



Ing. Daniel Hernández,
PE, MEM
PRET -Founder & Editor
daniel1616pr@yahoo

En Puerto Rico, la **transición hacia un sistema 100% renovable** ha vuelto a ser el centro del debate. Mientras algunos defienden la eliminación de las metas intermedias para enfocarse exclusivamente en el objetivo final, otros advierten sobre los desafíos que esto implica. Sin embargo, en medio de la discusión, hay un aspecto crítico que pasa desapercibido: **la estabilidad operativa del sistema eléctrico.**

Este artículo deja de lado los debates políticos o intereses particulares para enfocarse en lo realmente importante: **¿Cómo integrar más**

energía renovable sin comprometer la confiabilidad del sistema?

Analizo los desafíos operativos clave, presento el **Adaptive Energy Mix** como un nuevo enfoque estratégico y propongo soluciones concretas para garantizar un sistema energético seguro, estable y sostenible.

FUNDAMENTO DE LA DISCUSIÓN: PRINCIPIOS OPERATIVOS BÁSICOS

El equilibrio entre demanda y generación es un principio fundamental en cualquier sistema eléctrico. La energía generada debe ajustarse en tiempo real a la demanda de los consumidores para garantizar la estabilidad operativa. Cuando la demanda aumenta o disminuye, la generación debe responder en la misma proporción para que la frecuencia del sistema de 60 HZ no se vea afectada (**ver ilustración #1**).

Para asegurar un suministro continuo y estable, la generación debe ser **firme**, es decir, capaz de ofrecer **servicios auxiliares**

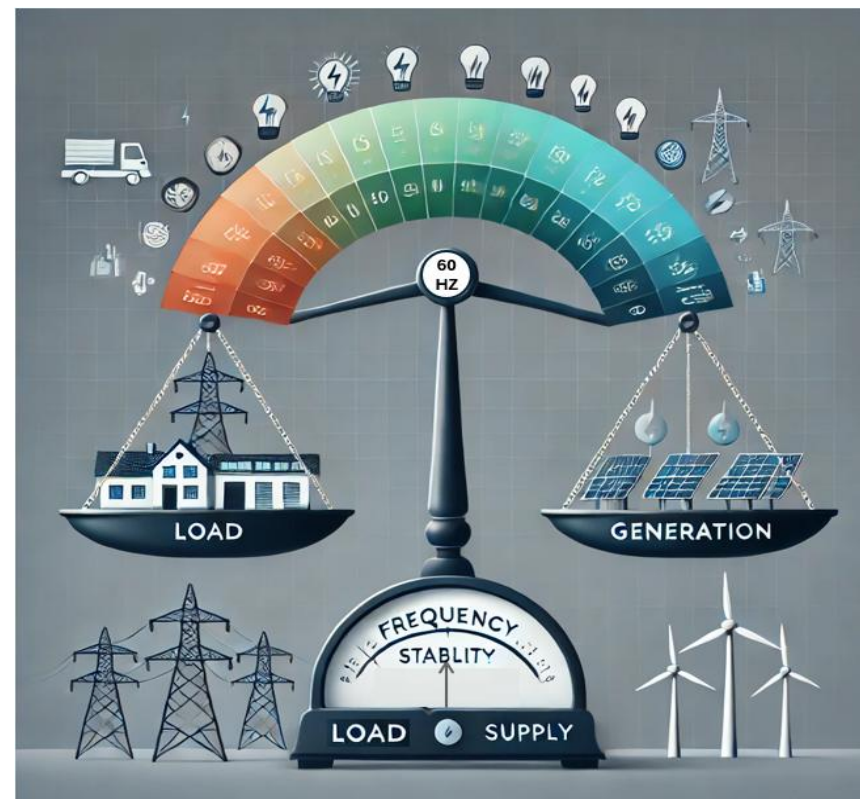


Ilustración 1: Equilibrio entre la carga y la generación para mantener la frecuencia.

como regulación de frecuencia, control de voltaje, inercia y capacidad de cortocircuito. Estos elementos son esenciales para mantener la confiabilidad del sistema eléctrico.

Ahora bien, **¿cómo se relaciona estos principios con las metas intermedias de las fuentes renovables?**

La conexión es directa, aunque a menudo subestimada en los debates. Dado que la generación renovable es variable e impredecible, es imprescindible contar con **fuentes de respaldo firmes** que garanticen estabilidad cuando la producción renovable disminuye, ya sea por cambios en las condiciones climáticas o por la ausencia de sol o viento. Sin estos recursos, el equilibrio del sistema podría verse comprometido.

