

HERRAMIENTA FLEXTOOL DE IRENA

RESUMEN DE LA METODOLOGÍA



La flexibilidad es la capacidad de un sistema eléctrico para hacer frente a la variabilidad e incertidumbre que la energía solar y eólica introducen en diferentes escalas de tiempo, desde el muy corto hasta el largo plazo, al evitar el vertido de energía de estas fuentes de energía renovable variable (ERV) y abastecer de forma confiable toda la demanda energética del cliente.

© IRENA 2019

A menos que se especifique lo contrario, el material de esta publicación puede usarse, compartirse, copiarse, reproducirse, imprimirse o almacenarse libremente, siempre que se reconozca adecuadamente a IRENA como fuente y titular de los derechos de autor. El material contenido en esta publicación que se atribuye a terceros puede estar sujeto a condiciones de uso y restricciones independientes, y deberán obtenerse los permisos adecuados de dichos terceros antes de hacer cualquier uso de ese material.

En este folleto se proporciona un resumen del documento *Power system flexibility for the energy transition, Part 2: IRENA FlexTool methodology* (Flexibilidad del sistema eléctrico para la transición energética, parte 2: metodología de la herramienta FlexTool de IRENA), ISBN 978-92-9260-090-7.

Autores contribuyentes: Emanuele Taibi, Thomas Nikolakakis, Laura Gutiérrez y Carlos Fernández (IRENA), con Juha Kiviluoma, Tomi J. Lindroos y Simo Rissanen (VTT).

Exención de responsabilidad

Esta publicación y el material que figura en ella se presentan en el estado en que se encuentran. IRENA ha tomado todas las precauciones razonables para verificar la fiabilidad del material presentado en esta publicación. Sin embargo, ni IRENA ni ninguno de sus funcionarios, agentes, proveedores de datos u otros contenidos de terceros ofrecen ninguna garantía, ya sea explícita o implícita, ni aceptan responsabilidad u obligación alguna por consecuencias derivadas del uso de la publicación o el material que contiene.

La información aquí contenida no representa necesariamente los puntos de vista de todos los miembros de IRENA. La mención de empresas específicas o ciertos proyectos o productos no significa que IRENA los respalde o recomiende con preferencia sobre otros de naturaleza similar que no estén mencionados. Las denominaciones empleadas y la presentación de material en la presente publicación no implican la expresión de ninguna opinión por parte de IRENA sobre la condición jurídica de ninguna región, país, territorio, ciudad o zona, ni de sus autoridades, ni en relación con la delimitación de sus fronteras o límites.

1. HERRAMIENTA FLEXTOOL DE IRENA

1.1 INTRODUCCIÓN

La evaluación de flexibilidad de IRENA se lleva a cabo con la herramienta FlexTool de IRENA. FlexTool es una **herramienta detallada pero fácil de usar**, con la que se pretende analizar no solo el concepto tradicional de flexibilidad (por ejemplo, la generación flexible de energía hidroeléctrica y termoeléctrica con alta capacidad de rampa y un tiempo de puesta en marcha muy bajo), sino también otras tecnologías innovadoras que enriquecen el concepto de flexibilidad, como la demanda flexible, el almacenamiento de energía y el acoplamiento sectorial.

FlexTool es capaz, por un lado, de **analizar las operaciones del sistema** usando un periodo de tiempo que representa desafíos del mundo real (una hora o menos en el caso de la energía renovable variable, ERV) y, por otro lado, **optimizar al menor costo el parque de generación**, así como soluciones de flexibilidad con respecto a las **redes, el almacenamiento, la demanda y el acoplamiento sectorial**. Sin embargo, FlexTool no estudia el muy corto plazo (escala de tiempo de segundos/subsegundos); y aunque esto también es relevante para la flexibilidad del sistema eléctrico, requiere otro tipo de análisis.

