <i>Estado Comercial al 2002</i> | Si | Demo | Demo | Demo | Demo | Demo |
| <i>Temp. de Operación (°F)</i> | 400 | 150 | 150 | 1200 | 1200 | 1750 |
| <i>Costo del Paquete (US\$/kW)</i> | 3850 | 4700 | 2950 | 4350 | 2400 | 2850 |
| <i>Costo Total Instalado (US\$/kW)</i> | 4500 | 5500 | 3600 | 5000 | 2800 | 3500 |
| <i>Costos O&M (US\$/kW)</i> | 0.029 | 0.033 | 0.023 | 0.043 | 0.033 | 0.023 |
| <i>Heat Reat Eléctrico BTU/kWh)</i> | 9480 | 11370 | 9750 | 9730 | 7420 | 7580 |
| <i>Eficiencia Eléctrica (%)</i> | 36% | 30% | 35% | 43% | 46% | 45% |
| <i>Entrada de Combustible (MMBTU/h)</i> | 1.90 | 0.10 | 2.00 | 2.00 | 14.80 | 0.80 |
| <i>Características de CHP</i> | | | | | | |
| <i>Calor Disponible >160°F (MMBTU/h)</i> | 0.37 | 0.00 | 0.00 | 0.22 | 1.89 | 1.89 |
| <i>Calor Disponible <160°F (MMBTU/h)</i> | 0.37 | 0.04 | 0.72 | 0.22 | 1.67 | 0.09 |
| <i>Calor de Salida (MMBTU/h)</i> | 0.74 | 0.04 | 0.72 | 0.44 | 3.56 | 0.19 |
| <i>Calor de Salida (kW)</i> | 214 | 13 | 211 | 128 | 1043 | 56 |
| <i>Eficiencia total (%)</i> | 75% | 68% | 72% | 65% | 70% | 70% |
| <i>Potencia/Heat Rate</i> | 0.92 | 0.77 | 0.95 | 1.95 | 1.92 | 1.79 |
| <i>Heat Rate Neto (BTU/kWh)</i> | 4860 | 6370 | 52250 | 5730 | 5200 | 5210 |
| <i>Eficiencia Eléctrica Efectiva (%)</i> | 70.3 | 53.6% | 65% | 59.5% | 65.7% | 65.6% |

¹: Datos son representativos de valores típicos para sistemas desarrollados basados en la información disponible desde los desarrolladores de celdas de combustible. Solo los datos de la PAFC son representativos de un producto comercial disponible en 2002. Desarrolladores incluyen pero no son limitados a UTC Fuel Cells, Toshiba, Ballard Power, Plug Power, Fuel Cell Energy, Siemens-Westinghouse, H-Power, Hydrogenics, Honeywell, Fuji, IHI, Global Termal, Mitsubishi Heavy Industries, y Stek.

B. Costos

El costo inicial de las celdas de combustible es muy alto comparado con las otras tecnologías FGD. El único producto disponible comercialmente en la actualidad es el PC-25 construido por UTC. En el 2001 el costo de la unidad era de aproximadamente 4000 US\$/kW. El costo de instalación de la unidad es aproximadamente 1.000.000 US\$. Para una salida de 200 kW, este significa alrededor de 5000 US\$/kW, instalado. Otras celdas de combustible están menos desarrolladas [5].

Como la mayoría de las nuevas tecnologías, mientras mas unidades nuevas sean instaladas y nuevos jugadores se unen al mercado, los precios están orientados a disminuir. Las proyecciones de precios de las celdas de combustible varían pero la mayoría de los fabricantes apuntan en costos por debajo de 1500 US\$/kW basados en el volumen de producción. En el precio actual, las unidades sólo son usadas en alto valor, nichos, de mercado donde la confiabilidad es máxima, y en áreas donde los precios de electricidad son muy altos y el precio de gas es muy bajo. Las celdas de combustible se espera que posean un mínimo requerimiento de mantenimiento. Los sistemas de suministro de combustible y los sistemas de reforma pueden requerir un periódico (una vez al año) inspección y mantenimiento. El arreglo de celdas de combustible por si misma no requiere mantenimiento hasta el final de su vida. El mantenimiento y confiabilidad de los sistemas necesita ser probada a largo plazo en sistemas a gran escala. Los costos de mantenimiento de una celda se espera que sean comparables con el de las micro turbinas, en rengos entre los 0.005-0.010US\$/kWh (basados una visita de inspección anual a la unidad)