EL DESAFÍO DE LAS FUENTES RENOVABLES

La migración hacia fuentes de energía renovable abarca más que simplemente la implementación de sistemas solares o eólicos y el retiro de plantas térmicas. Es innegable que la integración de energías renovables plantea desafíos técnicos que deben ser abordados para garantizar la estabilidad del sistema eléctrico.

En Puerto Rico, tanto la energía solar como la eólica presentan un comportamiento similar, siendo efectivas únicamente durante las horas diurnas. **En promedio, estas fuentes generan electricidad alrededor del 22% del tiempo, lo que equivale a aproximadamente 4 o 5 horas diarias (ver Ilustración 2).** Esto plantea el reto de encontrar soluciones adecuadas para asegurar el suministro eléctrico durante las horas restantes del día.

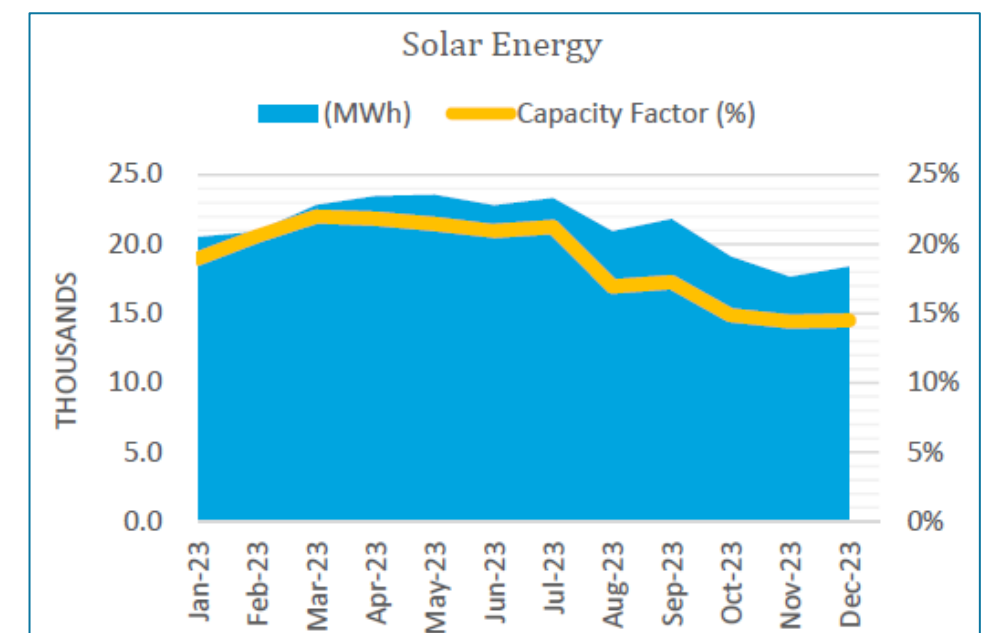


Ilustración 2 - Parques Solares 2023 - Producción de Energía Renovable y Factor de Capacidad.

En el sistema eléctrico, ya hay conectados cerca de **1,100 MW** provenientes de fuentes renovables, tanto a gran escala como distribuidas. Esto ha generado una **disminución de la demanda** durante las horas de mayor producción de energía renovable (**10**

a. m. - 3 p. m.) y un **rápido incremento** entre las 4 p. m. y las 9 p. m., cuando la generación renovable es mínima. La diferencia promedio entre la demanda diurna y nocturna **alcanza los 700 MW**, como se muestra en la **ilustración 3**.

Para mantener el **equilibrio entre la demanda y la generación**, los generadores convencionales deben reducir