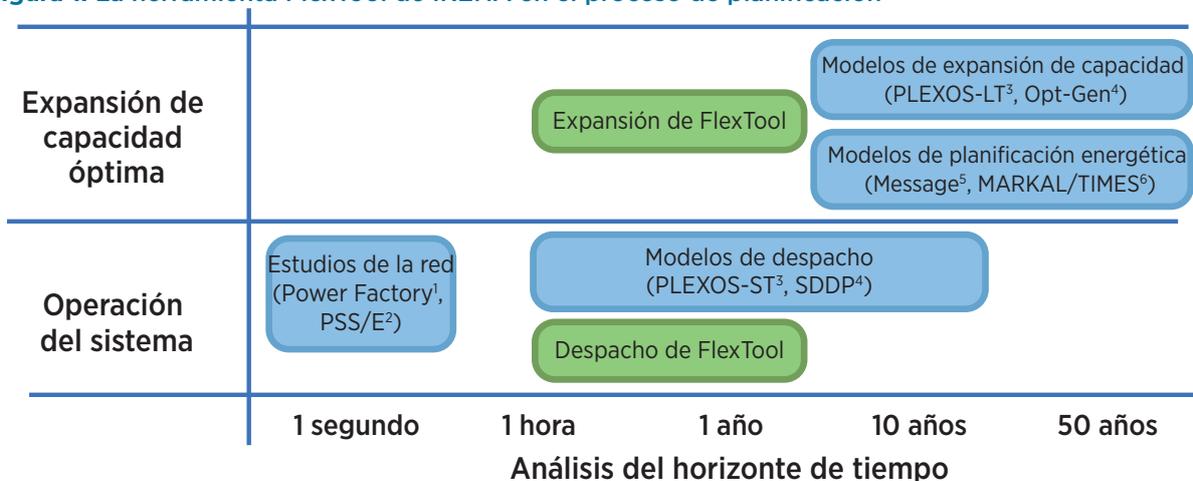
La herramienta FlexTool funciona a partir de datos. Esto significa que la estructura del modelo es

relativamente general, y los datos de entrada tienen un papel importante en la especificación de lo que hace el modelo. Para realizar una **simulación de FlexTool**, las entradas requeridas son, en breve: **demanda, parque de generación, datos hidrológicos, series temporales de ERV, interconexiones y costos de combustible**. Si el sistema que se analiza se divide en nodos diferentes, se requieren datos de transmisión, divididos por nodo, además de los datos mencionados.

FlexTool se desarrolló con el VTT Technical Research Centre of Finland Ltd., con el objetivo de ayudar a los miembros de IRENA a realizar una evaluación relativamente rápida de las posibles brechas de flexibilidad, así como para destacar la combinación más rentable de soluciones para cubrir dichas brechas. Actualmente, es la **única herramienta pública y de libre acceso (de código abierto)** que realiza tanto la **expansión de la capacidad como el despacho económico** con un enfoque en la flexibilidad del sistema eléctrico.

FlexTool analiza el horizonte de un año, las operaciones del sistema y la expansión de la capacidad con un enfoque en la flexibilidad del sistema eléctrico. En la Figura 1 se muestra dónde encaja FlexTool en el proceso de planificación en comparación con otras herramientas de modelado existentes.

Figura 1. La herramienta FlexTool de IRENA en el proceso de planificación



¹ Propiedad de DlgSILENT GmbH

² Propiedad de Siemens PTI

³ Propiedad de Drayton Analytics Pty. Ltd y Energy Exemplar Pty. Ltd.

⁴ Propiedad de PSR

⁵ Propiedad del Instituto Internacional para el Análisis de Sistemas Aplicados (IIASA)

⁶ Propiedad del Programa de Análisis de Sistemas de Tecnología Energética (ETSAP)

1.2 SIMPLIFICACIONES Y SUPOSICIONES DE LA HERRAMIENTA

La estructura relativamente simple de FlexTool proporciona muchos beneficios, pero también tiene algunas limitaciones. Las simplificaciones hechas en la herramienta incluyen:

- » Programación lineal, lo que implica simplificaciones en la forma en que se consideran las puestas en marcha y el mínimo técnico de las unidades generadoras.
- » Un modelo determinista que tiene una previsión perfecta y que, por lo tanto, no considera los errores de pronóstico de manera estocástica. Dicho esto, los requisitos de reservas operativas ascendentes se incluyen en el modelo.
- » Una representación simplificada de la red de transmisión interna (utilizando un problema de transporte)¹ con un conjunto reducido de nodos/áreas.
- » Agregación de centrales eléctricas por tipo, caracterizada por los parámetros técnicos más relevantes. Las unidades individuales también se pueden modelar, pero se recomienda la agregación para reducir el tiempo de cálculo.
- » No se considera el mantenimiento ni los cortes.
- » En el modo de expansión, semanas representativas son consideradas en la simulación. La selección de las semanas representativas afecta los resultados y requiere el juicio de expertos o herramientas heurísticas.
- » La herramienta no estudia las cuestiones relacionadas con el muy corto plazo (escala de segundos/subsegundos), como la estabilidad, ni tampoco considera la tensión.

¹ El problema de transporte es un problema de optimización común en la investigación de operaciones. Implica obtener el plan de menor costo para distribuir bienes o suministros desde múltiples orígenes a múltiples destinos. En este caso, los bienes a distribuir son megavatios de electricidad.

