GOBIERNO NACIONAL
CON PASO FIRME

GACETA OFICIAL

Edición Digital

AÑO **Panamá, R. de Panamá jueves 19 de noviembre de 2026** **N° 30656 A**

CONTENIDO

AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

Resolución AN N° 22195-Elec
(viernes 16 de octubre 2026)

POR LA CUAL SE APRUEBA EL PLAN DE EXPANSIÓN DEL SISTEMA INTERCONECTADO NACIONAL CORRESPONDIENTE AL AÑO 2025, PRESENTADO POR LA EMPRESA DE TRANSMISIÓN ELÉCTRICA, S.A. (ETESA). TOMO III

República de Panamá

AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

Resolución AN No. 22195 -Elec Panamá, 16 de octubre de 2026

"Por la cual se aprueba el Plan de Expansión del Sistema Interconectado Nacional correspondiente al año 2025, presentado por la Empresa de Transmisión Eléctrica, S.A. (ETESA)"

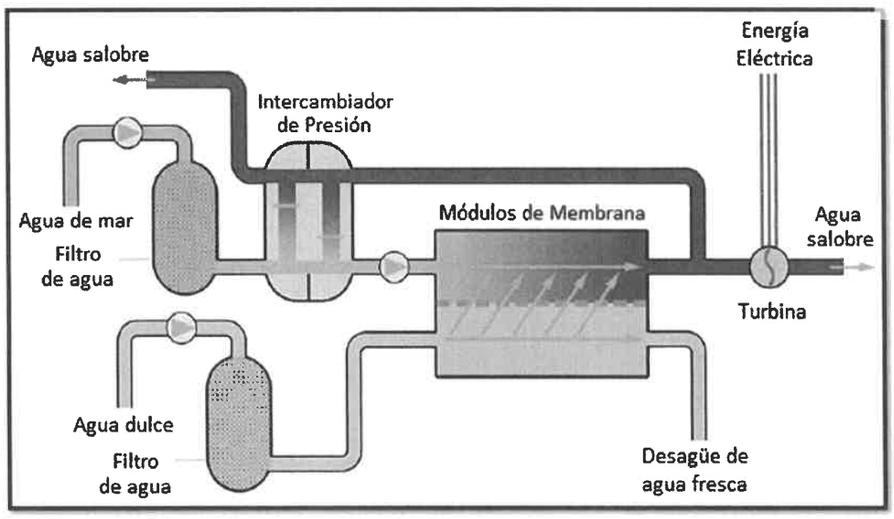
TOMO III

Pág. 401 a pág. 600

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

401

Figura 39: Ciclo operativo de una central osmótica por presión invertida



Referencia: (National Renewable Energy Laboratory, 2012)

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

Geotérmica

Las centrales geotérmicas aprovechan el potencial energético de algún tipo de fluido de trabajo proveniente de reservorios encontrados bajo tierra para el uso indirecto de producción de energía eléctrica y/o uso directo. El uso directo no involucra conversiones de energía térmica a eléctrica, por consiguiente, ésta es utilizada para calefacción y/o enfriamiento de recintos, procesos industriales y agrícolas.

La alta temperatura de la energía geotérmica se encuentra en zonas activas de la corteza. El vapor llega a la superficie y mediante una turbina se puede generar la electricidad.

Con todo, se necesita que haya condiciones favorables regidas por ciertos parámetros para que se dé la posibilidad de un campo geotérmico.

En la Figura 40 pueden observarse algunas de las aplicaciones más comunes para el cual el potencial geotérmico es aplicado y su rango de temperatura. Para describir una central geotérmica tenemos que comenzar diciendo que se trata de una zona "sembrada" de grandes tuberías, que conducen el vapor desde los pozos geotérmicos hasta las plantas generadoras.