TABLA 8
CARACTERÍSTICAS DE COSTOS DE CELDAS DE COMBUSTIBLE [4]

| Características de Costos ¹ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|--|------|------|------|------|------|------|
| <i>Capacidad de Electricidad Nominal (kW)</i> | 200 | 10 | 200 | 250 | 2000 | 100 |
| <i>Tipo de Celda</i> | PAFC | PEM | PEM | MCFC | MCFC | SOFC |
| <i>Costos (US\$/kW)</i> | | | | | | |
| <i>Equipos</i> | | | | | | |
| <i>Paquete del paquete</i> | 3850 | 4700 | 2950 | 4350 | 2400 | 2850 |
| <i>Interruptor de red</i> | 100 | 250 | 100 | 100 | 15 | 120 |
| <i>Materiales y Trabajo</i> | 272 | 100 | 272 | 280 | 230 | 250 |
| <i>Total de Capital</i> | 4222 | 5050 | 3370 | 4780 | 2645 | 2270 |
| <i>Otros Costos</i> | | | | | | |
| <i>Proyecto y Construcción</i> | 124 | 280 | 124 | 112 | 80 | 168 |
| <i>Ingeniería y Pagos</i> | 52 | 90 | 52 | 60 | 25 | 72 |
| <i>Contingencia de proyecto</i> | 94 | 80 | 94 | 90 | 20 | 30 |
| <i>Financiamiento del proyecto (intereses)</i> | 8 | 0 | 8 | 8 | 30 | 10 |
| <i>Costo Total de la Planta (US\$/kW)</i> | 4500 | 5500 | 3600 | 5000 | 2800 | 3500 |

¹: Datos son representativos de valores típicos para sistemas desarrollados basados en la información disponible desde los desarrolladores de celdas de combustible

VI. ELECTRICIDAD SOLAR

Los sistemas solares de energía eléctrica transforman la luz del sol en electricidad. Las celdas solares, también conocidos como celdas fotovoltaicas (*PV: Photovoltaic*), hacen el trabajo de producir electricidad. Hay algunos tipos de tecnologías eléctricas solares actualmente bajo desarrollo, pero cuatro: cristales de silicio (una forma refinada de la arena de playa), películas delgadas, concentradores, y termo fotovoltaico: son un rango ilustrativo del rango de tecnologías [3].

Cristales de Silicio. Son hechas usando una corte desde un solo cristal cilíndrico de silicio, esta es la tecnología fotovoltaica más eficiente. La ventaja principal de las celdas mono-cristalinas es su eficiencia alta, típicamente alrededor del 15%, aunque el proceso de manufactura es complicado, requiere enormes cantidades de energía, causando un incremento substancialmente más alto en los costos de producción que las otras tecnologías. Las celdas solares de cristales de silicio son usados en mas de la mitad de los equipos solares eléctricos.

Las celdas multi-cristalinas son mas baratas de producir que las mono-cristalinas, debido al proceso simple de fabricación. Sin embargo, ellas tienden a ser ligeramente menos eficientes, con una eficiencia media de alrededor de 12%.

Películas delgadas. La película delgada, es otra tecnología son mas baratos para producir electricidad pero algo menos eficiente que los módulos de silicio cristalino. La tecnología mas desarrollada de las películas delgadas usa el silicio amorfo, en el cual los átomos no están arreglados en un orden particular como lo estarían en un cristal. Una película delgada de silicio amorfo, de solo un micrón de espesor puede absorber 90% de la energía solar usable que cae en el. Otros materiales de película delgada incluyen el Telurio de Cadmio, y el cobre indio diselenido. Substantiales disminución en costos son posible con esta tecnología debido a que requiere relativamente menos materiales semiconductores.

Concentradores Solares. Los sistemas concentradores usan lentes o reflectores para enfocar la luz solar en la celda solar o modulo, la idea es magnificar la intensidad de la luz, la celda solar produce más electricidad. La eficiencia del modulo puede estar en un rango de hasta 17%, y celdas con concentradores han sido diseñados con eficiencias de conversión que exceden de 30%. Los concentradores trabajan solo con los rayos solares directos y operan más eficientemente en climas soleados u secos.

Termofotovoltaico. Los dispositivos termofotovoltaicos (TPV) convierten el calor en la misma vía en que otros equipos PV convierten la luz en electricidad. En este caso se emplea un semiconductor sintonizado a la longitud de onda emitida por la radiación infrarroja emitido por cuerpos calientes. Los convertidores TPV son relativamente libres de mantenimiento, debido a que no contienen partes móviles. Además usar la energía solar, ellos pueden convertir el calor de alguna fuente de calor de alta temperatura, incluyendo la combustión de una fuente como gas natural o propano en electricidad. Los convertidores TPV virtualmente de poca o

ninguna emisión de monóxido de carbono.

A. Eficiencia

El desempeño de las celdas y módulos fotovoltaicos es frecuentemente expresado en términos de la eficiencia de conversión. La eficacia de un módulo es bastante importante. La eficiencia mas alta de módulo, implica que menos módulos son necesarios. El límite teórico de eficacia para un módulo fotovoltaico está en el orden del 25 %.

