

OPCIONES ENERGÉTICAS SOSTENIBLES PARA PUERTO RICO

Memorial Explicativo en Reacción al Proyecto del Senado 866

Efraín O'Neill-Carrillo, PhD, PE
José Colucci-Ríos, PhD, PE
Agustín Irizarry-Rivera, PhD, PE
Colegio de Ingeniería
Universidad de Puerto Rico-Mayagüez

I. Introducción

Uno de los grandes impactos que ha tenido el ser humano en el Mundo lo son las diversas consecuencias del uso de recursos naturales para asegurar un abasto de energía apropiado para sostener el desarrollo económico y tecnológico de los últimos siglos. Comenzando con la quema de madera, pasando por la revolución industrial, luego el uso de carbón, hasta llegar a nuestra condición actual de dependencia del petróleo, cada etapa energética ha conllevado costos sociales y ambientales cada vez mayores. Se argumenta que la humanidad está en camino de “descarbonizar” sus fuentes, en la medida que cada uno de los combustibles que reemplazan al anterior han tenido menos contenido de carbono (de madera a carbón, de carbón a petróleo). Sin embargo, la reducción en el contenido de carbono del combustible primario ha venido acompañada de grandes adelantos tecnológicos que han permitido un desarrollo económico sin precedentes en los últimos cien años, al menos para parte de la humanidad. Este desarrollo económico ha causado un aumento en la demanda de bienes y servicios no-esenciales, principalmente en países industrializados. Esto a su vez ha provocado un aumento en el consumo per cápita de energía a nivel mundial. Por lo tanto, si bien es cierto que el petróleo tiene menos contenido de carbono que el carbón, también es cierto que se quema una cantidad mucho mayor de combustibles fósiles en la actualidad que hace cien años. Esto implica una cantidad mucho mayor de emisiones hoy que hace cien años.

Por otro lado, la población mundial ya sobrepasó los 6 mil millones, y se espera que se acerque a 10 mil millones para el 2050. El aumento en población ha ocurrido principalmente en países en desarrollo, quienes a su vez se espera tengan el aumento mayor en demanda por energía al aspirar al desarrollo económico y tecnológico de los países desarrollados. La figura 1 muestra como la demanda por energía tuvo un marcado aumento luego de 1950, y esto ocurre a la vez que la población mundial aumenta. Es importante notar que todavía en la actualidad, entre 25 y 30% de la humanidad no tiene acceso a fuentes de energía diferentes a la madera o biomasa. Por otra parte, un 20% de la población mundial (en los países industrializados) consume sobre el 70% del petróleo en la actualidad. Esto es, si los seis mil millones de habitantes de la Tierra tuvieran el mismo patrón de uso que los ciudadanos de los países industrializados, estaríamos ahora mismo en un estado de crisis. Sin embargo, la crisis no está tan lejos como muchos piensan. Tanto los patrones de consumo de los países desarrollados, como el aumento en población y por ende el aumento en demanda de energía en países en desarrollo representan un reto de grandes proporciones para la humanidad en el siglo 21. Satisfacer la demanda esperada con las fuentes y tecnologías de energía actuales tendría un costo social y ambiental sin precedente considerando el nivel de emisiones de carbono esperado.

El énfasis de este escrito será en las alternativas energéticas que reducirían nuestra dependencia actual en el petróleo, y de paso serían de menor impacto en cuanto a emisiones al ambiente. Se discutirá además la aplicabilidad e integración de nuevas tecnologías y fuentes de

energía en Puerto Rico. Pero antes, un breve resumen del panorama futuro del petróleo y el reto energético que tendrá la humanidad en este siglo XXI.

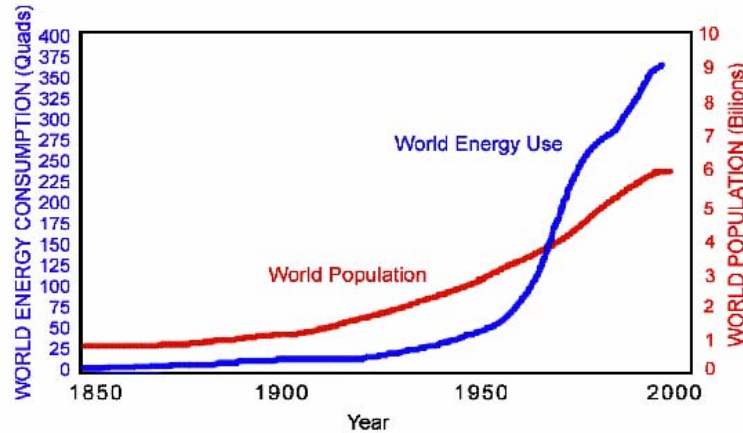


Figura 1: Comparación del Uso de Energía y la Población Mundial (Fuente: US Department of Energy)

II. El Futuro del Petróleo y el Combustible Futuro

El desarrollo tecnológico y económico de la segunda mitad del siglo 20 fue cimentado en el uso del petróleo. La disponibilidad de crudo a precios muy bajos hizo al Mundo dependiente de este recurso. Los países industrializados comenzaron a evaluar esta dependencia cuando a principios de la década del 70 la producción del petróleo en Estados Unidos alcanzó su punto máximo, y poco después la Organización de Países Exportadores de Petróleo (OPEP) impuso un embargo. Los gobiernos mundiales comenzaron a fomentar y apoyar el uso de fuentes alternas de energía, y se pasó legislación importante en esta dirección. Parecíamos en ruta a una transición a otra fuente energética. Sin embargo, el descubrimiento de grandes reservas de petróleo en el fondo del mar, atado al aumento en la producción de países no-miembros de la OPEP, redujo la crisis energética mundial. El Mundo siguió con sus patrones de consumo, cada vez aumentando el uso del petróleo. La figura 2 muestra la distribución actual de uso de petróleo en millones de barriles por día. Sin embargo, el costo del barril de petróleo luego de la crisis aumentó de \$5 a \$15, para nunca volver a los precios anteriores a la crisis. La búsqueda de alternativas energéticas, aunque continúa hoy, tiene menos apoyo que en los años siguientes a la crisis de los años 70.

El petróleo es un recurso finito, con reservas que tomaron millones de años en formarse. Sin embargo, se espera que el pico mundial de extracción de petróleo llegue en menos de 40 años. Esto es, la mitad de las reservas de petróleo serán explotadas dentro de cuatro décadas. Luego, el recurso comenzará a ser más difícil de extraer, y su costo inevitablemente aumentará. O sea, la humanidad logrará en unos doscientos años consumir un recurso no-renovable que tomó cientos de millones de años en formarse. Nuevos adelantos en la tecnología de extracción pueden mover el pico de producción unos años, pero el mismo ocurrirá en este siglo. Es importante notar que existen otras maneras de obtener petróleo, pero el procesamiento conlleva impactos ambientales adicionales, y la calidad del producto es menor que el petróleo usado hoy (mayor contenido de carbono en las emisiones).

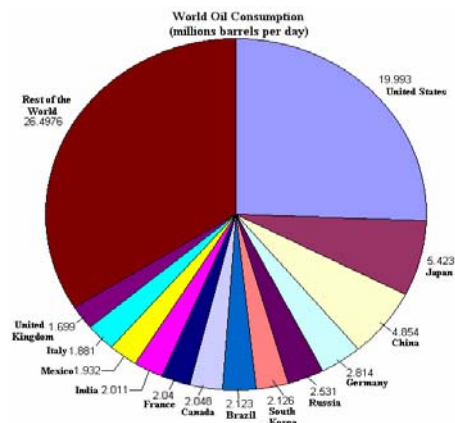


Figura 2: Consumo Mundial de Petróleo

Aún con este panorama, se espera que el petróleo siga dominando el mercado de energía, quizás en todo el siglo 21. Sin embargo, no sería prudente depender del petróleo para satisfacer el crecimiento en la demanda energética esperada. Evidencia de la necesidad de nuevas fuentes de energía lo son las estrategias que grandes compañías de energía están adoptando en preparación para el rol menos dominante del petróleo a largo plazo. En los años que quedan de petróleo “barato”, se debe invertir los recursos necesarios para iniciar una transición ordenada hacia otras fuentes energéticas e ir supliendo el aumento en demanda con nuevas fuentes. Además de las dificultades esperadas en la disponibilidad del recurso, los abastos mayores de petróleo se encuentran en el Medio Oriente, región con una delicada situación política. Esta es otra motivación para reducir la dependencia en este combustible.

¿Cuál será el combustible futuro? En estos momentos no hay una única contestación a esta pregunta, es mejor preguntar ¿cuáles son las alternativas de menor impacto ambiental que el petróleo? El reto es grande, proveer una fuente de energía que supla las necesidades de energía de cerca de 10 mil millones de personas con un impacto lo menor posible al ambiente, en especial en emisiones al aire. Las alternativas incluyen influenciar el manejo de energía del lado del usuario, por ejemplo la conservación de energía y el uso de métodos para aumentar eficiencia. El gas natural pudiera ser una alternativa, aunque el pico en producción no está muy lejos del pico del petróleo. Además los costos aún son altos en relación al petróleo. El carbón, usado con tecnología que reduzca el impacto ambiental es otra alternativa. Sin embargo, los costos son aún más altos que el gas natural, además de tener un problema de percepción negativa en la sociedad. Este último punto de percepción de la sociedad es también una de las desventajas de la fisión nuclear, además del costo inicial, manejo de desperdicios radioactivos, y de más reciente preocupación, posibles actos de terrorismo. La promesa de fusión nuclear, que no tiene las desventajas de la fisión, aún no se ha materializado. Es muy difícil lograr fusión a temperaturas razonables, y su costo presente es muy elevado. Otras alternativas van dirigidas hacia la conversión de energía usando fuentes renovables como hidroeléctrica, geotérmica, eólica (viento), del mar (mareas y corrientes), o radiación solar en lugar del uso de combustibles fósiles.

¿Cuáles de estas alternativas deben explorarse en Puerto Rico para reducir nuestra dependencia del petróleo? Las siguientes secciones proveen una contestación parcial a esta pregunta.

III. Situación Actual y Eficiencia Energética para Reducir Impacto Ambiental en Puerto Rico

El uso de la energía en Puerto Rico puede dividirse en tres grandes sectores: transportación, energía eléctrica, procesos industriales y otros. La división es similar con el sector de transportación al frente de los otros dos en uso de energía. La dependencia de derivados de petróleo está entre 90 y 95%. La gasolina como combustible domina el sector de la transportación. En el sector de generación de energía eléctrica, el petróleo domina con aproximadamente un 73%, seguido del gas natural y carbón con aproximadamente 26% entre ambos, y menos del uno (1) por ciento de la energía eléctrica proviniendo del uso de embalses (hidroeléctrica).