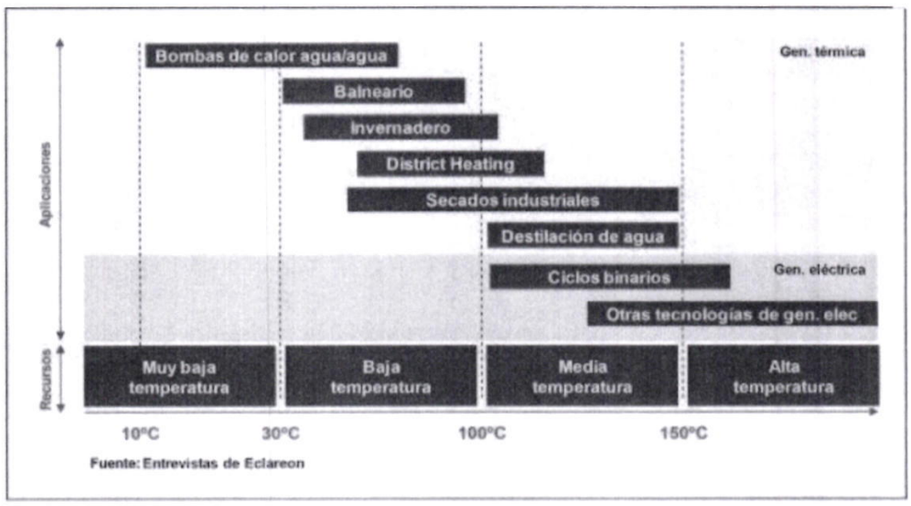
Otras tuberías extraen vapor de los pozos. Las cañerías tienen forma de curvas a intervalos regulares que hacen posible que los enormes tubos se expandan y contraigan al calentarse y enfriarse. Actualmente existen tres tipos de configuraciones de centrales geotérmicas, y la selección de éstas depende del estado del fluido de trabajo (vapor o agua) y sus temperaturas. En las siguientes secciones se explican cada una de las configuraciones con mayor detalle.

En la Figura 41 se puede observar los usos directos de la energía geotérmica tanto industriales como agrícolas con sus respectivos rangos de temperatura.

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

403

Figura 40: Diagrama Lineal de temperatura de agua y vapor geotérmico recomendado para diversas aplicaciones

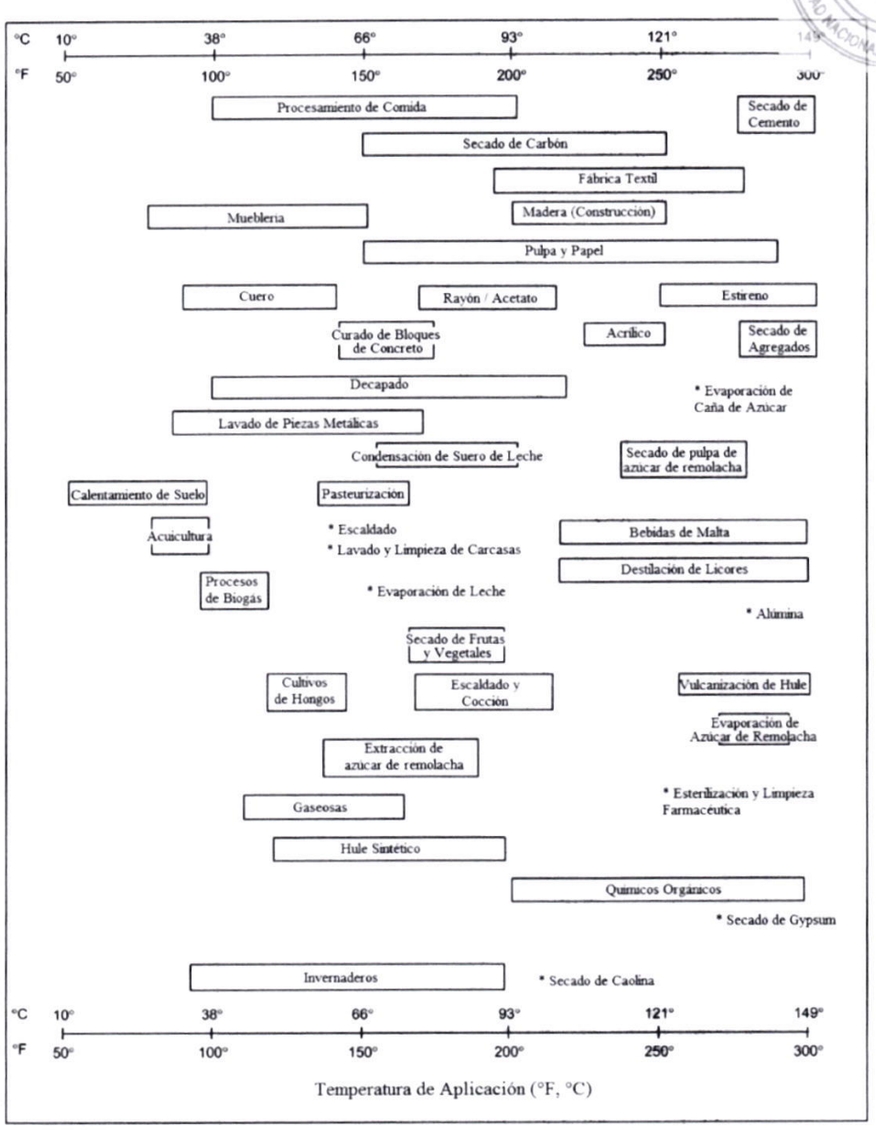


Referencia: (Caloryfrio, 2016)