TABLA 9
EFICIENCIAS DE CONVERSIÓN MÁXIMAS Y TÍPICAS EN CONDICIONES ESTADAR* DE PRUEBA [6]

| Tipo | Eficiencia Típica del Modulo [%] | Máxima Eficiencia registrada del Módulo [%] | Máxima Eficiencia registrada en laboratorio [%] |
|--|----------------------------------|---|---|
| <i>Silicio Monocristalino</i> | 12 - 15 | 22.7 | 24.7 |
| <i>Silicio Monocristalino</i> | 11 - 14 | 15.3 | 19.8 |
| <i>Silicio Amorfo</i> | 5 - 7 | - | 12.7 |
| <i>Telluride de Cadmio (CdTe)</i> | - | 10.5 | 16.0 |
| <i>Copper indium gallium diselenide (CIGS)</i> | - | 12.1 | 18.2 |

*: 1 000 Wm², 25°C, espectro solar AM1.5

La eficacia real de un módulo solar que puede ser obtenido en la práctica es algo inferior que el límite teórico y depende en mayor grado sobre el proceso de la fabricación y la utilización de materiales en la construcción del módulo. El objetivo final del fabricante, es un modulo solar cuya eficiencia se acerque al 25%.

B. Costos

Actualmente el costo del sistema FV esta entre 6000 a 10000 US\$/kW instalado. El costo depende del tamaño del sistema, equipos opcionales y otros cotos de trabajo. Los precios varían dependiendo de otros factores también como el proveedor, el clima, etc. El precio promedio para módulos FV es alrededor de 4 US\$/kW excluyendo el costo del sistema de balance (BOS), el cual incrementa los costos de fabricación de 30% al 100%.

TABLA 10
CARACTERÍSTICAS DE COSTOS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS [7]

| Instalación Tipo | Tamaño | Precio del Sistema (\$) | Costo de Generación Solar FV (\$ cents/kWh) | Costo de Electricidad (\$ cents/kWh) |
|--|---------|-------------------------|---|--------------------------------------|
| Residencial (Sistema instalada en casa en techo con baterías de respaldo fuera de la red) | 2 kWp | 18.923 (9.46\$/Wp) | Soleado: 39.6 Nublado: 87.0 | 8.8 |
| Comercial (Instalado en terreno, conectado a la red sin potencia de respaldo) | 50 kWp | 361.932 (7.24\$/Wp) | Soleado: 29.2 Nublado: 64.2 | 7.8 |
| Industrial (instalado en techo plano de edificación, conectado a red) | 500 kWp | 2.450.711 (4.90\$/Wp) | Soleado: 21.2 Nublado: 46.5 | 5.6 |

Los costos de operación y mantenimiento para sistemas FV son proporcionalmente insignificantes y son menores a 0.01 US\$/kWh. El mantenimiento programado consiste mayormente del lavado de los módulos para remover el sucio y la basura.

VII. BIOFUENTES DE ELECTRICIDAD

La bioelectricidad, también llamada bioenergía, es la electricidad producida por los combustibles de biomasa. Los combustibles de biomasa incluyen residuos provenientes de la madera, residuos de producción de alimentos, y combustibles gaseosos producidos de biomasa sólida, desechos de animal, o terraplenes. La tecnología bioeléctrica convierte los combustibles renovables de biomasa en electricidad (y calor) usando modernos calentadores, gasificadores, turbinas y generadores celdas de combustibles y otras tecnologías. La mayoría de la electricidad generada a partir de la biomasa es por medio de un ciclo de vapor. La biomasa puede ser también quemado junto con el carbón en una caldera (en una planta de generación convencional) para producir vapor y electricidad. Esto es ventajoso para las empresas eléctricas ya que obtiene algunos beneficios ambientales del uso de la energía renovable. La biomasa sólida puede ser convertida en combustible gaseoso en un gasificador. Este biogas puede ser quemado en conjunto con madera (u otro combustible) en una caldera generadora de vapor o usado para operar una turbina a gas convencional. El biogas puede ser también creado por la digestión de desechos de comida o animales en la ausencia de oxígeno - digestión anaeróbica-.

Los gases combustibles producidos por la biomasa puede ser empleado para generar electricidad en una turbina a gas, o en una unidad de generación de ciclo combinado.