Una alternativa energética para reducir el impacto ambiental en Puerto Rico lo es el uso de métodos para aumentar o mejorar la eficiencia energética. En general la eficiencia de un sistema de conversión de energía se define como la razón de la energía de salida (o disponible para uso) a la energía de entrada al sistema. Si las pérdidas en un sistema o equipo eléctrico aumentan, hay menos energía disponible para uso por lo que la eficiencia se reduce. La Administración de Asuntos de Energía de Puerto Rico tiene un programa de orientaciones a las agencias de gobierno para reducir el consumo de energía. Estas medidas van desde disminuir el consumo por parte de la ciudadanía (conservación) hasta el uso de equipo que reduzca las pérdidas en los sistemas eléctricos. En este último renglón es importante notar la tecnología de electrónica de potencia para aumentar la eficiencia. La electrónica de potencia utiliza interruptores de alta frecuencia para controlar energía y para convertir energía de una forma a otra. Esta tecnología tiene aplicaciones en todos los niveles de energía, desde cargadores de baterías para teléfonos portátiles, convertidores de energía en computadoras, hasta dispositivos que controlan el flujo de potencia en sistemas de miles de voltios.

En Puerto Rico, el uso de dispositivos de electrónica de potencia en la industria es cada vez mayor, en especial los accionadores eléctricos (“electric drives”) que permiten mayor flexibilidad y control de los motores que proveen la energía mecánica necesaria en procesos industriales. Un ejemplo común de la aplicación de electrónica de potencia, tanto a nivel industrial como comercial y residencial, es en los acondicionadores de aire modernos, en los que en lugar de mantener la temperatura prendiendo y apagando el compresor, el mismo es controlado por un circuito de electrónica de potencia que lo hace operar a diferentes velocidades de acuerdo a la temperatura que se desee mantener. Otra aplicación importante de electrónica de potencia lo son las lámparas compactas fluorescentes (“compact fluorescent lights” o CFLs). Desde los años 70, el balastro magnético que controlaba la corriente de las lámparas fluorescentes fue sustituido paulatinamente por circuitos electrónicos que hacían la misma función de control, pero de manera más eficiente. A la misma vez, el tamaño de los tubos fluorescentes fue reduciendo. La unión de electrónica de potencia con mejores diseños de los tubos dio paso a los CFLs. Estas tienen una mayor vida útil, además de tener un mejor rendimiento y luminiscencia, y menor consumo de energía.

Una desventaja que debe tenerse en cuenta al momento de utilizar sistemas de electrónica de potencia lo es el comportamiento no-lineal de estos dispositivos, los cuales usan una corriente que no es puramente senoidal. La figura 2 muestra un ejemplo de la corriente no-lineal que requiere un centro de computadoras. Nótese que la curva se acerca a cero periódicamente y por bastante tiempo, evidencia de la presencia de componentes armónicos que alejan la corriente de tener una forma de senoide puro. Esto puede afectar el desempeño de otros equipos cercanos a

estas cargas de electrónica de potencia pues el comportamiento ideal de los sistemas eléctricos es de senoide puro.

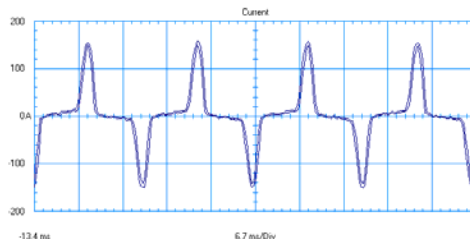


Figura 3: Corriente de un Grupo de Computadoras en un Centro de Cómputos

En la discusión de eficiencia es importante dejar claro que el ahorro energético obtenido a través de tecnologías eficientes es menor al aumento esperado en demanda mundial de energía. Existen límites en cuanto al impacto que la tecnología puede tener. Esto es, aumentos en la eficiencia de equipos, aunque deseables y necesarios, no son suficientes para atender el aumento en uso de energía esperado en los próximos años. Otra importante consideración que debe ir de la mano con la discusión de eficiencia, lo es el patrón de consumo de los usuarios. Si el objetivo es reducir el impacto ambiental, el aumentar o mejorar la eficiencia de un sistema no debe ser interpretado como una licencia para aumentar el uso de ese equipo. Esto equivaldría a mantener el mismo impacto ambiental.

Otra alternativa asociada a mejora de eficiencia es el desplazamiento de generación usando buena administración de consumo. Desplazamiento de generación se refiere a eliminar la necesidad de generar electricidad disminuyendo el consumo de la misma. Usualmente se usa este término cuando la memoria en consumo es suficientemente grande para desplazar, o pudieramos decir apagar, unidades generatrices.

En Puerto Rico quizás el método más efectivo para impactar la generación de electricidad es usar la energía solar para evitar la generación de electricidad. El llamado método de Gerencia de la Demanda (“Demand Side Management”) provee para combinar la energía del sol y la disminución de la demanda eléctrica utilizando calentadores de agua solares en todos los hogares de la Isla.

Un ejemplo numérico resulta ilustrativo. Se estima que el 14% del costo de electricidad en un hogar corresponde a calentar agua. En Puerto Rico se generaron unos 20.5 mil millones de kilovatios-hora de electricidad en el año 2000. Para generar esta electricidad se necesitaron unos 4,400 MW de capacidad de producción instalados en el sistema eléctrico. Si aproximamos el costo de la energía eléctrica en \$0.10 por kilovatio-hora y presumimos que un 37% de la demanda de electricidad es del sector residencial el costo anual de calentar agua para uso doméstico en Puerto Rico es de unos 106.2 millones de dólares. Si en Puerto Rico existiera un incentivo contributivo real, 100% de deducción en calentadores de agua solares, y una ley que exigiera convertir todo sistema doméstico de calentar agua a uno solar podríamos convertir este gasto en inversión. En unos cinco años desplazariamos generación equivalente a la planta Ecoléctrica, de 507 MW de capacidad y costo aproximado de \$600 millones. No solo obtendríamos un ahorro neto de 106.2 millones de dólares anuales por los próximos 10 o 15 años, la vida útil del calentador solar, sino que disminuimos la contaminación ambiental y el uso del sistema de transmisión y distribución aumentando de esta manera su confiabilidad.

Otras alternativas energéticas para reducir el impacto ambiental en Puerto Rico lo son el uso de fuentes y combustibles alternos. El resto de este ensayo dará énfasis a dos alternativas energéticas en el sector de energía eléctrica y una alternativa en la transportación.

IV. Energía Renovable

En esta sección se discutirá una alternativa de energía renovable para la generación de energía eléctrica con gran potencial en Puerto Rico: el viento. El viento es movimiento del aire creado por diferencias en temperatura. Dentro de las tecnologías renovables es la que se espera sea más competitiva en términos de costo en el futuro cercano para generación de electricidad a gran escala. Para generación de electricidad se usan los vientos de superficie, a alturas menores de 1000 metros. El uso de turbinas o molinos de viento como generadores ha tenido un auge impresionante en la última década especialmente en Europa. En los países escandinavos por ejemplo, una parte considerable de la generación eléctrica proviene de energía de viento o eólica. Las turbinas de viento varían en su tamaño desde pequeñas en el rango de kilovatios con tamaños entre 100 y 200 pies, hasta turbinas de 1 a 3 megavatios (MW), entre 300 y 500 pies de altura. El viento mueve las aspas del molino, que están acopladas a un generador eléctrico. En el generador es donde se lleva a cabo la conversión de energía mecánica a energía eléctrica. La salida del generador se conecta a través de cables soterrados a un sistema de transmisión de energía, cuyos voltajes pueden ir desde miles hasta cientos de miles voltios. Esta tecnología es limpia, no emite contaminantes, y no provoca calentamiento global por lo que tiene un bajo impacto ambiental.

Para tener un impacto positivo para el ambiente, la generación con viento debe desplazar parte de la generación con combustibles fósiles, o al menos tener una participación mayor en el portafolio energético de los países. Por ejemplo, para suplir 160 MW en Dinamarca (esto es un 2% de la demanda de energía eléctrica de ese país), se necesitaron 80 turbinas de viento que forman un parque de viento. Si bien es cierto que la generación eólica tiene un impacto ambiental menor que la generación basada en combustibles fósiles, el establecimiento de parques de viento para generación de energía eléctrica no es una tarea fácil. Esta sección presenta parte del proceso que debe llevarse a cabo para alcanzar un nivel de uso mayor del recurso de viento por medio de parques de viento. Se incluye una descripción del análisis económico para proyectos de viento, además de consideraciones a tener en la construcción, asuntos sociales que deben atenderse, y aplicaciones en Puerto Rico.

A. Análisis Económico

El objetivo de todo análisis económico es medir la viabilidad de un proyecto o actividad. Este proceso es aún más importante en proyectos de generación eléctrica, donde la inversión de capital es elevada, y el retorno de ganancia puede tomar de 30 a 40 años. En un proyecto de generación eólica, el análisis económico se realiza para determinar si la venta de la energía generada será suficiente para pagar la deuda del proyecto, y para investigar si el proyecto provee un nivel de ganancias adecuado.

El desarrollo de parques de vientos es riesgoso, tanto en lo económico como en lo técnico. Los riesgos del mercado incluyen cambios en el crecimiento de la demanda de energía eléctrica, el costo del terreno, tarifas, retrasos en la construcción, costo del dinero (colateral), impuestos, acuerdo de compra de energía entre otros. Los riesgos técnicos incluyen la confiabilidad de las turbinas, la no-disponibilidad de equipo, cambios en la tecnología y la necesidad de predecir los patrones de viento de una región. El financiamiento es una de las consideraciones importantes

para un proyecto de viento. Los proyectos no van a ser financiados por los bancos si no existe beneficio económico. Los inversionistas necesitan ciertas garantías, en especial como se maneja el riesgo y la incertidumbre en el proyecto. Cuando no existen datos, o los datos son muy limitados, se recurre a simulaciones de Monte Carlo que demuestren el riesgo del proyecto. También se realiza un análisis de sensibilidad cuando hay incertidumbre en los parámetros estimados para el proyecto.

El desarrollo de una finca de viento en la costa este de Puerto Rico tiene el potencial de ser una propuesta económica atractiva. Esto se debe a que el mejor recurso de viento de Puerto Rico está localizado en la costa este. Datos de viento confiables están disponibles para distintos lugares de la costa este, pero información importante para evaluar la posibilidad económica de una finca de viento solamente se puede estimar o no está disponible. Por ejemplo, el valor de la tierra, el proceso confuso de obtener permisos, la falta de un marco legal, y ningún precedente en la Isla de un contrato de compra de energía para un proyecto de generación eólica hace de una evaluación económica una incierta.

En nuestro trabajo de investigación en el RUM hemos usado estimados razonables para parámetros que demuestran incertidumbre y hemos realizado análisis de valor presente. A esto hemos añadido análisis de sensibilidad para los parámetros inciertos y simulación Monte Carlo para hacer un avalúo final sobre el riesgo financiero.

Un punto importante en los proyectos lo es el uso dual del terreno. Es importante notar que al extraer energía del viento, se disminuye su velocidad. Para mantener el flujo volumétrico el aire ocupa más espacio luego de pasar por el molino. Esto es un factor limitante en la localización de turbinas de viento, ya que se debe dar suficiente espacio al viento para que recobre su velocidad, y pueda usarse para extraer la energía esperada en la próxima turbina. Por esto la necesidad de grandes espacios para parques de viento. Sin embargo, de toda el área de suelo de un parque de viento sólo se usa un 5%, que equivale al área donde está la base de cada molino. El resto del terreno puede tener múltiples usos, por ejemplo para agricultura, ganadería u otras actividades, como lo han demostrado diversos proyectos alrededor del mundo. Esto puede ser un punto a favor en el análisis económico, ya que el desarrollador puede alquilar el terreno para otras actividades, o pagar alquiler al dueño de un lugar que tenga buen recurso de viento. Otra alternativa de localización lo es el mar, en áreas de poca profundidad, cerca de las costas.