1.3 REQUISITOS DE DATOS DE ENTRADA DE LA HERRAMIENTA

Tabla 1. Requisitos de datos de entrada para ejecutar la herramienta FlexTool de IRENA

Datos del sistema (anual, por nodo)
Demanda, importaciones, pérdidas y margen de capacidad
Transmisión de electricidad (por nodo)
Capacidades de transmisión e interconexión
Datos de capacidad de generación (por nodo)
Capacidad instalada, datos técnicos de generadores, capacidad de los embalses
Datos de series temporales (8760 valores por hora, por nodo)
Demanda de electricidad, aportes hídricos, generación de energía eólica y solar fotovoltaica (FV), demanda de otros sectores (por ejemplo, calor)
Datos de combustibles
Precio de combustibles y tasa de emisión

1.4 SALIDAS DEL MODELO

Tabla 2. Salidas de la herramienta FlexTool de IRENA

Indicadores de flexibilidad	
Energía no suministrada (teravatios-hora [TWh] y %)	Vertido de ERV (TWh y %)
Insuficiencia de reservas (megavatios [MW])	Insuficiencia de capacidad (MW)
Vertido hidráulico (TWh)	
Despacho por generador y nodo	
Transmisión entre nodos (y factor de utilización de líneas)	
Costos	
GASTOS OPERATIVOS	GASTOS DE CAPITAL
Costos de combustible	Inversiones en generación
Costo de las emisiones de dióxido de carbono	Inversiones en transmisión
Costos de operación y mantenimiento	Inversiones en almacenamiento
Costo de la energía no suministrada	Inversiones en acoplamiento sectorial (por ejemplo, bombas de calor)
Costo por vertido de ERV	
Precio de la electricidad por nodo (precio marginal)	
Información de rampas (rampas de una hora y cuatro horas)	
Inversiones (transmisión, generación, almacenamiento o capacidad de acoplamiento sectorial)	
Otros (por ejemplo, despacho y costos de otros sectores energéticos)	

1.5 METODOLOGÍA PARA REALIZAR ESTUDIOS DE FLEXIBILIDAD

La herramienta FlexTool de IRENA presenta un conjunto de indicadores de flexibilidad y problemas de la red en el archivo de resultados que ayuda a identificar los problemas de flexibilidad. Incluye las siguientes categorías:

- » **Energía no suministrada (MW).** Ocurre cuando la oferta no puede satisfacer la demanda de energía y parte de esta debe quedar desatendida. La herramienta muestra la cantidad máxima de energía no suministrada determinada en un solo periodo.
- » **Insuficiencia de reservas (MW máx.).** Ocurre cuando el requisito de reserva no se puede cumplir. La herramienta muestra la cantidad máxima de insuficiencia de reserva determinada en un solo periodo.
- » **Vertido de ERV (MW máx. y TWh anual).** Ocurre cuando la salida de ERV tiene que

reducirse debido a la inflexibilidad del sistema o porque la generación de ERV supera la demanda. La herramienta muestra la cantidad máxima de vertido determinada en un solo periodo y la cantidad total vertida en un año.

- » **Vertido hidráulico (TWh).** Ocurre cuando el aporte de agua supera la cantidad que pueden usar los generadores de energía hidroeléctrica cuando los embalses están llenos. La herramienta muestra la cantidad total de energía vertida en un año.

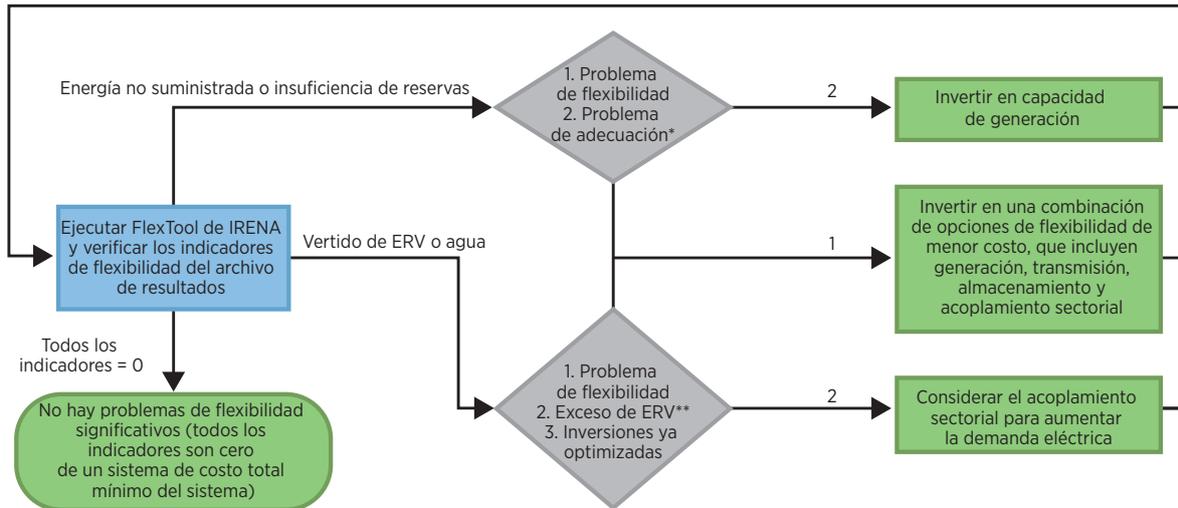
Todos estos están permitidos en la solución del modelo, pero agregan costos de penalización según lo definido en los datos de entrada. FlexTool intenta evitar los costos adicionales, pero a veces el sistema no tiene la capacidad o flexibilidad suficientes, y algunos de ellos aparecen en la solución óptima.