A. Costos

Usando tecnología de combustión convencional sin cogeneración, el costo estimado para generar electricidad desde la biomasa esta en el rango de 5.2 a 6.7 ¢US\$/kWh. En cambio la generación de electricidad en plantas de ciclo combinado con biogases, ronda los 2.8 ¢US\$/kWh. El costo estimado de producir electricidad desde la digestión anaeróbica de excretas de animales es de 3.7 a 5.4 ¢US\$/kWh. El costo de producir bio-combustibles varía con el costo del reciclaje y la escala de producción. El etano producto del maíz, posee un costo estimado de 1.10 US\$/Galón. Aunque aun no esta en etapa comercial el etanol de productos de celulosa, el costo ronda los 1.15 y 1.43 US\$/Galón. Debido a que el galón de etanol posee menos energía que un galón de gasolina, debe ser multiplicado por un factor de 1.5 para hacer una comparación, esto significa que si el costo del etanol es 1.10US\$/galón el costo para producir el equivalente en energía a un galón de gasolina es 1.65US\$/galón, siendo el precio comercial promedio de la gasolina 0.90US\$/galón. Una barrera principal que afronta la producción comercial biodiesel es el costo de producir el combustible. La consecución de semilla del aceite, el transporte, el almacenaje y la extracción del aceite representan al menos el 75% del costo de producir biodiesel. El costo estimado de producir biodiesel es 2.56 US\$/galón de éster de metilo a partir de semilla de colza. Estimaciones recientes apuntan que el coste de producción en la gama de 1.30 US\$/galón (usando la grasa superflua) a 2.00 US\$/galón o más cuando se usa el aceite de

soja.

Un combustible mezclado del 20% biodiesel y el gasoil del 80% de petróleo podría reducir el costo de producción a aproximadamente 1.10 US\$/galón, asumiendo un costo diesel de petróleo de 90¢ US\$/galón.

VIII. ENERGÍA EÓLICA

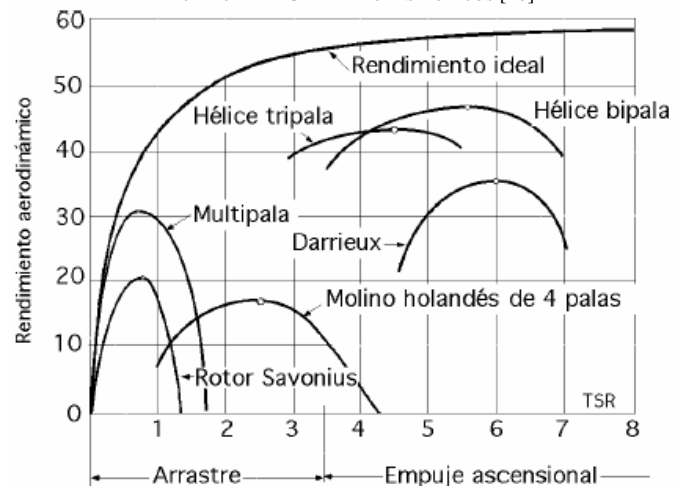
La energía eólica es la fuente de energía de mayor crecimiento en el mundo. Hacia finales del año 2002, la capacidad instalada de generación eólica era aproximadamente de 17.500 MW, suficiente para generar alrededor de 34 billones de kWh al año de electricidad [8]. La tecnología eólica es limpia y renovable que se ha incrementado en popularidad con los consumidores y las políticas del mercado. En respuesta, las empresas eléctricas han desarrollado nuevas plantas de viento que consisten de muchas turbinas de viento.

Cuando la velocidad del viento se incrementa, el valor de la electricidad generada aumenta exponencialmente. Debido a los vientos rápidos, menos turbulentos son encontrados en alturas sobre el terreno, los nuevos aerogeneradores están ubicados en torres de algunos cientos de pies de altura.

A. Eficiencia

Un sistema eólico, posee una eficiencia mecánica por encima del 22%, llegando hasta una eficiencia aerodinámica que ronda el 40%. Aunque diseños particulares pueden maximizar el coeficiente de potencia y en consecuencia la eficiencia del sistema. La relativa baja eficiencia de este sistema de generación proviene de sus fundamentos aerodinámicos. La ley de Betz dice que sólo puede convertirse menos de 16/27 (el 59 %) de la energía cinética en energía mecánica usando un aerogenerador [9]

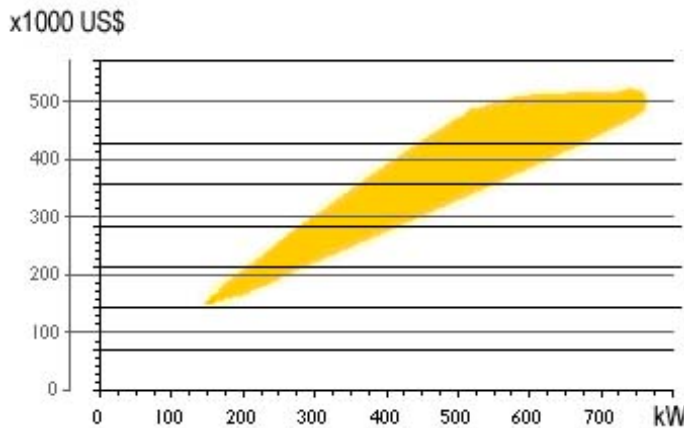
FIGURA 1
EFICIENCIA DE GENERADORES EÓLICOS [10]



B. Costos

El costo de las granjas eólicas ha disminuido y el costo típico para una granja es de alrededor de 1000 US\$/kW, y para aplicaciones *off-shore* 1600 US\$/kW.