El costo de los proyectos de viento usualmente es calculado sin contabilizar créditos ambientales. En varios países existen incentivos que permiten a una compañía obtener créditos ambientales en otros lugares del mundo por desarrollos de energía renovable en ese país. Existen otros incentivos que los gobiernos pueden ofrecer para fomentar una transición hacia fuentes de energía menos contaminantes que las actuales. Varios países de la Unión Europea están a la vanguardia en esta área, pero la misma conlleva una voluntad política que no es común ni en Estados Unidos ni en Puerto Rico. Es aquí donde hace falta que la ciudadanía sea educada en la importancia de estas nuevas tecnologías para el futuro del ambiente y el clima a nivel regional y global.

A pesar de no contabilizar el valor de la no contaminación nuestro análisis económico demuestra que en Puerto Rico es económicamente viable producir electricidad usando energía eólica a un precio competitivo que fluctúa, dependiendo de múltiples factores, entre \$0.0544/kWh y \$0.0837/kWh.

B. Construcción de un Parque de Viento

La identificación preliminar de un lugar para la construcción se hace de acuerdo a indicadores de viento (ej. el estado de la vegetación) y otros como la existencia de un lugar cercano para la conexión con el sistema eléctrico. Luego se proceden a hacerse medidas de viento. Estas ayudan a generar una base de datos en cuanto a la velocidad, turbulencia y dirección prevaleciente del viento. Estos datos son usados en el estudio necesario para obtener el financiamiento para la construcción.

Una vez obtenido el financiamiento, se comienza con la preparación del terreno. Una turbina de viento que genere por ejemplo 2 MW, pesa decenas de toneladas, por lo que requiere una base de hasta 80 metros cúbicos (m³) de concreto, enclavada alrededor de 30 pies de profundidad. Otra importante consideración en la construcción de un parque de viento lo son las carreteras de acceso al lugar. Cada turbina está sujeta por una torre que tiene entre 200 y 300 pies de largo. Por otro lado, las aspas del molino pueden ser de cerca de 200 pies de diámetro. La transportación de estos componentes, además de requerir vehículos especiales, requiere carreteras anchas y sin obstrucciones. En términos de interconexión, las líneas eléctricas van por debajo de la tierra, desde el molino hasta llegar a una subestación, donde será el punto de unión con el sistema eléctrico.

De la pasada descripción se desprende que existen impactos al ambiente durante la construcción de los parques de viento. El tráfico pesado puede ocasionar daño a las carreteras locales, además de daño a la vegetación del área, y ruido. A pesar de que existen maneras de mitigar tales impactos, lo cierto es que por ejemplo, puede resultar difícil reestablecer la vegetación original del área. Estas son realidades con las que el desarrollador y la comunidad circundante deben trabajar. Otros asuntos sociales, en particular el impacto ambiental de la operación de generación con viento, se discute adelante.

C. Consideraciones Sociales

En el desarrollo de proyectos de viento es importante la participación y el diálogo continuo con la comunidad durante todas las fases del proyecto. Es importante entender que, a pesar de que la generación con viento no produce emisiones al ambiente, no se deben minimizar las preocupaciones de la comunidad en términos de impacto visual, impacto ambiental en la flora y fauna, ruido entre otros. Hay que establecer un balance entre la imposición del proyecto, atado a controversias que se conocen en inglés como LULU's ("locally unwanted land uses") y la total oposición al mismo (en inglés NIMBY - "not in my back yard"). Estas preocupaciones se deben atender mediante actividades para educar a la comunidad sobre la generación eólica y mediante encuestas para conocer la opinión y sugerencias de la comunidad ante el proyecto. Se pueden además ofrecer incentivos justos a la comunidad afectada, que tomen en cuenta los bienes ambientales (beneficios obtenidos) y los males ambientales (costos pagados).

Una de las áreas de mayor preocupación lo es el choque de aves con las turbinas. Existe evidencia del "U.S. Fish and Wildlife Service" que muestra que actualmente las aves chocan con: ventanas de vidrio de los edificios, torres de comunicación, líneas de transmisión y automóviles. La evidencia de estudios realizados muestra que la mortandad de aves a causa de turbinas ha sido de 1 a 2 al año. Un estudio en Dinamarca con una turbina de 2 MW, con aspas de cerca 200 pies de diámetro muestra que las aves cambian la dirección de vuelo de 100 a 200 metros antes de la turbina (día y noche). Sin embargo, se deben hacer esfuerzos para minimizar posibles choques con aves, por ejemplo considerar si existen especies de aves en peligro de

extinción en el área del proyecto, o si el proyecto está en la ruta migratoria de aves. Para esto, el desarrollador debe usar como herramienta un mapa de recurso de viento que incluya especies protegidas.

Otra preocupación lo es el ruido de los molinos cuando están operando. El ruido es un sonido desagradable, inesperado, indeseable o perturbador que podría afectar psicológicamente o físicamente al ser humano. La diferencia entre el sonido y el ruido depende del oyente y las circunstancias. El impacto del ruido depende de: la sensibilidad del uso de los terrenos limítrofes, el ruido de fondo existente, la topografía, y la velocidad y dirección del viento. Las fuentes potenciales de ruido en una turbina son el ruido mecánico y el ruido aerodinámico. Ha habido avances en el diseño de las turbinas que han reducido el ruido producido por las mismas. El ruido mecánico prácticamente ha desaparecido en las turbinas modernas con el uso de juntas y uniones elásticamente amortiguadas en los principales componentes de la cubierta. Esto crea un aislamiento acústico para el generador. También se ha reducido con el uso de componentes básicos, transmisiones, con engranajes “suaves” (ruedas dentadas con superficies endurecidas e interiores relativamente elásticos). El ruido aerodinámico, es decir, el sonido “silbante” de las palas o aspas al pasar por la torre, se produce principalmente en las puntas y en la parte posterior de las palas. A mayor velocidad de giro, mayor es el sonido producido. El ruido aerodinámico ha disminuido drásticamente en los últimos diez años, debido a un mejor diseño de las palas (particularmente en las puntas de pala y en las caras posteriores). Para proteger a los residentes se requiere que las propuestas para instalar turbinas de viento cumplan con estrictos estándares de ruido.

D. Aplicación en Puerto Rico

Un análisis de los estudios de recursos de viento en Puerto Rico y la disponibilidad de terreno muestra que el mayor potencial de generación eólica se encuentra en el noreste, este y sureste de Puerto Rico, con Culebra y Vieques encabezando la lista de los mejores lugares. Estos lugares se encuentran eléctricamente cerca de los centros de carga justificando la evaluación de los mismos como alternativas. Parques de viento que utilicen turbinas de unos 750 kW de capacidad podrían resultar costo-efectivas para Puerto Rico. Capacidades menores de 750 kW no resultan costo-efectivas pues no producen suficiente electricidad para justificar el costo de la tierra (separación necesaria entre turbinas para minimizar turbulencia), permisos e infraestructura necesarias. Capacidades mayores son de dudosa efectividad pues la distribución de velocidad de viento en Puerto Rico no necesariamente es suficiente para obtener un nivel óptimo de generación y recuperar en tiempo razonable la inversión en una turbina mucho más grande y costosa.

Analizado su potencial en Puerto Rico utilizando tecnología actual, uno de los mayores retos lo es la localización de las turbinas. Dada la competencia de los sectores residenciales, comerciales e industriales por el terreno, los proyectos pudieran ser realizados en el mar, cerca de las costas. Esta es una práctica común en Europa. Considerando que Puerto Rico tiene aproximadamente 260 millas de costa el potencial de instalaciones sería impresionante. Aún si sólo se considerara las costas noreste, este y sureste, las cuales tienen un buen recurso de viento, el impacto sería considerable. Existen diversas iniciativas privadas en Puerto Rico para generación eólica a gran escala que se encuentran en diferentes etapas de desarrollo.

La Universidad de Puerto Rico-Mayagüez (UPRM) dirige diversas iniciativas de investigación en el área de generación eólica. En unión con la Oficina de Asuntos de Energía y la Autoridad de Energía Eléctrica, investigadores y estudiantes de UPRM están evaluando lugares

en Puerto Rico que pudieran usarse para construir parques de viento y donde sea viable la construcción y operación de los mismos. El objetivo principal es aumentar el conocimiento sobre recursos de viento en Puerto Rico. Los criterios de selección son la disponibilidad del terreno, accesos por carretera al lugar, la disponibilidad de conexiones eléctricas cercanas, regulaciones de la zona, e indicadores como datos de viento existentes, topografía, vegetación deformada por el viento y otra evidencia de impacto del viento en el terreno. Se usan bases de datos geográficos, fotos de satélite e inspecciones visuales de los lugares para confirmar o descartar su potencial. Todo este proceso es documentado e informado a las agencias. La selección de posibles lugares no debe basarse sólo en la conveniencia para tomar medidas de viento tales como en estaciones de medida de viento existentes. Muchos de los proyectos en el pasado se limitaban a lugares donde los datos de viento eran fáciles de obtener: aeropuertos o facilidades del gobierno. Estos son lugares que están en uso y no pueden usarse para generación eólica. Por ejemplo en los aeropuertos, donde se mide el viento actualmente, no es posible levantar ni un solo molino de 200 pies de alto.

Otro proyecto en la UPRM es el estudio del impacto ambiental de la generación eólica en Puerto Rico. En específico se consideran el impacto visual (estética), el impacto en las aves y murciélagos, y el ruido. Existe una colaboración con el Departamento de Recursos Naturales para crear mapas de lugares potenciales de generación eólica en zonas donde no haya especies en peligro o protegidas. Este proyecto también tiene la colaboración del Centro de Investigación Social Aplicada (CISA) de la UPRM para desarrollar encuestas sobre el tema. En cuanto a ruido, se trabaja en la identificación de normas y reglamentos de la Junta Calidad Ambiental y la “Environmental Protection Agency” (EPA), y en la correlación con turbinas adecuadas para potenciales lugares de generación eólica. También hay un proyecto en la UPRM para identificar normas y reglamentos de la “Federal Communications Commission” (FCC) y correlacionar las mismas con las opciones de turbinas existentes. Este último trabajo es mayormente educativo pues la interferencia de turbinas modernas es mínima.

En términos financieros, se realiza en la UPRM una evaluación económica del desarrollo de parques de viento en la costa este de Puerto Rico. En especial se trabaja con la incertidumbre del problema usando el método de valor presente (“present worth”) haciendo análisis de sensibilidad para los parámetros inciertos. Además, se realizan simulaciones de Monte Carlo para evaluar el riesgo financiero del proyecto. Un reto del proyecto lo es la falta de un marco económico-legal para el desarrollo de parques de viento, un proceso para obtener permisos no definido y la no existencia de acuerdos de venta de energía. En otro proyecto, investigadores y estudiantes estudian el valor económico de la contaminación causada por la generación de electricidad usando combustibles fósiles. Es difícil cuantificar el costo asociado a daño ambiental debido a generación de electricidad usando combustibles fósiles. Este proyecto busca identificar los factores que contribuyen a esta incertidumbre y desarrollar métodos para calcular este costo de contaminación. Este trabajo es necesario para hacer una comparación justa entre generación eólica y generación usando combustibles fósiles. En otro aspecto económico, se trabaja en la UPRM en identificar qué limitaciones existen en la infraestructura de Puerto Rico, y el posible impacto de proyectos de viento en cuanto a la capacidad de carga de puentes, ancho y largo máximo de transporte por carretera y facilidades en los puertos de la Isla. También se estudian las posibilidades de generación eólica en el mar.