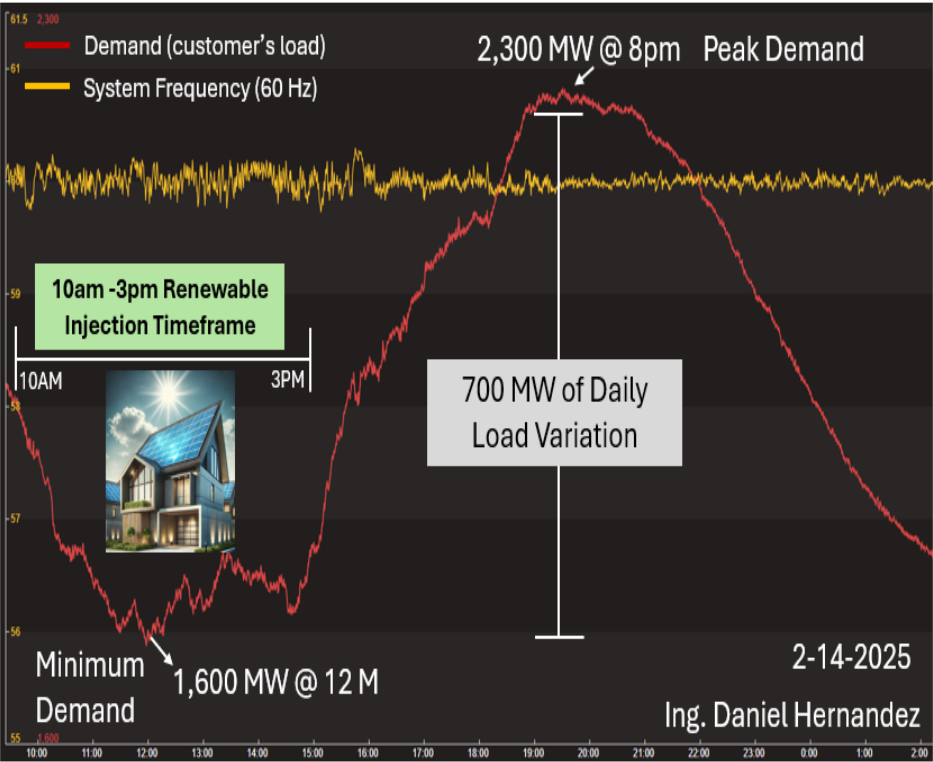


Ilustración 3: Comportamiento actual de la carga durante un día normal.

significativamente su capacidad durante el día y operar al máximo en la noche, cuando los renovables dejan de producir. Esta variabilidad diaria ejerce una presión considerable sobre **generadores que datan de la década de 1960**, los cuales no fueron diseñados para este tipo de operación. Como resultado, se acelera el desgaste y la ruptura de **componentes críticos** como tuberías de calderas, turbinas y sistemas auxiliares, lo que provoca **averías frecuentes e interrupciones del servicio** para los clientes.

A partir de estos hechos, surgen tres interrogantes clave:

1. **¿Cómo garantizar la estabilidad, confiabilidad y continuidad del servicio ante la intermitencia de las fuentes renovables y el retiro de plantas térmicas?**
2. **¿Cómo asegurar la generación eléctrica en los momentos en que las fuentes renovables sean insuficientes o no estén disponibles?**
3. **¿Cómo proporcionar generación de emergencia las 24 horas, con capacidad suficiente para restablecer el servicio a clientes críticos y prioritarios tras un desastre natural?**

EL DESAFÍO DE LAS FUENTES DE APOYO

El incremento de la penetración de fuentes renovables variables, como la solar y la eólica, requiere el desarrollo y la incorporación de fuentes de apoyo flexibles (**Grid Flexibility Resources**). Estos recursos son esenciales para responder a las fluctuaciones de generación y demanda en tiempo real, proporcionando respaldo durante las horas en las que la producción renovable es insuficiente.

Tecnologías como sistemas de almacenamiento en baterías (BESS), turbinas de gas de arranque rápido y almacenamiento hidroeléctrico por bombeo desempeñan un papel crucial, ya que permiten suplir déficits de energía y ofrecer servicios auxiliares como regulación de frecuencia, control de voltaje y estabilidad operativa.

El desafío radica en encontrar un balance adecuado entre fuentes renovables y recursos de flexibilidad, apoyados por una infraestructura moderna de transmisión y distribución (T&D). Esta combinación garantizaría que el sistema pueda operar de manera confiable incluso con una alta penetración de energías variables, manteniendo una proporción óptima de

respaldo disponible en todo momento. Así, las fuentes de apoyo flexibles no solo complementan la generación renovable, sino que también fortalecen la resiliencia del sistema eléctrico ante los retos de un futuro energético sostenible.