FIGURA 2
COSTOS DE CAPITAL DE GENERADORES EÓLICOS [9]



El costo de mantenimiento de una granja eólica es típicamente de 0.9 ¢US\$/kWh o menos.

TABLA 12
CARACTERÍSTICAS DE COSTOS DE MANTENIMIENTO DE SISTEMAS EÓLICOS

| Actividad | Porcentaje de costo total | ¢US\$/kWh |
|---------------------------------------|---------------------------|-----------|
| Visitas y Mantenimiento no programado | 75% | 0.68 |
| Visitas y mantenimiento programado | 20% | 0.18 |
| Overhaul Mayor | 5% | 0.04 |

Los costos por kWh de una granja es una función del factor de capacidad anual de la granja de viento, costos de mantenimiento, y costos de instalación. El costo de la energía eólica es de alrededor de 3 a 6 céntimos de US\$/kWh rango que varía por el promedio de las granjas eólicas por su ubicación. Los costos para turbinas eólicas de pequeña escala son más altos.

IX. MOTOR STIRLING

Los motores Stirling, son clasificados como motores de combustión externa. Es un sistema sellado dentro de un fluido de trabajo inerte, usualmente helio o hidrogeno. Generalmente son encontrados en pequeños tamaños (1-25kW) y están siendo actualmente producidos en pequeñas cantidades para aplicaciones especializadas. El reciente interés de una FGD, de uso para la industria espacial y marítima, ha revivido el interés por el motor Stirling y ha resultado, en un aumento en los esfuerzos de investigación y desarrollo. Uno de los esfuerzos de desarrollo esta orientado a las aplicaciones de discos solares –calor reflejado de los colectores concentradores solares es usado para alimentar un motor Stirling [3].

A. Eficiencia

Los motores Stirling han estado disponibles por un gran tiempo, no solo en pequeña cantidades sino en aplicaciones especializadas. Por lo tanto, los datos de rendimiento sobre motores Stirling son difíciles de obtener. La energía de un motor Stirling térmico (STM: *Stirling Thermal Motor*) posee una unidad de 25 kW con una real eficacia eléctrica de

aproximadamente el 30 %, aunque el objetivo es que se aumente esta eficacia al 34 % con más desarrollo. Otras empresas reportan eficiencias eléctricas de motores Stirling corriente están en el rango de 12 a 30%. El objetivo es que se aumente esta eficacia al 34 % con más desarrollo.

B. Costos

Los costos de capital de motores Stirling son relativamente altos (2.000- 50.000 US\$/kW) [3], y no son actualmente competitivos con las otras tecnologías FGD. Son manufacturados en muy pocas cantidades lo que resulta en unos elevados costos de capital. Los desarrolladores están trabajando para bajar los costos por medio de una combinación de diseño refinado y sustituciones de materiales.

X. SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO

Las tecnologías de almacenamiento de energía no producen energía neta a la red solo pueden proveer energía eléctrica sobre periodos de tiempo cortos. Estos son usados para corregir el voltaje, *sag*, *flicker*, y surges, que ocurren cuando las empresas eléctricas o los consumidores interrumpen el suministro o cargas. Estos también pueden ser empleados como fuente ininterrumpida de energía (UPS). Como tal, las tecnologías de almacenaje de energía, como se considera, son un recurso de energía distribuida.

Almacenaje de Batería (Battery Storage). Las empresas eléctricas típicamente emplean las baterías para proveer una fuente interrumpida de energía eléctrica a las subestaciones y para arrancar los sistemas de energía de respaldo. Sin embargo, las aplicaciones alcanzan la nivelación de carga y el *peak shaving*, pudiendo almacenar y enviar la energía por un periodo de algunas horas. Las baterías también han incrementado su calidad de energía y confiabilidad para consumidores residenciales, comerciales e industriales proveyendo un respaldo o nivelación durante una pérdida de energía. Las baterías estándar usadas en las aplicaciones de almacenamiento de energía son de plomo-ácido, también hay algunas baterías avanzadas como sodio/sulfuro, zinc/bromo, y litio/aire, que están cercas de ser comerciales, ofreciendo una promesa en la aplicación en las empresas eléctricas.

Volantes (Flywheel). En un dispositivo electromecánico que acopla un motor-generador con una masa dotante para almacenar energía por corta duración. Los volantes convencionales son “cargados” y “descargados” vía un motor-generador, el cual maneja la energía proveída por la red al rotor que gira del volante y la entrega durante un corte de suministro eléctrico, *sag* u otra perturbación. La energía cinética almacenada en el rotor es transformador en energía eléctrica DC por el generador, y la energía es entregada a frecuencia constante y voltaje a través de un inversor y un sistema de control. Tradicionalmente el rotor volante esta usualmente construido de acero y están limitados a girar a una rata de unas pocos cientos de revoluciones por minuto (RPM), mientras que los volantes avanzados son construidos de materiales de fibra de carbón y rodamientos magnéticos que pueden girar en vacío a velocidades de 40.000 a 60.000 RPM.