La insuficiencia de reservas y la energía no suministrada generalmente tienen penalizaciones elevadas y son problemas graves en la solución, y el usuario siempre debe verificar si los resultados son realistas. Por ejemplo, si la penalización por energía no suministrada es extremadamente alta, los costos de operación podrían ser demasiado altos con una cantidad muy pequeña de energía no suministrada, o, en caso de que se ejecute el modo de inversión, el modelo podría invertir en capacidad

de generación costosa e innecesaria solo para evitar una pequeña cantidad de energía no suministrada. Los vertidos de ERV e hidráulicos están asociados con penalizaciones más bajas. El usuario debe evaluar si esos resultados son razonables.

En la Figura 2 se proporciona una breve descripción general sobre cómo verificar y resolver problemas de flexibilidad en la herramienta FlexTool de IRENA.

Figura 2. Cómo verificar y resolver problemas de flexibilidad: guía rápida de la herramienta FlexTool de IRENA



* Un problema de adecuación implica que la generación anual es menor que la demanda anual y no existe congestión de transmisión.

** La generación excesiva de ERV significa que en algunos periodos la generación total de ERV es mayor que la demanda.

1.6 OBJETIVOS DEL ESTUDIO DE FLEXIBILIDAD

Figura 3. Objetivos de los estudios realizados con la herramienta FlexTool de IRENA



1.7 PARTES INTERESADAS Y PARTICIPACIÓN

La aplicación de FlexTool en un país generalmente comienza con una autoevaluación que muestra una brecha potencial en el proceso de planificación, o simplemente un interés en comparar el enfoque aplicado actualmente con el nuevo enfoque y la nueva herramienta de IRENA. La participación del conjunto correcto de partes interesadas es clave para hacer posible el estudio y garantizar la relevancia, la credibilidad y el impacto. Las partes interesadas clave incluyen el punto focal de IRENA (para identificar organismos o ministerios que puedan proporcionar los datos y comentar los resultados) y los responsables de la toma de decisiones (para comentar y usar los

resultados), por ejemplo, empresas de servicios públicos, operadores de sistemas de transmisión y ministerios.

Después de esto, IRENA envía una carta de invitación al país para iniciar la evaluación de flexibilidad y comienza a colaborar con el punto focal relevante para la recopilación y el análisis de datos, que puede o no ser el mismo que el que toma parte en el proceso de participación.

En la Tabla 3 se muestran las principales partes interesadas que participaron en la evaluación de flexibilidad en los cuatro casos de estudio desarrollados.

Tabla 3. Principales partes interesadas para la recopilación de datos en la evaluación de flexibilidad

	Colombia	Panamá	Uruguay	Tailandia
Participación		Empresa de Transmisión Eléctrica, S.A. (ETESA): operador del sistema de transmisión de Panamá		Departamento de Desarrollo y Eficiencia de Energía Alternativa (DEDE) del Ministerio de Energía
Recopilación de datos	UPME (Unidad de Planeación Minero-Energética)	Secretaría Nacional de Energía (SNE) Centro Nacional de Despacho (CND)	Ministerio de Industria, Energía y Minas (MIEM)	El DEDE y la Autoridad de Generación de Electricidad de Tailandia (EGAT), la Comisión Reguladora de Energía (ERC) y el Departamento de Riego Real.
Publicación	(IRENA, 2018a)	(IRENA, 2018b)	(IRENA, 2018c)	(IRENA, 2019)

1.8 IMPACTO OBSERVADO EN TRES CASOS DE ESTUDIO INICIALES

Colombia:

“Con base en los resultados del análisis con la herramienta FlexTool de IRENA, UPME planea agregar un capítulo sobre la flexibilidad del sistema eléctrico al próximo plan nacional de expansión del sector eléctrico, considerando el periodo 2018-2022”. (IRENA, 2018a)

Panamá:

“Agregar esta herramienta al proceso de planificación podría ayudar al país a diseñar políticas energéticas efectivas, en particular para desarrollar

un sector eléctrico flexible que sea compatible con las necesidades de descarbonización que implica el Acuerdo de París”. (IRENA, 2018b)