EL ESTADO DE LAS FUENTES DE APOYO EN PR

En Puerto Rico, las principales fuentes de respaldo del sistema eléctrico provienen de tecnologías obsoletas, algunas operando desde la década de 1960, sin la flexibilidad necesaria para integrar eficientemente fuentes renovables. Las unidades termoelectricas en operación, como las que aparecen en la **ilustración #4**, deben ser reemplazadas por tecnologías más eficientes y adaptables, como unidades de mediana capacidad diseñadas específicamente para respaldar sistemas con una alta penetración de fuentes variables. Para garantizar la estabilidad y



Ilustración 4 Fuentes de Generación Existentes

continuidad del suministro ante la creciente integración de fuentes variables, es fundamental contar con una capacidad de respaldo adecuada con unidades flexibles. En países con una alta participación de energías renovables, el respaldo convencional

suele representar entre el 30% y el 50% de la capacidad renovable instalada. **No obstante, la proporción óptima para el sistema de PR debe determinarse mediante estudios de ingeniería rigurosos, como los establecidos en el Plan Integrado de Recursos.**

EL DESAFÍO DE LA INFRAESTRUCTURA DE T&D

El avance hacia una mayor penetración de energías renovables no debe limitarse solo a la instalación de capacidad renovable; requiere una planificación integral que incluya tecnologías de respaldo y la modernización de los sistemas de transmisión y distribución (T&D). Los sistemas de T&D actuales, diseñados para fuentes de energía convencionales, enfrentan retos significativos con la integración de renovables, que son

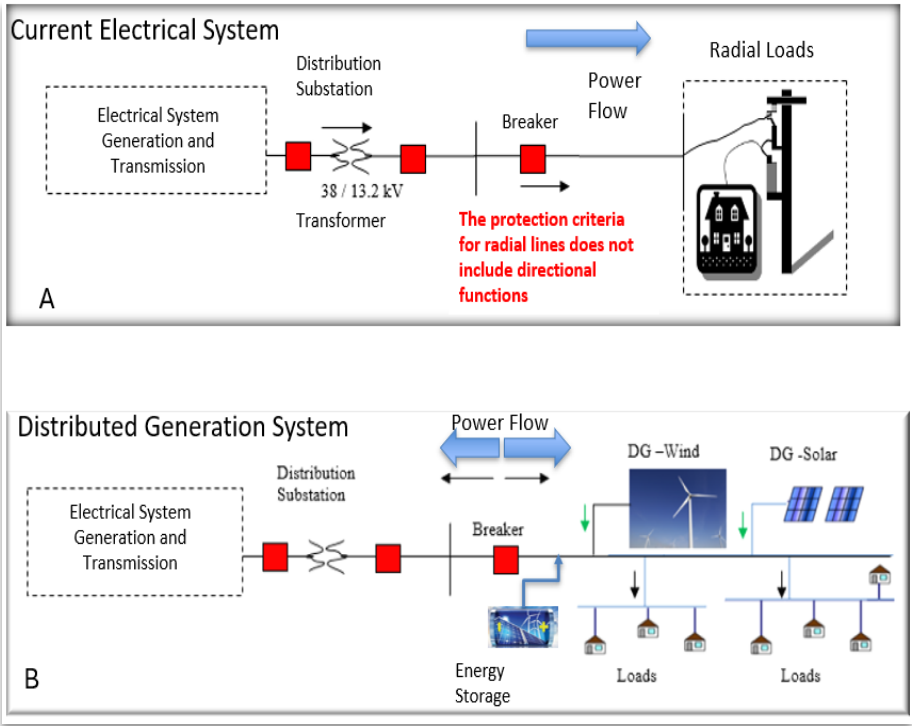


Ilustración 5 – (A) Flujo de potencia actual del sistema. (B) Flujo bidireccional de potencia debido a recursos renovables distribuidos.

intermitentes y variables. Para manejar estos desafíos, es crucial actualizar y fortalecer la infraestructura eléctrica.

Uno de los principales retos es la actualización de los sistemas de **protección eléctrica**. Las redes tradicionales están diseñadas para flujos de energía unidireccionales, desde plantas centralizadas hacia los consumidores (**Ilustración 5A**). Con la incorporación de renovables distribuidas, como paneles solares y generadores eólicos, el flujo de energía se vuelve **bidireccional** (**Ilustración 5B**), lo que puede interferir con los sistemas de protección actuales. Es necesario modernizar estos sistemas para detectar y responder a fallas en ambos sentidos, garantizando desconexiones seguras sin comprometer la estabilidad de la red.

La modernización hacia sistemas de protección digitales es clave para gestionar los flujos de energía bidireccionales y la integración de renovables. Estas soluciones permiten el monitoreo en tiempo real y una detección precisa de fallas, facilitando respuestas automáticas y seguras ante anomalías. Así, se garantiza la estabilidad de la red eléctrica y se adapta de manera proactiva a la creciente complejidad de los flujos energéticos modernos.