E. Energía Solar

Esta sección enfatizó el uso del recurso de viento como una alternativa para generación de energía eléctrica a gran escala, esto es, parques de vientos conectados al sistema de transmisión de Puerto Rico. Otro recurso renovable abundante en Puerto Rico lo es la energía solar. Sin embargo, dada la tecnología actual, la generación de electricidad a gran escala usando paneles solares se dificulta en Puerto Rico debido a que la pobre eficiencia de las celdas solares (menos de 20% en las celdas comerciales) hace que se necesite mucho espacio para lograr obtener una contribución significativa. Por ejemplo, se necesitaría un área seis veces mayor que el estado de Georgia para satisfacer la demanda mundial de energía esperada en los próximos cuarenta años. Otras barreras para el uso de esta tecnología para generación a gran escala son el costo, y la necesidad del uso de baterías u otro medio de almacenamiento. Esto sin embargo, no puede ser una excusa para no continuar investigando.

La producción de electricidad con celdas fotovoltaicas continuará mejorando a medida que ocurran grandes avances en el desarrollo de materiales. Una de las áreas de enfoque de la nanotecnología es el desarrollo de materiales incluyendo la producción, almacenamiento y distribución de energía. Esto pudiera ser un agente habilitador que haga de las celdas fotovoltaicas una alternativa más competitiva para generación a gran escala a considerar en Puerto Rico. Desde el punto de vista de aplicaciones a nivel residencial y comercial (voltajes mejores de 600 voltios), en iluminación, y en aplicaciones remotas (ejemplo, Isla de Mona) las aplicaciones fotovoltaicas son viables. Otro sector importante lo es el de la transportación, en especial vehículos pequeños en distancias menores de 100 millas. Por los pasados 10 años, han existido en la UPRM diversos proyectos de transportación usando energía solar. Otro ejemplo de mucha visibilidad en energía solar fue el proyecto conjunto de la UPR (Mayagüez y Río Piedras) de la Casa Solar.

V. La Economía de Hidrógeno

La historia en los últimos 200 años sugiere que es tiempo para un nuevo paradigma energético hoy, ya que los cambios significativos en el campo de la energía han ocurrido temprano en cada siglo: en las primeras décadas del siglo 19 el uso del vapor; en las primeras décadas del siglo 20 la electricidad; en las primeras décadas del siglo 21, ¿el Hidrógeno? Uno de los posibles escenarios energéticos futuros lo es la economía de hidrógeno (conocida en inglés como “hydrogen economy”). El hidrógeno no es una fuente primaria de energía, sino un medio, semejante a la energía eléctrica. La posible transición hacia una economía de hidrógeno sería un proceso escalonado o paulatino. Se comenzaría por ejemplo, con una transferencia de tecnologías de almacenaje y transporte de gas natural existentes hoy día. En esta etapa la producción del hidrógeno sería mayormente a partir de hidrocarburos. De esta forma se comenzaría el desarrollo de tecnologías de descarbonización.

Lo ideal sería llegar a producir hidrógeno a gran escala a partir de la electrólisis del agua. Sin embargo, los proponentes de esta alternativa están mirando hacia el agua como fuente de hidrógeno. El proceso futurista consiste en romper el agua en hidrógeno y oxígeno (electrólisis), almacenar el hidrógeno y luego reaccionarlo cuando hiciera falta para producir agua, electricidad y calor. En otras palabras el proceso sería semejante al de una batería en donde se almacena la energía para luego utilizarla a conveniencia del usuario y la aplicación. Pero lograr esto a gran escala requeriría cantidades de energía para lograr la electrólisis, que resultarían en pérdidas que no son sostenibles con la tecnología disponible hoy.

Una visión más realista del futuro sería el alcanzar una infraestructura de hidrógeno que hiciera uso de recursos renovables. De esta forma el hidrógeno sería una manera costo-efectiva

de almacenar por ejemplo, el exceso de energía eólica o solar que se genere en momentos en que la demanda de electricidad fuese baja. Otra visión futurista es la producción de hidrógeno utilizando recursos de biomasa renovable como materia prima. Varios investigadores se dedican a desarrollar procesos en esta área que incluyen catalizadores inorgánicos, catalizadores enzimáticos, conversión con plasma y otros.

El hidrógeno no sólo pudiera usarse para generar energía eléctrica en aplicaciones estacionarias. El Departamento de Energía y otras agencias federales y estatales están dando gran énfasis al uso de hidrógeno para vehículos. Compañías como Daimler-Chrysler, GM y Ford tienen programas billonarios de investigación y desarrollo en esta área. Esto haría necesario el repensar el concepto de estaciones de servicio para vehículos, una opción es el transporte de hidrógeno hasta las mismas, o generar hidrógeno *in situ* con energía solar por ejemplo.

En esta posible transición hacia el hidrógeno, las compañías eléctricas pudieran tener un rol importante, ya que el hidrógeno y electricidad son intercambiables. Las compañías eléctricas están en una buena posición de adelantar la transición al producir, distribuir y vender hidrógeno tanto a sectores de la transportación como al sector industrial. Por ejemplo, en Puerto Rico ya se cuenta con una planta de gas natural, y existen planes de una segunda en el Oeste. Esto pudiera permitir que durante este siglo, la Isla considerara la transición hacia el hidrógeno. Esto tiene ya precedentes importantes, en el caso del compromiso de California con el hidrógeno para la transportación, y las políticas de Hawaii, Islandia, y la Unión Europea con relación a la transición hacia la economía de hidrógeno y recursos renovables.

La idea de una economía de hidrógeno tiene sus oponentes y sus retos. Principalmente, todo cambio al *status quo* tiene resistencia por el mero hecho de ser un cambio. El uso del hidrógeno presenta un cambio fundamental en el paradigma de la industria de energía, industria que sin lugar a dudas es vital para el desarrollo económico de los países industrializados. El costo del cambio hacia hidrógeno está en el nivel de trillones de dólares en infraestructura. Por esto el énfasis en que la transición debe ser escalonada. Por otro lado, el hidrógeno tiene un problema de percepción que puede ser tan severo que ocasione un rechazo de parte del público. Las imágenes del Hindenburgh (el cual estudios han demostrado que no fue ocasionado por el hidrógeno) y la llamada bomba de hidrógeno son asuntos que requieren atención. El almacenaje seguro del hidrógeno, en especial en vehículos, es otro asunto importante que atender. Pero quizás la pregunta más importante que se hacen los oponentes, incluyendo académicos y profesionales del área es ¿hace sentido toda la inversión y el trabajo en hidrógeno? ¿No es todo esto un atraso a la transición a fuentes renovables? Tomando nuevamente lo mencionado en la sección anterior acerca de la energía solar, las barreras no pueden ser una excusa para no continuar investigando. El hidrógeno tiene un gran potencial para ser parte importante del portafolio de energía, como mínimo pudiera tener un nicho en el almacenaje de energía proveniente de recursos renovables. Sin embargo, es necesaria la educación y participación de la sociedad en este proceso, para evitar que asuntos de percepción y semántica cierren la puerta a una alternativa que es menos contaminante que los combustibles fósiles.

VI. Celdas Combustibles

Las celdas combustibles (mejor conocidas en inglés como “fuel cells”) están bien atadas al concepto de una economía basada en hidrógeno. Es en la celda combustible donde ocurre el proceso discutido en la sección anterior de almacenar hidrógeno y luego reaccionarlo cuando hiciera falta energía. Las celdas combustibles son reactores electroquímicos que convierten eficientemente energía química, proveniente de un combustible y de un oxidante, directamente a

energía eléctrica con menos emisiones que tecnologías existentes. La Administración Nacional Aeronáutica y del Espacio (NASA) viene usando esta tecnología desde la década de los 60 en sus misiones espaciales.

Las celdas combustibles comenzaron a ser una alternativa como fuente de generación de electricidad desde 1839, cuando William R. Grove demostró por primera vez que la electrólisis de agua era un proceso reversible. Estos dispositivos electroquímicos tienen unas ventajas definidas sobre procesos de combustión de fósiles a altas temperaturas: (i) alta eficiencia eléctrica (40-50%), (ii) bajas emisiones, (iii) operaciones silenciosas, (iv) partes internas no móviles y (v) la posibilidad de cogeneración representa un nuevo acercamiento tecnológico a una fuente confiable de energía renovable. En cogeneración, cuando se usa el calor que se produce, las eficiencias suben hasta 80%. Se está realizando investigación y desarrollo intensivo de esta tecnología en todo el mundo para convertir esta tecnología en sistemas que puedan competir con las tecnologías existentes como plantas de combustión de fósiles y los motores de combustión.

La producción de electricidad en las celdas combustibles hoy día se puede justificar en algunas aplicaciones. El problema primordial de esta tecnología es la falta de disponibilidad de hidrógeno como compuesto. Los compuestos con más hidrógeno son el agua y los combustibles como el petróleo, carbón, gas natural y biomasa. Se requiere un procesamiento de estos compuestos para obtener hidrógeno.

En la figura 4 se muestra una celda combustible simple que utiliza hidrógeno y oxígeno. Los componentes principales de la celda combustible son los electrodos, y el electrolito (sólido o líquido, parte 3 de la figura) para transportar iones entre los dos electrodos. Además, ésta tiene dos placas bipolares de grafito (parte 4 de la figura) que sirven como colectores de corriente y distribuidores de los reactivos al mismo tiempo. Esto se muestra en la figura 4 para el sistema simple de las celdas de hidrógeno y oxígeno. La operación de la celda combustible es en dirección contraria a la de electrólisis de agua. El hidrógeno y oxígeno gaseoso son usados electro-catalíticamente en la producción de agua y la electricidad.

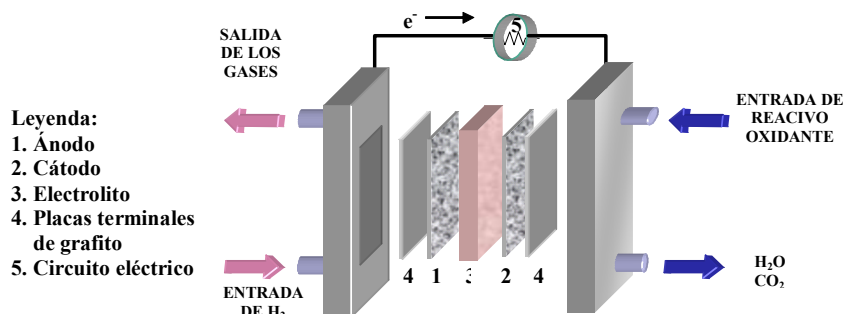


Figura 4: Componentes típicos de una celda combustible para un sistema H₂/O₂

A. Clasificación de las Celdas Combustibles

Las celdas combustibles se clasifican según el tipo de reactivo y electrolito usados. La temperatura de funcionamiento y la composición del electrodo son determinadas por estos parámetros. Otro criterio para la clasificación de las celdas combustibles es el modo en que se provee el combustible, puede ser alimentación directa o indirecta. Esto depende de si el hidrógeno se provee como un gas puro (directa) o si el hidrógeno se genera de un hidrocarburo reformado (indirecta). La celda combustible metanol directo, que utiliza el metanol directamente como agente reductor en el ánodo, es una de las celdas combustibles más desarrolladas de los

sistemas de alimentación directa. A continuación una descripción de los tipos de celdas más conocidos.