Uruguay:

“El MIEM reconoce que la herramienta FlexTool de IRENA es un complemento útil de estas herramientas, ya que proporciona un conjunto adicional de indicadores de flexibilidad y permite evaluaciones integradas del acoplamiento sectorial. FlexTool, por lo tanto, revela más opciones para aumentar la flexibilidad”. (IRENA, 2018c)

1.9 INDICADORES UTILIZADOS EN LOS ESTUDIOS DE FLEXIBILIDAD

Se utilizó un conjunto de indicadores de flexibilidad en los casos de estudio para medir 1) la flexibilidad en el sistema eléctrico con base en la información del país sobre el sistema actual y el sistema planificado para el futuro, 2) la flexibilidad en el sistema eléctrico como resultado de las simulaciones y 3) la flexibilidad restante en el sistema eléctrico.

El primer conjunto de indicadores se calcula en función de la recopilación de datos de entrada para los años presentes y futuros del país o región que se estudiará, mientras que los otros dos conjuntos de indicadores se calculan en función de los resultados de las simulaciones de la herramienta FlexTool de IRENA.

FACILITADORES DE FLEXIBILIDAD BASADOS EN LA INFORMACIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE UN PAÍS

Tabla 4. Facilitadores de flexibilidad de un sistema eléctrico específico

Facilitador	Unidades	Descripción
Capacidad de interconexión vs. demanda promedio	-	Muestra la relación entre la capacidad de interconexión con los países vecinos y la demanda eléctrica promedio.
Capacidades de rampa de los generadores	MW/min	Representa la capacidad de rampa total de la generación despachable del sistema (es decir, generación sin ERV), asumiendo que todas las unidades están conectadas.
Ajuste de la demanda con la generación de ERV	%	Muestra la correlación entre la serie temporales de demanda y la serie de tiempo de ERV.
Estabilidad de aportes hídricos	%	Muestra la desviación estándar y la variabilidad de los aportes hídricos históricos.
Resistencia de la red interna	-	Expresa qué tan sólida es la red interna y si hay suficiente capacidad de transmisión en el sistema.
Almacenamiento vs. demanda anual	%	Muestra la capacidad de almacenamiento disponible (incluidos los embalses hidroeléctricos) en comparación con la demanda anual total.
Dispersión geográfica de la generación de ERV y demanda	-	Muestra qué tan bien la generación de ERV y la demanda de electricidad se comparan geográficamente (a nivel nodal).
ERV vs. demanda mínima	-	Representa la probabilidad de sobregeneración de ERV al comparar la capacidad instalada de ERV con la demanda mínima. Cuanto más alta sea la relación, más probable es que, en ausencia de almacenamiento, se produzca un vertido de ERV. Este indicador debe evaluarse en conjunto con el indicador de almacenamiento.

INDICADORES DE FLEXIBILIDAD DE FLEXTOOL

Tabla 5. Indicadores de flexibilidad evaluados por la herramienta FlexTool de IRENA

Indicador	Unidades	Descripción
Vertido de ERV	Gigavatios por hora (GWh) y MW	Ocurre cuando la salida de ERV tiene que reducirse debido a la inflexibilidad del sistema o porque la generación de ERV supera la demanda.
Energía no suministrada	GWh y MW	Ocurre cuando la oferta no puede satisfacer la demanda, y parte de la demanda de electricidad debe quedar desatendida (por ejemplo, la llamada desconexión de carga).
Vertido hidráulico	GWh y MW	Ocurre cuando el aporte de agua excede la cantidad que los generadores de energía hidroeléctrica pueden usar y los embalses ya están llenos.
Insuficiencia de reserva*	GWh y MW	Ocurre cuando el requisito de reserva no se puede cumplir.

* Tenga en cuenta que el modelo solo considera las reservas como capacidad (MW), que posteriormente no estará disponible para generar. Las reservas en FlexTool nunca se activan y, por lo tanto, para el indicador de insuficiencia de reservas, las unidades no son energía (GWh), sino potencia multiplicada por horas.