Otro desafío crítico es el **control de las fluctuaciones de voltaje** en los circuitos de distribución. La variabilidad de la energía solar y eólica puede generar oscilaciones en los niveles de voltaje, afectando la calidad del servicio eléctrico y la estabilidad de la red. Para mitigar estos efectos, es fundamental integrar **sistemas de compensación reactiva** y **bancos de condensadores automáticos**, asegurando un suministro eléctrico constante incluso ante cambios abruptos en la generación renovable.

Además, la modernización de la infraestructura de T&D debe incluir **sistemas inteligentes de gestión de la red**, que permitan monitoreo en tiempo real y ajustes automáticos para equilibrar oferta y demanda. Estas tecnologías son clave para integrar de

manera confiable las fuentes renovables sin comprometer la estabilidad del sistema.

Por lo tanto, conectar paneles solares distribuidos o grandes plantas fotovoltaicas no es suficiente para garantizar un modelo energético sostenible. Es necesario optimizar la infraestructura con un enfoque integral en **protecciones eléctricas, regulación de voltaje y gestión inteligente de la red**, asegurando una operación confiable y resiliente del sistema eléctrico.

RECOMENDACIÓN: REDEFINIR LAS METAS DE ENERGÍAS RENOVABLES DESDE UN MARCO DE MEZCLA ENERGÉTICA: EL ADAPTIVE ENERGY MIX

Estos desafíos a menudo se pasan por alto en las discusiones sobre el avance de las metas de energía renovable. Sin embargo, deben abordarse si Puerto Rico quiere lograr una alta participación de energía limpia. Una transición energética exitosa y sostenible requiere un enfoque que no solo se centre en incorporar fuentes renovables, sino que también considere los recursos de flexibilidad y la modernización de la red como componentes esenciales de un sistema dinámico e interconectado.

En lugar de establecer metas fijas de capacidad renovable, propongo un marco de mezcla energética adaptativa, que integra energía renovable, recursos de flexibilidad y modernización de la red para mejorar la estabilidad, la fiabilidad y la eficiencia en costos. Este enfoque garantiza una transición energética equilibrada al ajustar de manera continua la combinación de recursos en función de las necesidades del sistema en tiempo real y las evaluaciones de ingeniería.

Al definir las metas dentro de un sistema integrado, se deben incorporar **recursos adicionales** que permitan una operación estable y continua del suministro eléctrico. Esto incluye el desarrollo de **infraestructura de almacenamiento, redes**

inteligentes y tecnologías de gestión de la demanda, contribuyendo a una mayor confiabilidad y sostenibilidad del sistema energético.

Plan Estratégico: Establecer la Proporción Óptima de Energías Renovables y Recursos de Flexibilidad

Fases del Plan

1. Análisis del Comportamiento del Sistema

- Evaluar la variabilidad de la generación renovable y su impacto en la red.
- Identificar los desafíos técnicos asociados a la intermitencia y fluctuación de la oferta de energía.

2. Determinación de Recursos de Flexibilidad

- Definir la capacidad y las tecnologías necesarias para gestionar la intermitencia de las fuentes renovables, incluyendo las metas previstas de capacidad de energía renovable a mediano plazo y los servicios auxiliares requeridos para mantener la estabilidad del sistema.
- Incluir mecanismos como almacenamiento en baterías, gestión de la demanda y sistemas de respaldo eficiente.
- Especificar los niveles necesarios de regulación de frecuencia, control de voltaje, capacidad de cortocircuito y capacidad de rampa para asegurar la confiabilidad de la red.

3. Optimización de la Infraestructura de Transmisión y Distribución (T&D)

- Identificar y priorizar las mejoras en la red para facilitar la integración renovable.
- Asegurar la modernización de la infraestructura para optimizar la absorción de energía limpia sin comprometer la estabilidad del sistema.

Implementación del Plan en Fases

La ejecución de este plan **debería realizarse** de manera **progresiva y coordinada**, asegurando que, en cada fase, se incorporen de forma simultánea:

- **Nuevas fuentes de generación renovable**, aumentando gradualmente su participación en la matriz energética.
- **Recursos de flexibilidad de la red**, que incluyen almacenamiento en baterías, respuesta a la demanda y generación distribuida gestionable.
- **Mejoras en la infraestructura de transmisión y distribución (T&D)**, optimizando la capacidad de la red para integrar mayores volúmenes de energía renovable sin afectar la estabilidad del sistema.