El volante provee energía durante el periodo entre la pérdida del suministro de la empresa y el comienzo de un sistema de respaldo de energía (por ejemplo, generador diesel). Los volantes proveen 1-30 segundos de tiempo, mientras los sistemas de respaldo entran en funcionamiento entre 5 y 20 segundos.

Superconductores Magnéticos de Almacenamiento de Energía (SMES: Superconducting Magnetic Energy Storage). Los SMES almacenan energía en el campo de una gran bobina magnética con un flujo de corriente continua. Esta puede ser convertida de nuevo en corriente alterna cuando sea necesario. La baja temperatura de SMES enfriados por helio líquido esta comercialmente disponible. Los SMES de alta temperatura enfriado por nitrógeno líquido aun se mantienen en la etapa desarrollo y puede hacerse una fuente de almacenamiento de energía comercialmente viable en el futuro. Un campo magnético es creado por la circulación de una corriente DC en una bobina cerrada de cable semiconductor. El camino de la corriente circulante por la bobina puede ser abierto por un interruptor es estado sólido el cual es modulado para abrir y cierra. Debido a la alta inductancia de la bobina, cuando el interruptor se abre, la bobina magnética se comporta como una fuente de corriente y forzara la corriente a un capacitor el cual se cargara a algún nivel de tensión. La adecuada modulación del interruptor de estado sólido puede mantener el voltaje a través del capacitor dentro del apropiado rango de operación de un inversor. Un inversor convierte el voltaje DC en voltaje AC. Los sistemas SMES son grandes y generalmente usados para corta duración, tales como un evento de swicheo de la empresa eléctrica.

Super-capacitor (Supercapacitor). Los supercapacitores (también llamados ultracapacitores) son fuentes de energía DC y deben ser interconectados con la red eléctrica con un acondicionador de potencia estático, proveyendo una salida de 60Hz. Un supercapacitor provee energía durante una interrupción de corta duración y sags de voltaje. Por su combinación con un sistema de potencia ininterrumpida basado en baterías, la vida de las baterías puede ser extendida.

Almacenamiento de Energía por Aire Comprimido (CAES: Compressed Air Energy Storage). Este usa el aire presurizado como un medio de almacenamiento de energía. Un motor eléctrico impulsa un compresor que es usado para presurizar el reservorio de almacenamiento usando la energía fuera de las horas pico y el aire es liberado del depósito por una turbina durante el horas pico para producir la energía. La turbina es esencialmente una turbina modificada que también puede ser encendida con el combustible gas natural o combustible destilado. La localización ideal para los grandes depósitos de almacenaje de energía de aire comprimido grandes son capas acuíferas, minas convencionales de rocas duras, y cavernas hidráulicamente explotadas para extraer sal. El aire puede ser almacenado en tanques a presión para pequeños sistemas.

TABLA 13
ESTADO DE DESARROLLO DE LAS DIFERENTES TECNOLOGÍAS DE ALMACENAMIENTO

| Tecnología | Estado |
|---|---|
| Baterías | Pilas de plomo-ácidas son disponibles en el comercio y extensamente usadas. La investigación en curso para pilas avanzadas. |
| Volantes (Flywheels) | Comercialmente disponibles como productos individuales o integrados con motores. Significativa investigación esta también desarrollándose en torno a productos de volante nuevos. |
| Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) | Comercialmente disponibles usando superconductores en el helio líquido. Los superconductores en el nitrógeno líquido están en la etapa de desarrollo.. |
| Supercapacitors | Pequeños están disponibles en el comercio para su empleo en dispositivos electrónicos. Supercapacitores Grandes están actualmente en desarrollo. |
| Sistema de Almacenamiento de Aire Comprimido (CAES) | No son extensamente utilizado debido a las exigencias significativas de espacio |

A. Eficiencia

La eficiencia y el ciclo de vida son dos importantes parámetros a considerar junto con otros parámetros antes de seleccionar una tecnología de almacenamiento. Ambos parámetros afectan el costo total. La baja eficiencia incrementa el costo de energía efectiva, y el bajo ciclo de vida incrementa el costo total, ya que el sistema ha de ser reemplazo más frecuentemente.