INDICADORES PARA MEDIR LA FLEXIBILIDAD RESTANTE EN EL SISTEMA

Indicador	Unidades	Descripción
Capacidad de rampa residual	MW/min	Mide cuánta capacidad de rampa de la generación despachable (es decir, la generación sin ERV) estará disponible para el sistema en el siguiente periodo de tiempo (generalmente una hora). El indicador se refiere a la capacidad de rampa ascendente, ya que la rampa descendente no es un problema, puesto que se puede suministrar casi instantáneamente mediante plantas de ERV a gran escala en los casos en que los generadores térmicos puedan ser demasiado lentos o que ya estén operando en su mínimo técnico.
Cuota de tiempo cuando la transmisión no está congestionada	%	Mide la capacidad de transmisión promedio disponible en el sistema y muestra los corredores de transmisión más congestionados entre zonas. Dado que la representación de FlexTool de la transmisión no analiza el flujo de energía de corriente alterna (CA), este valor es una aproximación de corriente continua (CC). Esto solo se aplica a los modelos con más de un nodo.
Capacidad de interconexión restante	%	Mide cuánta capacidad de interconexión está disponible en el sistema en promedio. El indicador también puede capturar la presencia (o ausencia) de operaciones transfronterizas activas.
Capacidad no utilizada de embalses hidroeléctricos	%	Mide cuánta capacidad de almacenamiento disponible no se usa en los embalses hidroeléctricos, es decir, a qué distancia están los embalses del vertido de agua (por ejemplo, si la capacidad no utilizada del embalse es del 0 %, entonces los embalses están llenos y el agua podría derramarse).

Nota: todos los indicadores se estiman para el promedio anual de todos los periodos de tiempo (generalmente de una hora) y para el periodo de tiempo (o intervalo de tiempo) más crítico, que representa las peores condiciones para cada uno de los indicadores en un escenario modelado (por ejemplo, la hora con la capacidad de rampa más baja).

1.10 EJEMPLOS DE APLICACIÓN

Para mostrar cómo la herramienta puede ser útil para identificar problemas de flexibilidad y proponer soluciones, se muestra un conjunto de ejemplos representativos:

EJEMPLO A

Problema:

El sistema que se analiza tiene cuatro nodos y tres líneas eléctricas. La demanda está concentrada en el nodo oeste, mientras que en el nodo sur hay un

exceso de penetración de ERV. Sin embargo, la línea eléctrica que conecta el sur y el oeste es muy débil y da como resultado energía no suministrada en el nodo oeste y un vertido de ERV en el nodo sur.

Solución:

En esta situación, el sistema puede considerar invertir en capacidad de transmisión adicional entre el sur y el oeste o invertir en ERV con almacenamiento en algunos de los nodos del sistema. Este análisis se resuelve con la fase de inversión de FlexTool.

Figura 4. Diagrama simplificado del sistema eléctrico analizado e indicadores de flexibilidad

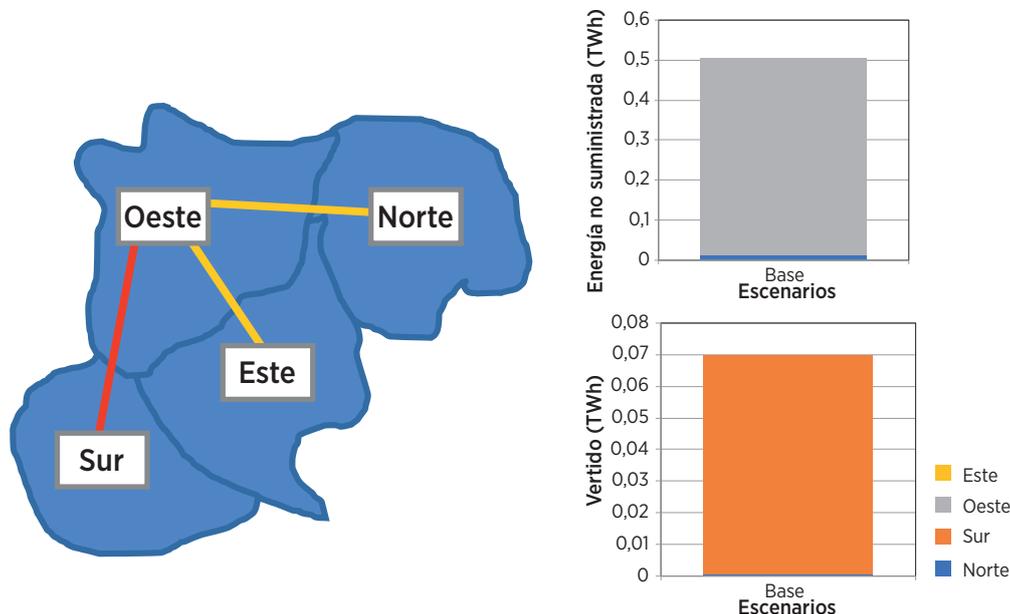
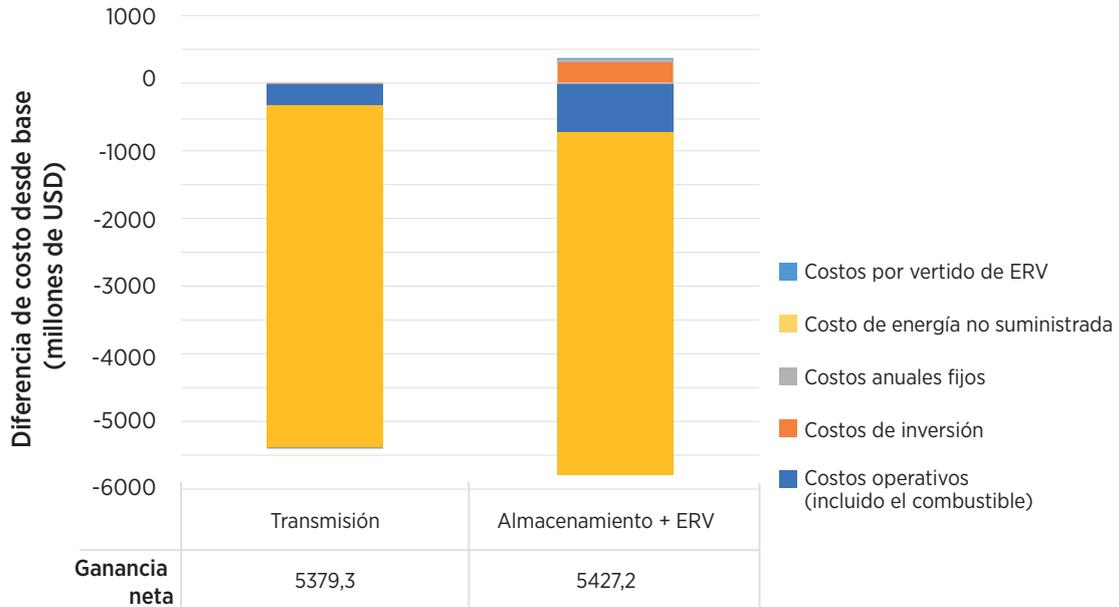