Para lograr una implementación eficiente, **recomiendo** que este proceso incluya:

- **Estudios de ingeniería** que determinen la proporción óptima entre generación renovable y recursos de apoyo flexible, garantizando que cada meta sea alcanzada sin comprometer la confiabilidad del sistema.
- Un proceso de **licitación rápido, estructurado y transparente**, llevado a cabo con sentido de urgencia para facilitar la integración de las tecnologías y recursos adecuados en cada fase.
- **Una hoja de ruta clara** para agencias reguladoras y entidades de planificación, asegurando que los objetivos energéticos estén alineados con la realidad operativa del sistema eléctrico.

La Ilustración 6 ejemplifica este concepto de manera visual:

- La línea verde muestra las proyecciones de crecimiento de las energías renovables, con puntos que indican los objetivos intermedios.

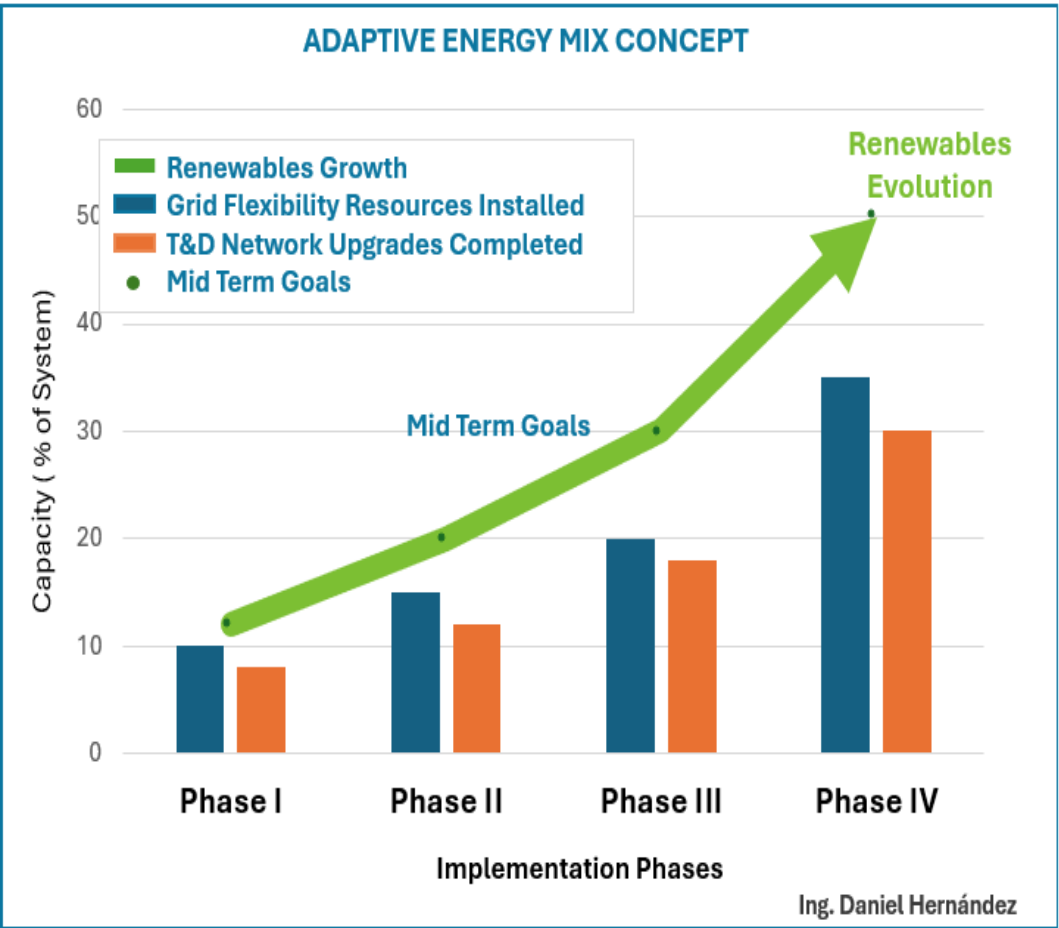


Ilustración 6: Concepto de la Mezcla Energética Adaptativa.

- Las columnas azules indican la capacidad necesaria de recursos flexibles, incluyendo almacenamiento en baterías (BESS), turbinas de combustión de alta eficiencia, ciclos combinados medianos y otros recursos esenciales para la estabilidad del sistema.
- Las columnas anaranjadas muestran las mejoras requeridas en la infraestructura de transmisión y distribución (T&D) para soportar de manera eficiente la integración de estas tecnologías.