- Celdas combustible alcalinas (AFC) - Este sistema fue utilizado por la NASA durante la década del 60 y se han incorporado en la mayoría de las misiones realizadas en el espacio (Ej. Gemini y Apollo). En tiempos más recientemente se utilizaron cuatro módulos de celdas combustibles alcalinas de 15kW para proporcionar toda la electricidad del cohete Orbiter y las misiones con los transbordadores. Estos sistemas se utilizan mayormente para aplicaciones aerospaciales debido a que se necesita un equipo extenso y costoso para la remoción del dióxido de carbono para ambos flujos, el combustible y el oxidante.

- Celda combustible de ácido fosfórico (PAFC) - Estas son las celdas combustibles más desarrolladas tecnológicamente para aplicaciones terrestres. Están basadas en un electrolito inmovilizado y altamente concentrado de ácido fosfórico. Se pueden obtener eficiencias tan altas como de 85% en configuración de cogeneración. Son excelentes para construir y para aplicaciones de transporte pesado. Las celdas combustibles de ácido fosfórico fueron desarrolladas en los años 70. Estas pueden operar con gas natural, metanol, etanol o nafta reformados debido a su alta tolerancia al dióxido de carbono, hasta 2%, y están comercialmente disponibles desde 250 W hasta 11MW.

- Celdas combustibles de Carbonato Fundido (MCFC) - Estas celdas utilizan un electrolito de carbonato litio y carbonato de potasio. Esta operan alrededor de 650 °C, haciéndolas sistemas ideales para usos en combinación de ciclos. En altas temperaturas de operación, Ni (ánodo) y óxido de níquel (cátodo) son adecuados para promover la reacción y los metales nobles no son requeridos. Su eficiencia se acerca a un 60%, y cuando el calor de los gases de combustión es usado en una serie de cogeneraciones, la eficiencia total (termal + eléctrica) puede alcanzar un 85%.

- Celdas combustibles de óxido sólido (SOFC) - Estas celdas usan un óxido sólido como el electrolito. Por lo general utilizan un material cerámico de óxido de zirconio sólido y una pequeña cantidad de itria. Las temperaturas de funcionamiento están alrededor de 1000°C. A altas temperaturas la alimentación de oxígeno al cátodo es ionizado (O_2^-), y conducido al ánodo por medio del electrolito. Estas altas temperaturas eliminan el requisito del uso de metales nobles como catalizadores. Estas celdas son más tolerantes a las impurezas de los combustibles que las celdas combustibles de baja temperatura.

- Celdas combustible de membrana de intercambio protónico (PEMFC) - Este tipo de celda utiliza como electrolito una membrana de ácido perfluorosulfónico, Nafion™. El Nafion™ consiste en un Teflón™ “la espina dorsal” con cadenas de lado que terminan en grupos funcionales de ácido sulfónico de DuPont™. Estas membranas son ácidas y pueden tolerar CO₂, por ello estas pueden correr con hidrocarburos como metanol. Ya hay disponibles celdas comerciales con esta tecnología de la compañía Plug Power.

A modo de resumen y comparación, la Tabla 1 muestra los nombres y abreviaturas en inglés de las celdas combustibles utilizadas comúnmente. También se describen los parámetros dominantes de estos sistemas. Cabe mencionar que las eficiencias reportadas no incluyen beneficios de cogeneración conocido como “combined heat and power” (CHP) en inglés.

Tabla 1: Tipos de celdas combustibles y sus características

Celda combustible		Rangos de Temperatura	Eficiencia	Electrolito
Nombre	*Abreviatura	(°C)	(%)	
Alcalina	AFC	60 – 90	50 – 60	Solución acuosa de KOH (35–50%wt)
Acido fosfórico	PAFC	160 – 220	55 – 65	Ácido fosfórico concentrado
Carbonato fundido	MCFC	620 – 660	60 – 65	Carbonato fundido ($\text{Li}_2\text{CO}_3/\text{NaCO}_3$)
Oxido sólido	SOFC	800 – 1000	55 – 65	Cerámica sólida ($\text{ZrO}_2/\text{Y}_2\text{O}_3$)
Membrana de polímero	PEMFC	50 – 80	50 – 60	Polímero ácido orgánico poli-perfluorosulfónico

*Abreviaturas utilizadas por sus siglas en inglés

B. Aplicaciones en Puerto Rico

En términos de la implementación de esta tecnología en Puerto Rico, el enfoque debe ser el establecimiento de un programa agresivo de demostraciones, transferencia de conocimiento (“knowledge transfer”) y diseminación a los sectores residenciales, industriales y comerciales. Tal implementación se puede lograr mediante colaboraciones entre los sectores gubernamental, industrial, comercial y académico. Además, en conjunto con estos esfuerzos se debe apoyar y/o co-auspiciar investigación fundamental dirigida a esta y otras tecnologías relacionadas con miras a tener un peritaje de profundidad que permita desarrollos futuros de estos procesos. Cabe mencionar que varias compañías que desarrollan Fuel Cells tienen disponibles varias unidades las cuales pueden utilizarse en proyectos demostrativos incluyendo International Fuel Cells, Acumentrics y Plug Power. Un objetivo de estos proyectos sería demostrar la integración de procesos de generación de hidrógeno (conversión de biomasa, plasma) con las celdas combustibles. Áreas de investigación serían el desarrollo de procesos de almacenamiento y purificación de hidrógeno, integración de la energía en la red entre otros.

Las aplicaciones discutidas a continuación pudieran tener un nicho en Puerto Rico tomando en consideración circunstancias locales como las idiosincrasias culturales, sociales, políticas y el medio ambiente. Específicamente las oportunidades identificadas son:

- Vehículos “commuter”
- Generación de energía estacionaria (residencial)
- Generación de energía estacionaria (industrial y comercial)
- Remediación de vertederos

El concepto del vehículo “commuter” para Puerto Rico utilizando celdas combustibles fue propuesto por el Dr. David Serrano del Departamento de Ingeniería Mecánica de UPRM. Este vehículo de naturaleza híbrida (ej., solar + celdas combustibles) sería ideal para el área

metropolitana dado su alta poblacional y constante congestión vehicular. Pueden complementar el Tren Urbano.

Otra área con mucho potencial es la generación de energía estacionaria en residencias. Como mencionamos anteriormente ya existen unidades “comerciales” utilizando PEMs y gas natural como combustible. Varias compañías están desarrollando estos sistemas con otros combustibles. En Puerto Rico lo “innovador” sería utilizar el calor de exceso de la celda como fuente energética para unidades de aire acondicionado. Sería equivalente a un aire acondicionado solar sin los paneles solares. En estudios preliminares en UPRM efectuados por los Drs. Jorge González y José Colucci, se encontró que las cargas térmicas y eléctricas de las residencias en Puerto Rico son afines con las cargas térmicas y de potencia de las celdas combustibles. El reto sería optimizar la integración de una unidad PEM al absorbedor. Esa integración ya es posible con celdas de ácido fosfórico dado sus temperaturas de operación más altas. El desarrollo de membranas que operen a temperaturas más altas y/o absorbedores más eficientes son áreas de investigación que deben considerarse.

La tercera aplicación, generación de energía estacionaria en comercios e industrias, es muy parecida a la segunda excepto que las celdas combustibles sugeridas serían las de carbonato fundido y óxidos sólidos. Como se mencionó anteriormente estas operan a temperaturas mucho más altas que la PEM y PAFC por ende serían más afines a aplicaciones industriales de cogeneración.

Por último y no menos importante la remediación de vertederos también se debe considerar seriamente. Ya existen varios proyectos demostrativos en los Estados Unidos continentales, como en Connecticut, en donde el metano generado en vertederos se utiliza para generar 200 kW de energía eléctrica. El sistema se conecta a la red eléctrica y provee suficiente electricidad para 100 viviendas. Las celdas combustibles originales de esta aplicación fueron las de ácido fosfórico. En los últimos años se ha considerado el desarrollo de celdas de carbonato fundido para esta aplicación. En Puerto Rico se estima que esta aplicación en total puede generar entre 50 y 100 MW por aproximadamente 10 años con la carga existente de los vertederos. De no implementarse alguna alternativa de conversión de desperdicios se extendería el potencial de generación a esos mismos niveles. Cabe mencionar que de poder recuperar el calor de esas celdas representaría unos 50 a 100 MW. Al igual que las opciones de generación estacionaria, la selección de la celda combustible dependería de posibles usos del calor. Las celdas de carbonato fundido y óxidos sólidos tendrían preferencia para los vertederos que se encuentren cercanos a una zona industrial.

C. Proyectos en Puerto Rico

Para obtener la experiencia necesaria para el manejo y desarrollo adecuado de las fuentes de energía futuras, la Universidad de Puerto Rico (UPR) está conduciendo un programa de investigación en celdas combustibles. Actualmente en los recintos de Río Piedras y Mayagüez de la UPR existen programas agresivos de investigación en celdas combustibles. También se han aprobado varias propuestas para nuevos proyectos de investigación.

En el Departamento de Ingeniería Química de UPRM, se está realizando investigación dirigida a los componentes operacionales y la producción de los combustibles, especialmente hidrógeno, para las celdas combustibles. Esto es importante para el desarrollo de un programa a gran escala de celdas combustibles y tener personal experto en esta tecnología en Puerto Rico. Se está investigando la celda combustible de electrolito de membrana de polímero (PEMFC). La celda combustible PEM está bajo investigación en varios laboratorios nacionales, NASA, y

compañías privadas para aplicaciones prometedoras en la transportación y generación de potencia. En estos estudios las áreas claves son el mejoramiento de la cinética del electrodo de oxidación, la humidificación y propiedades físicas, químicas de la membrana. El Departamento de Energía ha identificado estas áreas de estudios como parámetros críticos para el éxito de esta tecnología en aplicaciones de transportación.

También se están haciendo investigaciones para la producción del combustible principal de la PEMFC, hidrógeno. La reformación autotermal (producción de hidrógeno) de combustibles líquidos ha demostrado ser viable para aplicaciones en los vehículos que utilizarán celdas de combustible. Uno de los problemas que tienen los sistemas de reformación, es la formación o acumulación de carbono en la superficie del catalizador. La razón de acumulación de carbono, depende de la estructura del catalizador (su porosidad, sus características ácidas), la temperatura de reacción y la naturaleza de los reactivos. La Universidad de Puerto Rico, en colaboración con el Laboratorio Nacional Argonne (ANL, por sus siglas en inglés) está desarrollando e implementando un programa de caracterización de los catalizadores capaces de reformar. Se espera que el estudio son establezca la viabilidad de nuevos catalizadores. Además, se están haciendo corridas preliminares utilizando biodiesel como combustible con otro tipo de catalizador sintetizado también por ANL.