Figura 5. Comparación de costos de inversión en transmisión y en ERV con almacenamiento



EJEMPLO B

Problema:

El sistema que se analiza tiene una penetración de energía solar fotovoltaica muy alta, creando lo que se conoce como *duck curve*. El resto del parque de generación está compuesto por generación térmica de rampa baja con una capacidad de rampa ascendente de 102 MW por hora. El gran requisito de rampa que introduce la energía solar fotovoltaica en el sistema se traduce en energía no suministrada y vertido de ERV, ya que el parque térmico no tiene

suficientes capacidades de rampa. El vertido se produce cuando la energía solar fotovoltaica está reduciendo su generación para evitar la energía no suministrada tanto como sea posible.

Solución:

El sistema necesita capacidad de rampa adicional. La solución más común ha sido instalar generación térmica flexible (por ejemplo, turbinas de gas de ciclo abierto o turbinas de gas de ciclo combinado), pero FlexTool puede considerar almacenamiento o acoplamiento sectorial. En la figura se muestra un ejemplo con baterías.

Figura 6. Vertido de ERV y energía no suministrada como resultado de la baja capacidad de rampa de las unidades térmicas

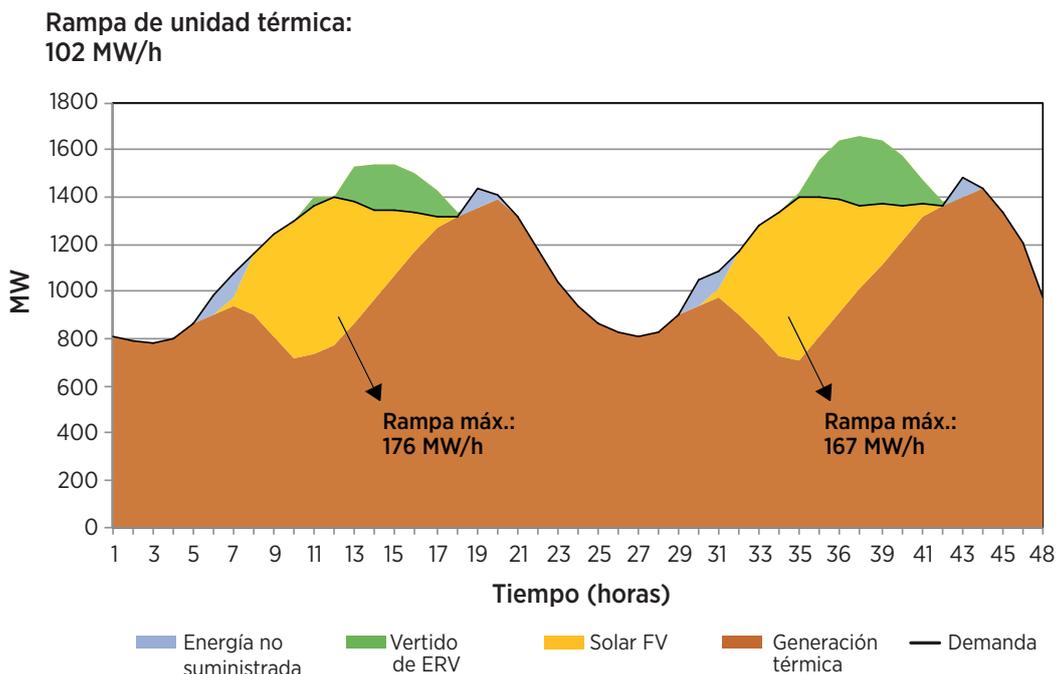
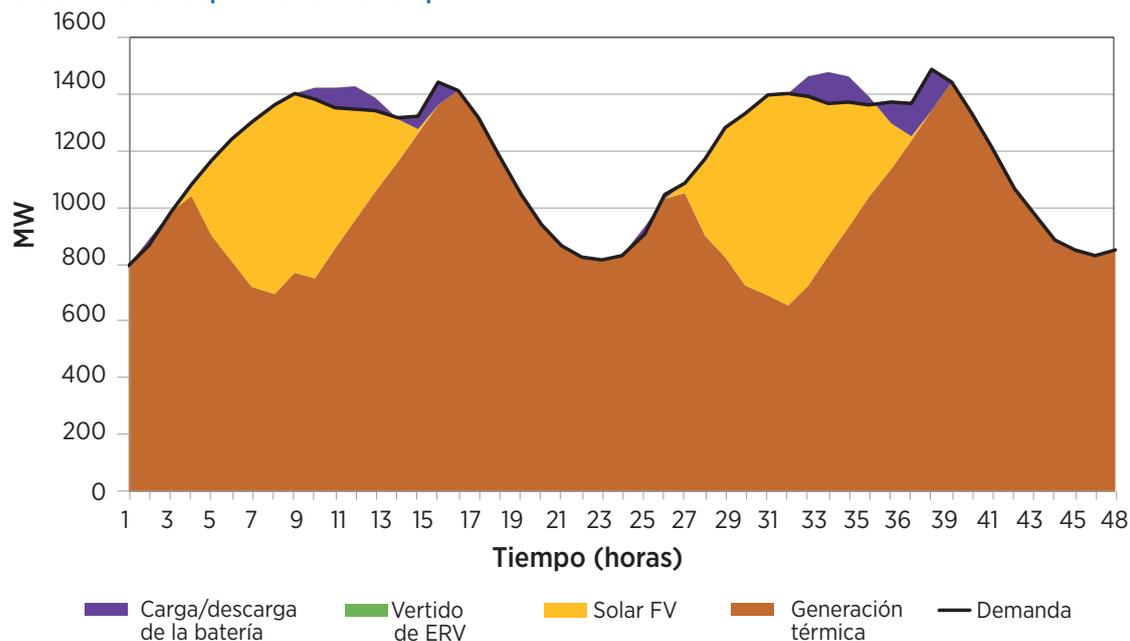


Figura 7. El almacenamiento como solución a algunos de los problemas de flexibilidad, al proporcionar altas capacidades de rampa