Este enfoque integral, en mi opinión, permitiría maximizar la penetración de energía renovable sin comprometer la

confiabilidad del sistema. Además, contribuiría a garantizar la **sostenibilidad operativa**, reduciendo riesgos de desestabilización y optimizando el aprovechamiento de los recursos disponibles.

CAMBIOS A CONSIDERAR EN LA LEY DE POLÍTICA PÚBLICA DE ENERGÍA DE PUERTO RICO BASADOS EN EL CONCEPTO DE MEZCLA ENERGÉTICA ADAPTATIVA.

La implementación del concepto de Mezcla Energética Adaptativa requeriría revisar y actualizar la Ley de Política Pública de Energía de Puerto Rico para clarificar sus objetivos y definir planes de acción más específicos.

Actualmente, el marco regulatorio establece metas de energía renovable sin considerar plenamente los recursos de flexibilidad de la red ni las mejoras necesarias en la infraestructura de transmisión y distribución (T&D).

Para asegurar una transición efectiva y sostenible, recomiendo incorporar disposiciones que reflejen un enfoque más holístico e integrado, garantizando que la integración de energías renovables se alinee con las necesidades de confiabilidad y estabilidad del sistema.

1. Evaluación y Planificación Estratégica

- Instruir a la Autoridad de Energía y al Negociado de Energía de Puerto Rico a realizar estudios detallados de modelado energético para determinar la proporción óptima entre generación renovable y recursos flexibles, como el almacenamiento en baterías y la generación de respaldo.

PR Energy Public Policy Act

Year	Renewable Energy Target
2025	40%
2040	60%
2050	100%



Proposed Changes Based on Adaptive Energy Mix

Year	Renewable Energy Target	Proportion of Flexible Resources
TBD	40%	TBD %
2040	60%	TBD %
2050	100%	TBD %

Ilustración 7: Cambios Propuestos a la Ley de Política Pública Basado en la Mezcla Energética Adaptativa.

- Establecer metas intermedias para fuentes de energía limpia, incluyendo la proporción correspondiente de recursos flexibles, según se muestra en la **Ilustración 7**.
- Requerir la publicación de reportes anuales sobre la evolución de la matriz energética, evaluando su compatibilidad con la red eléctrica y los avances en la integración de energías renovables.
- Incluir en estos estudios la identificación de mejoras necesarias en T&D, asegurando que la infraestructura pueda absorber nuevas fuentes de energía sin comprometer la estabilidad del sistema.

2. Simulación de Escenarios de Integración

- Implementar simulaciones periódicas para evaluar patrones de generación, variabilidad de la carga y capacidad de respuesta de los recursos flexibles.
- Establecer métricas de confiabilidad específicas para la integración de energías renovables, garantizando la estabilidad del sistema en distintos escenarios operativos.

- Analizar las necesidades de infraestructura para reforzar la capacidad de transmisión y distribución en función de los escenarios proyectados, priorizando inversiones estratégicas.

3. Optimización del Despacho Económico

- Desarrollar un pronóstico de despacho del sistema integrado de recursos energéticos, estableciendo la proporcionalidad óptima entre generación renovable, almacenamiento y respaldo bajo distintos escenarios operativos.
- Considerar tanto condiciones normales de operación como restricciones derivadas de factores climáticos y eventos atmosféricos extremos.
- Definir un plan de despacho con capacidad de "black start", asegurando una recuperación rápida y eficiente del suministro eléctrico tras fenómenos atmosféricos de gran impacto.

4. Incentivos y Regulaciones para la Flexibilidad Energética

- Crear una regulación de mercado de servicios auxiliares para mejorar la confiabilidad de la red, integrar la energía renovable y asegurar un mercado competitivo y transparente para dichos servicios.
- Crear mecanismos regulatorios que fomenten la inversión en almacenamiento de energía y demanda gestionable, asegurando que estos recursos se integren de manera efectiva en la planificación del sistema eléctrico.
- Implementar programas de incentivos para empresas y residencias que instalen sistemas de almacenamiento

distribuido y recursos de demanda flexible, garantizando que los incentivos se otorguen a un costo razonable para los consumidores.

- Diseñar políticas que promuevan la modernización de la infraestructura de T&D, alineando su desarrollo con el crecimiento de las energías renovables y la incorporación de tecnologías de gestión de la red.