En el Recinto de Río Piedras, en los últimos diez años también han estado trabajando en estudios fundamentales de celdas combustibles mayormente en las áreas de desarrollo y caracterización de electrodos. Muchas de estas investigaciones fueron en colaboración con UPRM. Los estudios incluyeron ánodos y cátodos utilizando hidrógeno y oxígeno, respectivamente, al igual que cátodos para la celda combustible de metanol directo. Como parte de este esfuerzo se comenzó en el 2003 un Centro de Nanoescala liderado por el Dr. Carlos Cabrera del Departamento de Química. Uno de las áreas primordiales del Centro son celdas combustibles. Específicamente, el Centro para Materiales a Nanoescala fue creado con una propuesta millonaria de cinco años la cual fue aprobada y financiada por NASA. El Centro cuenta con diez profesores de los departamentos de Física y Química. Los tres temas científicos que se están desarrollando incluyen la producción de materiales a nanoescala para (1) almacenamiento de energía, (2) pantallas planas, y (3) celdas combustibles ("Fuel Cells"). Cada una de estas áreas están lideradas por profesores que tiene un alto nivel de "expertise".

A través del centro se estarán educando estudiantes graduados y subgraduados en el área de Nanotecnología. Además, se desarrollarán talleres en Nanotecnología para estudiantes y maestros de escuelas superiores de Puerto Rico durante los veranos. El Centro está creando una "Facilidad de Nanoscopia" para poder visualizar los materiales a nanoescala con microscopios electrónicos de alta resolución espacial. Esta será la primera facilidad de esta naturaleza en Puerto Rico. La inauguración de esta facilidad fue en el verano del 2004. El Centro desarrollará colaboraciones con Centros de la NASA en Estados Unidos y con compañías de alta tecnología en Puerto Rico.

VI. Alternativa de Combustible para la Transportación

La transportación en Puerto Rico depende casi exclusivamente de gasolina o diesel. Como uno de los países con más autos por persona, el impacto ambiental del sector de la transportación es considerable. Esta sección presenta el biodiesel como una alternativa a esa dependencia a la gasolina.

El biodiesel es un combustible alterno producido a partir de recursos renovables tales como aceites vegetales, grasa animal, y de aceites de cocinar reciclados. En otras palabras se

puede reciclar gran parte del aceite y las grasas que se dispone en los restaurantes de comidas rápidas y otros, para la utilización del mismo. Esto sería equivalente a reducir de 3 a 5 días la carga a los vertederos en Puerto Rico. Químicamente, el biodiesel se define como los ésteres mono-alkilados de ácidos grasos de cadena larga derivados de fuentes de lípidos renovables. El biodiesel es típicamente producido por medio de la reacción de un aceite vegetal o grasa animal con metanol o etanol en la presencia de un agente catalítico. La industria y tecnología del biodiesel se encuentra en su infancia pero está creciendo con rapidez asombrosa. Según lo implica su nombre, el biodiesel es como el combustible “diesel” excepto que es producido orgánicamente. Este es también seguro para el ambiente, biodegradable y no-tóxico.

El biodiesel disminuye las emisiones (excepto los NO_x) durante la combustión incluyendo particulados, hidrocarburos, monóxido de carbono y otros. Inclusive el olor característico del diesel se elimina. De hecho a altas concentraciones se percibe un olor característico a frituras. Otro beneficio es que se reduce el “knock” característico del diesel debido al alto número de cetano del biodiesel versus el diesel. El biodiesel puro puede reducir los riesgos de cáncer (del combustible diesel) por un 94%. Como el biodiesel se produce a partir de aceite de cocinar y alcohol, éste se degrada rápidamente a residuos orgánicos naturales. Por último y no menos importante es que debido a que es menos flamable que el diesel, su manejo y almacenaje es menos peligroso que el diesel. Cabe mencionar que el biodiesel puro (sin mezclar con diesel) esta catalogado como comestible por el Food and Drug Administration (FDA), y es equivalente al aceite de castor.

Durante la producción de biodiesel se reaccionan 10 libras de aceite vegetal o grasas animales con 1 libra de alcohol para producir 10 libras de aceite y 1 libra de glicerina. El producto secundario glicerina o glicerol se utiliza en humectantes y en jabones. En Puerto Rico hay varias compañías que utilizan este producto.

El biodiesel mezcla muy bien con el combustible diesel y continúa combinado aún en la presencia de agua. De hecho el biodiesel se puede utilizar puro el cual se conoce como B100. En mezclas con el diesel se usa en concentraciones de biodiesel de 2 y 20% conocidas como B2 y B20, respectivamente. Las combinaciones de combustible diesel con biodiesel tienen mejor capacidad de lubricación, lo que reduce el desgaste en los motores y hace que los componentes de estos duren más tiempo. Estas combinaciones también limpian el sistema del combustible. Debido al bajo contenido de azufre (< 30 partes por millón) en el biodiesel, éste disminuye considerablemente las emisiones de óxidos de azufre ni envenena (inutiliza) los agentes catalíticos en los sistemas de escape. Una región que puede beneficiarse tremendamente de la disponibilidad de biodiesel es el Caribe, donde casi el 100% del combustible utilizado es importado.

Los retos que enfrenta esta opción para la transportación son mayormente económicos. Su costo está por encima del costo del diesel regular, por lo que se necesitan incentivos u otros mecanismos para alentar la participación de inversionistas que ayuden a levantar esta industria. Una vez la industria esté operando localmente, los costos se reducirían haciendo del biodiesel una alternativa competitiva. Esto se alcanzará eventualmente, a medida que el costo del petróleo siga aumentando al acercarnos al pico de la producción del crudo de bajo costo. En Puerto Rico, UPRM ha sido líder en fomentar el uso de este combustible, y ha habido proyectos demostrativos en varios municipios y compañías alrededor de la Isla. El potencial impacto del biodiesel puede alcanzar aplicaciones estacionarias, como generadores de emergencia. Temprano en el 2004, UPRM logró un acuerdo con la Autoridad de Energía Eléctrica (AEE) para realizar pruebas en uno de sus generadores con biodiesel, lo que hubiera sido un evento importante a nivel de toda

América. Pero el financiamiento no se logró, lo que ilustra la importancia y la necesidad de un mayor involucramiento de parte del gobierno en fomentar pruebas y proyectos que adelanten la causa ambiental al demostrar que es posible reducir las emisiones al generar electricidad.

VII. Consideraciones y Barreras Para la Integración y el Uso de Nuevas Tecnologías

Los sistemas de energía se encuentran en un momento histórico, donde las decisiones de hoy tienen repercusiones en las próximas 4 ó 5 décadas. Existen diversos factores que apoyan un cambio en la industria de la energía. Algunos de éstos son los retos en la búsqueda de nuevas fuentes energéticas, las necesidades de diversos sectores industriales, la creación de nuevas políticas energéticas en diferentes partes del Mundo y cambios en diversas tecnologías asociadas a energía. Una motivación importante lo es la conciencia global que se está tomando con el tema energético, como lo evidencian los grupos de trabajo de la ONU y la firma de convenios internacionales tales como el Protocolo de Kyoto de 1997. Muchos gobiernos ya están considerando en sus agendas de planificación, los costos ambientales de las diversas tecnologías de conversión de energía. No obstante, existen barreras o retos en las áreas políticas, sociales, económicas y tecnológicas con las que hay que lidiar en este proceso de cambio. En cuanto a energía eléctrica, que ha sido el foco mayor en este artículo, toma mucha importancia la política energética que exista, o la falta de ella, en el proceso de decidir el rumbo a seguir en los próximos años.

A. Política Energética

La vida útil de la infraestructura de sistemas de energía eléctrica es cerca de 40 años, en el caso de los generadores. O sea que las decisiones tomadas y las inversiones hechas hoy, son para la tecnología de conversión, transmisión y uso de energía de las próximas 4 décadas. Existen retos operacionales en los sistemas de energía eléctrica que son importantes y han causado interrupciones graves del servicio en EEUU, Brazil y Europa en el pasado año 2003. Hace 30 años la infraestructura eléctrica en los países industrializados, en especial los generadores que usan combustibles fósiles y las líneas de transmisión, proveía suficiente energía eléctrica y capacidad para llevarla a donde era necesaria. Aumentos sostenidos en la demanda de energía, reducción en la construcción de plantas de generación y nuevas líneas, y regulaciones ambientales más estrictas han provocado que los sistemas de energía eléctrica se operen hoy a su máxima capacidad. Esto provoca que la confiabilidad de los sistemas se haya reducido dramáticamente, provocando que eventos en el sistema que antes hubieran sido menores, generen fallas en cascada o en efecto de domino que culminen en grandes apagones. Muchos expertos vaticinan que eventos como el de agosto de 2003 en el Noreste de los EEUU son sólo un ejemplo de otros eventos mayores que tendrán un impacto adverso en la economía de los países industrializados.

El uso de recursos renovables para la generación de energía eléctrica pudiera, a corto plazo aliviar estos retos operacionales de los sistemas de potencia eléctrica. Esto pudiera ser un paso intermedio para lograr, a largo plazo, la transición hacia recursos renovables en sustitución de la dependencia de derivados de combustibles fósiles. Como se discutió en la sección I, la década de los 70 trajo consigo legislación y apoyo importante a las fuentes renovables de energía. En EEUU se aprobó en 1978 el “Public Utility Regulatory Policy Act” (PURPA), una ley federal que promueve entre otras cosas, el uso de fuentes de energía diferentes al petróleo. PURPA obliga a las compañías eléctricas a comprar la energía eléctrica de productores independientes de

potencia (IPP por sus siglas en inglés) si estas compañías producen potencia a un costo menor que el costo de generación de las compañías eléctricas, a esto se le conoce como “costo evitado.”

Los IPP deben ser cogeneradores, es decir, además de energía eléctrica deben producir vapor, agua u otro recurso. La generación privada no tiene que basarse en recursos renovables, pero PURPA provee un mecanismo para que desarrolladores de proyectos renovables puedan vender la energía producida. Los IPP se conectan a la red de una compañía eléctrica, pero es la compañía eléctrica la que transmite y vende la energía eléctrica a los usuarios. PURPA aplica en Puerto Rico, donde tenemos dos IPP, Ecoeléctrica que usa gas natural, y AES que usa carbón. Estos IPP permitieron que en Puerto Rico se redujera la dependencia casi total de petróleo para la generación que había en la Isla. Es importante notar que la Autoridad de Energía Eléctrica (AEE) está obligada por la ley PURPA a comprar la energía de estas compañías privadas, si éstas cumplen con la regla del costo evitado. Previo a la construcción de las plantas privadas, existe un proceso de negociación del cual surge un contrato o acuerdo para la venta de energía de los IPP a la compañía eléctrica. Este documento es vital en el financiamiento de los proyectos como se discutiera en la sección IV-A, y su negociación es uno de los puntos que trae mayor controversia, en especial el cómputo del costo evitado.