FIGURA 3
EFICIENCIAS DE SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO [11]



B. Costos

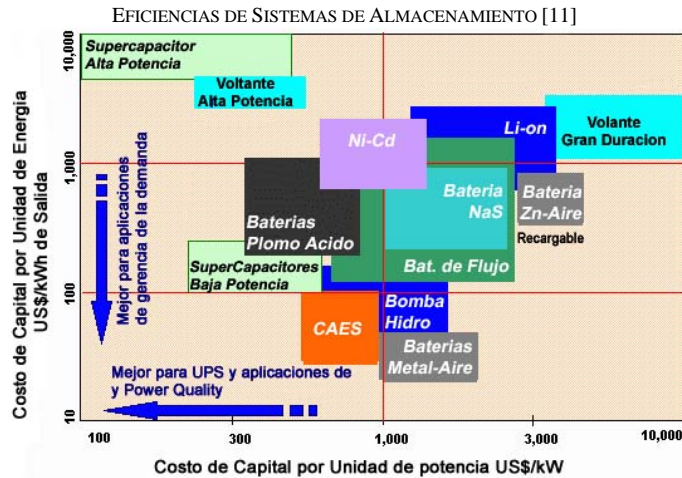
Mientras que el costos de capital es un parámetros importante, de sebe considerar seriamente el costo total (incluyendo el impacto de la vida del equipo, y los costos de O&M) ya que este es un indicador mas real para el análisis económico. Por ejemplo, mientras el costos de capital de las baterías de plomo-acido es relativamente bajo, ellas no son la opción mas económica para la administración de la demanda (seguimiento de la demanda) debido a su relativamente corta vida útil para esta aplicación.

Los costos de sistemas de almacenamiento ajustados excluyendo los costos de la electrónica de potencia.

El costo de un sistema completo de UPS puede variar entre 200US\$/kVA a 1500US\$/kVA. Los costos de mantenimiento incluyen el reemplazo de baterías, capacitares y rectificadores. Los costos de las baterías pueden representar entre el 60 y

70% de costo completo del sistema UPS. La frecuencia de reemplazo de las baterías depende de cuan profundamente las baterías han sido agotadas y cuan rápidamente la corriente es drenada de la batería durante su descarga. Típicamente las baterías son reemplazadas cada 5 a 7 años.

FIGURA 4



XI. SISTEMAS HÍBRIDOS

Los sistemas híbridos se basan en la combinación de tecnologías con el fin de incrementar la eficiencia y mejorar el desempeño de las FGD. Algunos ejemplos de sistemas híbridos incluyen:

- Celdas de combustible de oxido sólido (SOFC) combinados con turbinas a gas o microturbinas.
- Motor Stirling combinados con un disco solar.
- Turbinas eólicas con baterías de almacenamiento y generador de respaldo.
- Motores (y otras promotores) combinados con dispositivos de almacenamiento de energía tales como *flywheels*.

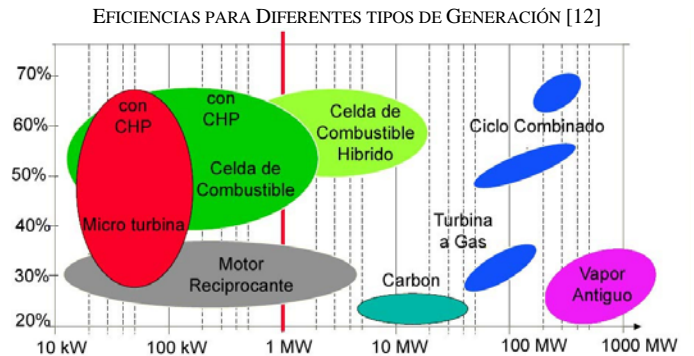
El sistema híbrido de turbina gas/SOFC pueden proveer una eficiencia eléctrica de conversión de 60 a 70%. Algunas compañías están trabajando en el desarrollo de sistema híbrido de Motor Stirling/Disco Solar. Este tipo de sistema híbrido son pequeños, con salidas típicas m el rango de alrededor de 5 a 25 kW. Las turbinas solares pueden ser usados en combinación con sistemas de almacenamiento de energía y algunos tipos de generación de respaldo (por ejemplo, motores reciprocantes, turbinas o celdas de combustibles) para proveer suministro de energía de régimen permanente a remotas ubicaciones no conectadas a las grades redes eléctricas. Los dispositivos de almacenamiento de energía tales como volantes están siendo combinados con motores de combustión interna y microturbinas para proveer una fuente de potencia de respaldo confiable. La energía almacenada en dispositivos provee una capacidad de sobreponerse a una discontinuidad de servicio hasta que las Fuentes de respaldo entran en servicio.

XII. COMPARACIÓN EFICIENCIAS

Las tecnologías empleadas en las fuentes tradicionales de naturaleza térmica, aun ostentan la producción de potencia en

alta densidad, siendo la mayor las plantas térmicas, aunque en contraparte, su eficiencia es baja. En la actualidad la mayor eficiencia de generación alta densidad de potencia se logra en las plantas tradicionales de ciclo combinado, llegando hasta una eficiencia de 75%, por ello un gran numero de plantas con tecnología de este tipo se están instalando a nivel mundial y se estima que continué así por unos pocos anos, mientras la presión ambientalista obligue que disminuya su uso.