Estas enmiendas a la Ley de Política Pública de Energía permitirían que el marco regulatorio de Puerto Rico se adapte a los desafíos de la transición energética, garantizando un sistema eléctrico confiable, eficiente y resiliente, alineado con los objetivos de descarbonización y preparado para eventos naturales.

Además, esta actualización aseguraría que las nuevas metas de energía renovable sigan siendo alcanzables sin comprometer la estabilidad de la red, mediante la integración proporcional de fuentes de energía limpia, recursos flexibles y las mejoras necesarias en la infraestructura de transmisión y distribución.

CONCLUSIÓN

La transición hacia la energía renovable no solo es un mandato legal, sino también una necesidad. Sin embargo, garantizar un sistema eléctrico confiable y seguro requiere soluciones técnicas y recursos energéticos que aseguren la viabilidad operativa.

Los objetivos intermedios de energía renovable son esenciales, pero deben basarse en rigurosos estudios de ingeniería en lugar de aspiraciones políticas o decisiones desconectadas de la realidad técnica y financiera de Puerto Rico.

En lugar de establecer objetivos estáticos para la energía renovable, la estrategia energética debería centrarse en una mezcla energética adaptativa, en la que el equilibrio óptimo de

energía limpia, recursos flexibles y modernización de la red se determine a través de estudios de ingeniería integrales. Este enfoque mejora la confiabilidad, la resiliencia y la eficiencia en términos de costos.

El Plan Integrado de Recursos (IRP), aprobado por el Negociado de Energía de Puerto Rico (PREB), debe reflejar estrategias fundamentadas en el funcionamiento real del sistema. Ignorar los desafíos de construcción, financiamiento y modernización de la infraestructura—especialmente en medio de la bancarrota de PREPA—pondría en riesgo el éxito de la transición energética.

Por lo tanto, es imperativo revisar la Ley de Política Pública de Energía de Puerto Rico para ir más allá de los objetivos fijos de energía renovable y adoptar un marco que establezca la proporción adecuada de generación renovable y recursos de flexibilidad en cada etapa de la transición.

Este enfoque garantiza que el camino hacia un 100% de energía limpia esté guiado por objetivos intermedios que reflejen la combinación óptima de tecnologías necesarias para mantener la estabilidad y confiabilidad de la red.

Alineando los esfuerzos entre el gobierno, la legislatura y las entidades regulatorias, y priorizando decisiones basadas en datos y sólidas desde el punto de vista técnico sobre intereses políticos o particulares, Puerto Rico puede lograr un sistema eléctrico seguro, estable y verdaderamente sostenible para el futuro.

BIO Daniel Hernández Morales

El ingeniero Daniel Hernández Morales es un profesional experimentado en el sector energético de Puerto Rico, con más de 35 años de experiencia en ingeniería eléctrica y liderazgo en los ámbitos de generación, transmisión y distribución. En marzo de

2023, asumió el cargo de Vicepresidente de Operaciones en Genera PR como parte de sus servicios de consultoría. En este rol, lideró la conceptualización de proyectos estratégicos clave para estabilizar el sistema de generación, entre los que se incluyen:

- **El proyecto del Sistema de Almacenamiento de Energía con Baterías (BESS) de 430 MW**, diseñado para mejorar la flexibilidad operativa y la confiabilidad del sistema mientras se estabiliza la red, con una reducción esperada en los cortes de suministro de hasta el 90%.

- **El Programa de Reemplazo de Componentes Críticos**, concebido para modernizar la infraestructura de generación y reducir en un 50% las fallas forzadas de los generadores, garantizando así la estabilidad del sistema a largo plazo.

De 2021 a 2023, se desempeñó como Director de Proyectos Renovables en LUMA Energy, facilitando la interconexión estratégica de proyectos renovables a gran escala.

Durante sus 32 años en PREPA, ocupó diversos cargos de liderazgo, entre ellos Director de Generación, Jefe de Subestaciones y Gerente de Puesta en Marcha. Como ingeniero de puesta en marcha, lideró la integración de numerosos proyectos de energía renovable que actualmente operan en Puerto Rico. Además, impulsó iniciativas en sistemas de protección, mantenimiento de subestaciones, transmisión y distribución, desempeñando un papel crucial en el fortalecimiento de la confiabilidad y modernización de la red eléctrica.

Con una visión estratégica y una sólida experiencia técnica, continúa siendo una pieza clave en la transformación energética de Puerto Rico. Como fundador y editor de PRET, ahora se dedica a proporcionar orientación, asesoría y visión para apoyar la transición de la isla hacia un sistema energético moderno, confiable y sostenible.