PURPA ha sido una medida efectiva para promover la diversificación de fuentes de generación, en EEUU y Puerto Rico. Sin embargo los desarrolladores privados para proyectos de energía renovable tienen la limitación de que el costo evitado muchas veces no es suficiente ingreso para justificar la inversión del proyecto. Sería más atractivo económicamente si los IPP pudieran vender directamente a los usuarios la energía generada. En el 1992 el Congreso aprobó el “Energy Policy Act” (EPAct), que permite entre otras cosas, acceso al sistema de transmisión y distribución a los IPP. EPAct fue el inicio en EEUU del proceso de re-estructuración y de-regulación de los sistemas de energía eléctrica. El pensamiento es que al igual que los usuarios pueden elegir por ejemplo, su compañía de comunicaciones de larga distancia, también deberían elegir su compañía de generación de energía eléctrica. Los sistemas de transmisión y distribución, al igual que el mantenimiento de esa infraestructura, y la conexión a los usuarios sigue en manos de las compañías tradicionales. Sólo la generación es privatizada. Es decir, los IPP usan el sistema de transmisión como el medio para llevar la energía a sus clientes. Este modo de operación se conoce como “wheeling”, y los IPP deben pagar a los dueños del sistema de transmisión por el uso de la infraestructura. En los pasados días, el Congreso aprobó legislación que elimina o modifica disposiciones de PURPA. En la UPR-Mayagüez estamos analizando el impacto que tendrá esta legislación en la Isla.

La de-regulación de la industria de energía eléctrica se inició en Europa para los años 80, principios de los 90, con resultados mixtos. En EEUU se dejó en manos de cada estado decidir cómo implementar la de-regulación, por lo que también los resultados han sido mixtos. La razón es que los sistemas de potencia, a diferencia de los sistemas de comunicaciones, dependen mucho de condiciones geográficas y de infraestructura, por lo que se presumió que cada estado tenía el peritaje y conocimiento necesario de sus sistemas locales para considerar sus particulares necesidades y limitaciones. Otra importante diferencia entre los sistemas de comunicaciones y los de energía eléctrica es que los primeros trabajan con la transmisión de información (pequeñas cantidades de energía), mientras los últimos transmiten grandes cantidades de energía. La información viaja a diferentes puntos, y puede almacenarse por espacios de tiempo variable, mientras que la energía eléctrica cuando se genera, debe usarse al momento pues los métodos de almacenamiento son muy escasos y a la vez costosos. Por estas particularidades, se le delegó a los estados implementar las disposiciones de EPAct.

En los estados del este de EEUU, la deregulación fue paulatina, e implementada con relativo éxito. Sin embargo, en California la deregulación probó ser un desastre, no por el proceso de deregulación, sino por la forma en que se implementó y por el contexto en el que se implementó. Las compañías con sede en California se vieron obligadas por ley a vender sus plantas de generación a compañías privadas, y las leyes estatales les pusieron muchas restricciones y pocas garantías. Además, las posturas de NIMBY (“not in my backyard”) impidieron la construcción de nuevas plantas y líneas de transmisión por mucho tiempo. Para complicar aún más la situación, las compañías habían reducido personal de áreas clave como planificación, que provocaron errores como el subestimar el aumento esperado en demanda de energía. Para agravar la situación, la avaricia y la operación con poca supervisión de gigantes de la industria de energía como Enron, crearon modos de operación en los sistemas de energía donde se congestionaron las líneas que llevaban electricidad desde otros estados hasta California. Todos estos ingredientes, junto a una ola de intenso calor durante los veranos de 2000 y 2001, hicieron que en California no hubiese energía eléctrica periódicamente, y se establecieron apagones selectivos (“rolling blackouts”) en el estado que es la quinta economía más grande del Mundo. La deregulación en sí no fue el factor determinante, pero fue la que cargó con la culpa en los ojos de la sociedad. El proceso de deregulación se detuvo en algunos estados, pero en otros se ha creado un mercado de transacciones de energía, donde se establecen precios y contratos de compraventa de energía eléctrica.

Por ley, en Puerto Rico la AEE es la única entidad autorizada a vender energía eléctrica directamente a los usuarios. Esta es una de las razones, no la única, por las que la legislatura ha asumido la posición de no considerar la deregulación, aunque no parecen haber estudios locales que apoyen una posición u otra en este tema. Lo cierto es que el sistema de Puerto Rico, al ser una isla, no tiene conexiones externas que suplan energía en caso de emergencias. Esto hace necesario que el gobierno sea muy cauteloso en la manera de operación del sistema eléctrico local. Un evento en un extremo de la Isla pudiera tener repercusiones en el otro extremo, por más lejano que esté. Permitir el uso de la infraestructura de la AEE a generadores privados requiere de estudios formales que ilustren el impacto, positivo o negativo de tal acción. A la fecha tales estudios no se han realizado o no son de conocimiento público. Otro importante asunto de política energética local lo es la escasa colaboración que existe entre la AEE y la Administración de Asuntos de Energía (AAE), conocida hace años como la Oficina de Energía. La AAE es la agencia concernida con los asuntos energéticos de Puerto Rico, la AEE es la mayor productora de energía eléctrica en la Isla. La Isla se beneficiaría de una mejor colaboración entre la AAE y la AEE. La AAE tiene acceso a diversos programas federales del Departamento de Energía, que pudieran ser de mucho beneficio para Puerto Rico. Sin embargo, a pesar de algunos avances en los últimos años en la AAE, al estar adscrita al Departamento de Recursos Naturales y Ambientales (DRNA), carece de facultades para lograr un impacto mayor en la política energética de Puerto Rico. Esto empeoraría si finalmente se degrada aún más la AAE a ser un simple programa dentro del DRNA. La energía eléctrica fue el motor del desarrollo tecnológico del mundo en el siglo XX, y es vital para toda economía. Dejar este sector sin regular, como parece ser el caso en PR con los pocos poderes que tiene la AAE y su virtual eliminación, es un grave error.

Una alternativa a la deregulación a gran escala, lo es permitir que industrias, comercios y hasta residencias generen su propia energía eléctrica y su excedente sea vendido a la compañía eléctrica. Este esquema, conocido como “net metering,” ya ha sido implementado en varios estados de EEUU, a varios niveles, incluso aún a nivel residencial. Se necesitan mayores

incentivos del gobierno para motivar a la ciudadanía a realizar esta inversión. Ahora mismo sólo existe una deducción de \$500 en las planillas, que resulta risible considerando que, por ejemplo, el costo de un sistema solar residencial fluctúa entre \$10,000 y \$15,000. Este esquema diferente de operación pudiera ayudar a integrar mejor las fuentes de energía renovable al sistema eléctrico, y es complementario a la generación distribuida.

B. Generación Distribuida

Por muchos años los sistemas de potencia tuvieron una estructura centralizada donde una sola compañía controlaba la generación, transmisión y distribución en un área dada. Esa estructura ha cambiado, primero por PURPA y luego por los mercados de transacciones de energía. Sin embargo existen problemas técnicos que no han sido resueltos del todo en estos nuevos esquemas de operación, y hay temor que ocurra un colapso de un sistema de transmisión que ya está congestionado.

La generación distribuida (GD) representa una posible solución a este problema del sistema de transmisión. Localizar generadores de hasta 10 MVA cerca de las cargas reduciría parte de la congestión en las líneas de transmisión, devolviendo los márgenes de estabilidad a su rango normal y asegurando la confiabilidad del sistema. Otros beneficios de GD incluyen mejorar la calidad de potencia, atender los picos en la demanda, menor impacto ambiental y menor costo operacional en comparación con generación tradicional. Fuentes no-tradicionales de generación como celdas combustibles, energía eólica y sistemas fotovoltaicos (PV) son tecnologías con gran potencial de crecimiento en GD. Otros nombres dados a este tipo de generación incluyen recursos distribuidos, recursos energéticos distribuidos y generación dispersa. Es interesante que la idea de GD lleva a la industria de energía eléctrica de regreso a sus orígenes en la Estación de Edison en la calle Pearl en Nueva York, el primer generador distribuido de la historia. Es importante notar que la GD no es deregulación. La GD se beneficiaría de la deregulación, pero pueden existir GD en un mercado regulado. Además la GD puede ser un paso intermedio en la transición hacia fuentes renovables de energía.

GD aumenta la complejidad en el control y protección de los sistemas de distribución. Para cada fuente de GD, los dispositivos de protección deben ser ajustados para tomar en cuenta la posibilidad de flujo bidireccional de potencia. Determinar la mejor localización de GD es también un reto ya que se busca maximizar el beneficio de GD sin afectar el sistema. Estos problemas pueden atenderse si existiera un estándar de interconexión con el sistema que sirva de guía para GD. La dificultad de lograr este estándar reside en que cada estado, y a veces cada compañía eléctrica, tiene sus propios requisitos de interconexión. Existen esfuerzos para lograr la estandarización de la interconexión que brindaría uniformidad a GD. Se necesitan establecer las pruebas a realizar para interconexión, y también se requiere un proceso de validación de estas pruebas. Ya existen estándares para el interfaz con la compañía eléctrica de recursos específicos como sistemas PV, sin embargo persiste la necesidad de evaluar la calidad de los sistemas de energía renovable descentralizados. La Tabla 2 muestra algunas aplicaciones de GD.

Tabla 2: Aplicaciones de sistemas de generación distribuida

Tipo de Sistema	Residencial	Comercial	Industrial
Tipo de GD	Sistema fotovoltaico (solar)systems	Microturbinas	Molino de viento
Tipo de inter-conexión	Invertidores	Rectificadores - Invertidores	Generadores de Inducción, Invertidores
Tipo de carga (ejemplos)	Compact Fluorescent Lights	Computadoras "electric drives"	hornos de arco, "electric drives"

C. Calidad de Potencia

La mayor parte de la GD requiere un interfaz para conectarse a la red eléctrica. El interfaz entre GD y el sistema es en muchos casos, un convertidor de electrónica de potencia, cuyas características no-lineales pudieran causar distorsiones de voltaje que pondrían en riesgo la confiabilidad del sistema (según discutido en la sección III). La figura 5 muestra el servicio hacia cargas cercanas y la interconexión con el sistema eléctrico.

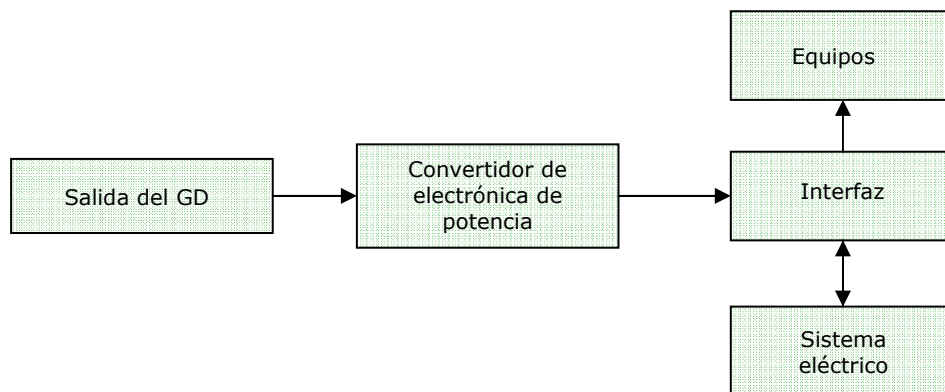


Figura 5: Interconexión de fuentes distribuídas con la red eléctrica

El área de calidad de potencia envuelve el análisis, modelado, y mitigación de desviaciones de voltaje y corriente en cuanto a la forma, magnitud y frecuencia ideales de una señal. La proliferación de cargas no-lineales en los sistemas tiene un impacto negativo en la calidad de potencia de ese sistema si no se toman las medidas necesarias. Es importante notar que un sistema puede ser confiable, es decir, proveer energía de manera constante, pero tener una mala calidad de potencia donde el voltaje que se obtiene no es el esperado. Los eventos de calidad de potencia tienen duración de menos de 2 segundos, eventos de mayor duración se consideran problemas de otra índole en el sistema. A pesar de que GD bien localizada puede mejorar la calidad de la potencia, (ej. mejorar el nivel de voltaje), existen interrogantes sobre cuanto GD puede sostener un sistema de distribución sin que cause problemas de calidad de potencia (ej. distorsión armónica). En otras palabras, GD puede ser tanto una solución como un problema para la calidad de potencia de un sistema. Por esto se requieren estudios y análisis de la posible

distorsión generada, además si la GD puede tener un impacto negativo en cuanto al desbalance que pueda haber en un sistema eléctrico.