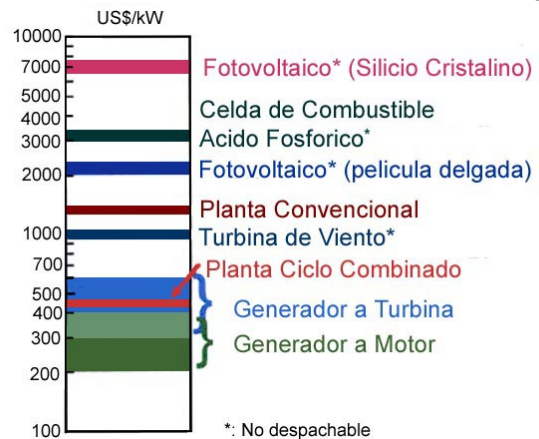
FIGURA 5



Las tecnologías emergentes como las micro turbinas y las celdas de combustible, se perfilan a ser los grandes protagonistas en los redes altamente penetradas por la GD. Las micro turbinas, están disponibles comercialmente en un rango de potencias entre los 10 y 200 kW, y ya hay experimentalmente unidades de 350 kW, y se espera que aumente su capacidad, por lo pronto la eficiencia de estas unidades ronda el 30% pero con aplicaciones de recuperación de calor se eleva a valores tan altos como 80% y sus costos en forma general están en promedio entre los 750US\$/kW y los 1200 US\$/kW, y un 30% mas alto cuando se incluye la recuperación de calor.

FIGURA 6

COSTO DE CAPITAL PARA TECNOLOGÍAS DE GD Y MODULAR [12]



Por su parte las celdas de combustible, poseen un amplio espectro de potencias entre 5kW hasta un poco mas de 1 MW, aunque hay en proyecto unidades que llegan hasta los 10 MW, la eficiencia de estas esta correlacionado directamente con la temperatura de operación, y en la actualidad están en un rango entre 40 y 50% alcanzándose valores que llegan al 65% y 70% con recuperación de calor. Los costos de las unidades disponibles comercialmente varían mucho entre el tipo de

electrolito que se empleen, estando entre los 2000 y 4000 US\$/kW. Los desarrollos a futuro esperan una notable disminución de los costos y una mejora en la eficiencia de conversión de estas celdas.

XIII. CONCLUSIONES

La GD es una realidad en la actualidad y, cada día ostenta una mayor participación dentro de la generación de electricidad a nivel mundial y se espera que se incremente. La causa de ello son sus beneficios. Las tecnologías disponibles actualmente para la generación disminuida son muy variadas como se ha evidenciado en este artículo. Las tecnologías consideradas como tradicionales, han estado presente en el mercado por muchos años, lo cual les ha aportado la suficiente madurez como para exhibir los más bajos costos US\$/kW, además de la mas alta densidad de potencia. Las celdas de combustible se perfila junto con las micro turbinas a ser las tecnologías candidatas a penetrar densamente los sistemas de potencia, la razón, sus costos y su eficiencia.

XIV. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Zeballos R., y Vignolo M. **“La generación distribuida en el mercado eléctrico uruguayo”**, 2000.
- [2] CIGRE. **Panel on “Power System 2020” Emerging Technologies and Material Challengers Task Forces on behalf of the Technical Comité**. 2000.
- [3] California Electric Comision. *Distributed Energy Resource Guide*. Disponible en: <http://www.energy.ca.gov/distgen/>
- [4] U.S. Environmental Protection Agency, Climate Protection Partnership, Division Washington, DC. Disponible en: <http://www.epa.gov/>
- [5] U.S. Department of Energy. **Fuel Cell Handbook**. EG&G Services.
- [6] International Energy Agency. Disponible en: <http://www.oja-services.nl/iea-pvps/pv/materials.htm>
- [7] Solarbuzz Inc. Disponible en: <http://www.solarbuzz.com/>
- [8] World Energy Council. Disponible en: <http://www.worldenergy.org>
- [9] Fernández P (2002). Energía Eolica. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética. Universidad de Cantabria. Disponible en: <http://personales.ya.com/universal/TermoWeb/>
- [10] Danish Wind Industry Association. (2004). Visita guiada sobre la energía eólica. Disponible en: www.windpower.org
- [11] Electricity Storage Association. Disponible en: <http://www.electricitystorage.org/>
- [12] Gonzalez, F. **“Tecnologías de Micro-fuentes (Micro-Sources) disponibles actualmente para la Generación Distribuida (DG)”**. Trabajo de Ascenso. Universidad Nacional Experimental Politécnica de la Fuerza Armada. Maracay, Venezuela, Abril 2004.