LECTURAS COMPLEMENTARIAS

IRENA (2018a), *Evaluación de la flexibilidad del sistema eléctrico de Colombia: Caso de estudio de la herramienta FlexTool de IRENA.*

Agencia Internacional de Energías Renovables, Abu Dabi.

IRENA (2018b), *Evaluación de la flexibilidad del sistema eléctrico de Panamá: Caso de estudio de la herramienta FlexTool de IRENA.*

Agencia Internacional de Energías Renovables, Abu Dabi.

IRENA (2018c), *Evaluación de la flexibilidad del sistema eléctrico de Uruguay: Caso de estudio de la herramienta FlexTool de IRENA.*

Agencia Internacional de Energías Renovables, Abu Dabi.

IRENA (2018d), *Flexibilidad del sistema eléctrico para la transición energética. Parte 1: Panorama general para los encargados de formular políticas,* Agencia Internacional de Energías Renovables, Abu Dabi.

IRENA (2018e), *Flexibilidad del sistema eléctrico para la transición energética. Parte 2: Metodología de la herramienta FlexTool de IRENA,* Agencia Internacional de Energías Renovables, Abu Dabi.

IRENA (2019), *Evaluación de la flexibilidad del sistema eléctrico de Tailandia: Caso de estudio de la herramienta FlexTool de IRENA.* Agencia Internacional de Energías Renovables, Abu Dabi.

Descargue la herramienta FlexTool de IRENA:

irena.org/energytransition/Energy-System-Models-and-Data/IRENA-FlexTool



www.irena.org

Copyright © IRENA 2019