La calidad de potencia es importante, pues hoy día casi cualquier aplicación tiene un microprocesador que es sensitivo a variaciones en la potencia de entrada. Estos microprocesadores evalúan y procesan información basándose en niveles de voltaje: 1 para voltaje diferente de cero, 0 para voltaje igual o cerca de cero. Las fluctuaciones en el voltaje de entrada pueden causar pérdida de información ya que el micro pudiera procesar todo en cero mientras dure, por ejemplo, una caída de voltaje. Esto ocasiona operaciones erráticas, que pudieran ir desde una molestia individual cuando una computadora se paraliza, hasta pérdidas millonarias cuando las computadoras de control de alguna industria son afectadas. Problemas de calidad de potencia pueden afectar tanto usuarios como a las compañías eléctricas.

Se describirán algunos de los problemas de calidad de potencia usando como ejemplo los molinos de viento discutidos anteriormente. Los molinos pueden operarse conectados directamente a la red eléctrica a través de motores especiales, o indirectamente a través de un convertidor de electrónica de potencia. En ambos casos, puede haber un impacto negativo en la calidad de potencia. Cuando se opera en conexión directa, el motor del molino requiere del sistema un mínimo de energía que requiere el motor para su operación. Esto puede causar problemas de caída de voltaje en el punto donde está conectado el molino, y afectar equipo o usuarios cercanos. Si el molino está conectado a través de un convertidor de electrónica de potencia, además de aumentar los costos, la operación del convertidor puede crear problemas en el punto de conexión como discutido anteriormente.

Uno de los retos en el uso de turbinas de viento como generadores los es la variabilidad o intermitencia del recurso. Esto es, no hay manera de controlar cuando generará o cuanta energía proporcionará un parque de viento. Aquí se hace necesario el almacenamiento de la energía para proveer estabilidad al sistema al cual se conecte el parque de viento, o técnicas muy exactas de predicción del comportamiento del viento. En el caso de almacenamiento, los costos pueden aumentar y además se requeriría un convertidor de electrónica de potencia, con su potencial impacto en la calidad de potencia. Por otro lado, el sistema de extracción de viento no es perfecto. Para lograr máxima extracción de energía es necesario operar el molino a velocidad variable, lo que pudiera tener un impacto negativo en la calidad de potencia del sistema al cual el molino esté conectado. Por esto se hace necesario el uso de electrónica de potencia, lo que a su vez puede conllevar costos adicionales.

VIII. Mirando al Futuro: Sostenibilidad y Perspectiva Integrada de la Energía

Un futuro sostenible es una visión aceptada por todos los sectores sociales. Una definición clásica de sostenibilidad es el satisfacer las necesidades de la presente generación sin comprometer las necesidades de generaciones futuras. Aunque muchas estrategias existen para alcanzar un futuro sostenible en el marco amplio del uso de los recursos naturales, lo cierto es que todo esquema de futuro sostenible requerirá sistemas de energía sostenibles.

De la discusión en este artículo pudiera concluirse que el futuro energético no es alentador. El satisfacer la demanda futura con las fuentes y tecnologías actuales crearía aún mayores problemas científicos y sociales. Se necesita una transición de nuestra dependencia de combustibles fósiles a otras fuentes de energía que sean sostenibles. El problema es enorme, pero presenta una oportunidad única. En la discusión de sostenibilidad hay tres principios básicos que deben llevarse a un balance: Económico, social y ambiental. Es por esto que resulta imprescindible que se unan y se consideren las necesidades de los sectores industriales,

comerciales, residenciales y gubernamentales en la búsqueda e implementación de alternativas energéticas sostenibles. Se requieren pues avances en la Ingeniería, Ciencias Naturales, y Ciencias Sociales. Esto puede dar como resultado una perspectiva integrada de la energía, viéndose la misma como un problema no puramente técnico, sino más bien social con un gran contenido técnico.

En cuanto a la pregunta hecha al inicio de este memorial ¿cuáles de estas alternativas energéticas deben explorarse en Puerto Rico para reducir nuestra dependencia del petróleo?, Puerto Rico necesita implementar un programa de energía estratégico que utilice procesos más eficientes, confiables y más compatibles con el medio ambiente. Una alternativa es considerar la misma estrategia de “portafolio” sugerida por el Departamento de Energía. Se entiende que el petróleo y sus derivados tendrán una presencia considerable durante este siglo. Sin embargo, por razones ambientales y de seguridad nacional es imperativo que otras fuentes y/o procesos de energía primordialmente de índole renovable y sostenible también contribuyan a niveles razonables en esta área. Las celdas combustibles (basadas en hidrógeno) y los molinos de viento serían uno de los componentes de este portafolio, y tienen un gran potencial de aplicación en Puerto Rico.

Es importante que, independientemente de la tecnología que se quiera implementar, se considere seriamente el concepto de modularidad atado a la filosofía de desarrollo sostenible de comunidades. El concepto de limitar la dependencia en una sola opción energética debe extrapolarse hasta las comunidades. Las tecnologías antes mencionadas pudieran ser incorporadas a diferentes grados en las comunidades de manera que las mismas no dependerían tanto de la red ni de una única fuente energética. También es importante llegar a las comunidades para educar en relación a los patrones de consumo de energía, y métodos de conservación y eficiencia energética.

Para alcanzar un futuro sostenible para Puerto Rico, es necesario investigar y entender que el cambio es uno gradual, hacia otro recurso, diferente al petróleo. En este proceso, los resultados serán a largo plazo, y no deben atarse a las fluctuaciones políticas de cada cuatro años. El momento histórico en que vivimos nos debe motivar a enfocarnos en las estrategias energéticas que mejor le sirvan al país. Como primer paso es necesario evaluar el estado actual, y desarrollar una nueva perspectiva del futuro energético en el que exista armonía entre las necesidades de energía y el impacto social y ambiental. El uso de fuentes renovables de energía es deseable, siempre que se tomen en cuenta las limitaciones de la infraestructura actual, la calidad de la energía que llega a los usuarios, y la viabilidad y el impacto de estas tecnologías dentro de las realidades de operación del sistema eléctrico de Puerto Rico.

La Universidad de Puerto Rico en colaboración con sectores gubernamentales e industriales ha desarrollado un programa de investigación y educación en fuentes sostenibles a través de proyectos en los recintos de Mayagüez y Río Piedras. El objetivo principal es hacer de la UPR la entidad líder en el Caribe y América Latina, en el desarrollo de profesionales, científicos y educadores en el área de energía. De esta manera, tendremos puertorriqueños que sean agentes facilitadores del desarrollo socio-económico de Puerto Rico, y a la vez contribuiremos a reducir nuestra dependencia de combustibles fósiles y a la transición hacia fuentes de energía renovables.

IX. Bibliografía Selecta

T. Appenzeller, “The Case of the Missing Carbon,” *National Geographic*, Febrero 2004.

T. Appenzeller, “The End of Cheap Oil,” *National Geographic*, Junio 2004.

J.A. Colucci, R.A. Pérez, Y. López, M. Ospinal, *Fuel Cells Applications in Puerto Rico, an Environmentally Friendly Technology*, Proceedings AIDIS 04, August 2004.

J.A. Colucci, F.A. Alape, E. Borrero, *Biodiesel for Puerto Rico*, Green Chemistry & Engineering Proceedings, 2003, 37 – 40.

J.A. Colucci, F.A. Alape, E. Borrero, *Biodiesel from Alkaline Transesterification Reaction of Soybean Oil Using Ultrasound Mixing*, Colucci, JAOCS, **In Press**

M.E. El-Hawary, *Electrical Energy Systems*, CRC Press, 2000.

L.C. González-Carrasquillo and A.A Irizarry-Rivera, *A Procedure to Determine Wind Power Capacity Value and its Future Application to Puerto Rico’s Electric Power System*, Proceedings of the Thirtieth Annual North American Power Symposium, Cleveland State University, Cleveland, Ohio, 1998.

D. Goodstein, *Out of Gas*, W.W. Norton, 2004.

C. Humphrey, T. Lewis, F. Buttel, *Environment, Energy and Society: A New Synthesis*, Wadsworth, 2002.

Agustín A. Irizarry-Rivera. *Benefits of Storing Electric Energy from Wind in Puerto Rico*, Proceedings of the Caribbean Colloquium on Power Quality (CCPQ), Dorado, Puerto Rico, June 24-27, 2003.

A.A. Irizarry-Rivera, Wenceslao Torres and Efran Paredes, *Evaluation and Technology Review of Energy Storage for the PREPA System*, Proceedings of the Electric Energy Storage Applications and Technologies Conference, Orlando, Florida, September 18-20, 2000.

Jeniffer Jiménez-González and Agustín A. Irizarry-Rivera, *Generation Displacement, Power Losses and Emissions Reduction due to Solar Thermal Water Heaters*, Submitted to the Thirty-seventh Annual North American Power Symposium, Ames, Iowa, October 23-25, 2005.

B. Kennedy, *Power Quality Primer*, McGraw-Hill, 2000.

B. Lomborg, *The Skeptical Environmentalist*, Cambridge, 2001.

N. Mohan, *Power Electronics*, Wiley, 2003.

Organización de Naciones Unidas, *Our Common Future*, The World Commission Report on Environment and Development, Oxford Press, 1987.

M. Parfit, "Powering the Future," *National Geographic*, Agosto 2005.

Carlos A. Ramos-Robles and Agustín A. Irizarry-Rivera, *Economical Effects of the Weibull Parameter Estimation on Wind Energy Projects*, To be presented the Thirty-seventh Annual North American Power Symposium, Ames, Iowa, October 23-25, 2005.

Carlos A. Ramos-Robles and Agustín A. Irizarry-Rivera, *Development of Eolic Generation Under Economic Uncertainty*, Proceedings of the Eighth Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS) International Conference, Ames, Iowa, September 13-16, 2004.

J. Rifkin, *The Hydrogen Economy*, Tarcher/Penguin, 2002.

M. Rodríguez-Fernández and A.A Irizarry-Rivera, *Overview of the Dynamic Performance of a Small Electric Power System in the Presence of Eolic Generation*, Proceedings of the Thirtieth Annual North American Power Symposium, Cleveland State University, Cleveland, Ohio, 1998.

V. Vaitheeswaran, *Power to the People*, Farrar, Straus and Giroux, 2003.