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

Figura 41: Usos directos del recurso geotérmico: Rangos de temperatura de algunos procesos industriales y aplicaciones agrícolas



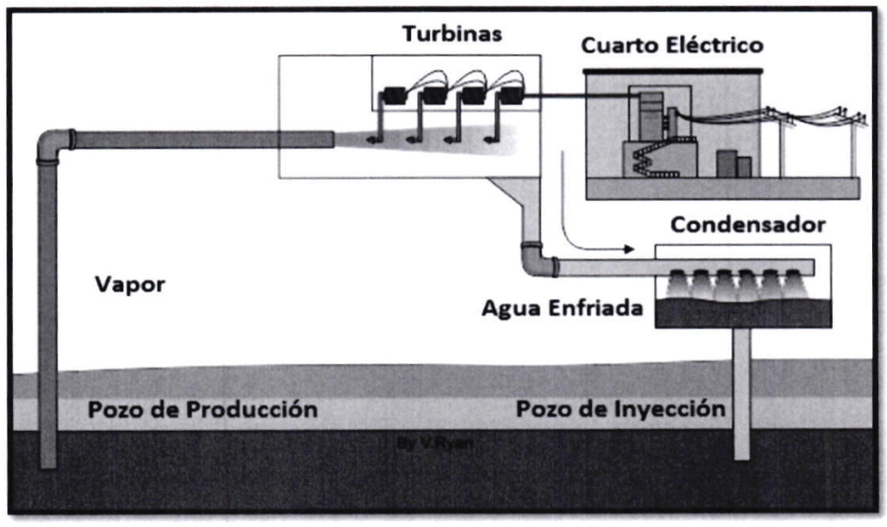
Referencia: (Jóhannesson & Chatenay, 2014)

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

Vapor Seco

Es una de las configuraciones convencionales más antiguas, siendo la primera construida en el año 1904. Con este diseño, agua en fase de vapor sobrecalentado y de temperaturas superiores a 150°C es extraído desde los reservorios y es utilizado para impulsar las turbinas y producir energía eléctrica. Una porción del vapor es posteriormente condensado y reingresado al reservorio con la finalidad de reutilizarlo en el ciclo, mientras que la otra porción del vapor es evacuada hacia el ambiente. En la Figura 42 se presenta una configuración típica de una central geotérmica que opera con vapor seco. Centrales de generación geotérmica con este esquema tienen costos de inversión relativamente bajos en comparación con los demás esquemas; adicionalmente, son altamente eficientes, llegando a valores de entre 50% y 70%. La principal restricción para implementar esta tecnología es encontrar reservorios con buen potencial de vapor. Otros aspectos que deben tomarse en cuenta con estas centrales son las concentraciones de gases no condensables en el vapor que sean expulsados al ambiente, la alta corrosividad que puede afectar los elementos de la central.

Figura 42: Central geotérmica accionada por vapor seco



Referencia: (Save the Earth, 2016)

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

Vapor por Destello

Una de las configuraciones convencionales más utilizadas para la producción de energía eléctrica. A diferencia de las centrales geotérmicas de vapor seco, éstas utilizan agua en fase líquida con temperaturas mayores a 200°C y altas presiones de operación. Siguiendo el esquema de referencia de la Figura 43, el agua es bombeada y transportada a un tanque en donde la presión del fluido es reducida drásticamente, lo cual provoca el repentino cambio de fase de líquido a vapor (de ahí el nombre de destello de vapor).

La parte del agua convertida a vapor sigue el mismo recorrido que en la configuración de una central de vapor seco; la parte del agua que se mantuvo en fase líquida se combina con el condensado del vapor usado en las turbinas para ya sea ser reinyectado al reservorio, para un segundo tanque para producir vapor por destello nuevamente y generar más electricidad, o algún uso directo de calor. Las eficiencias energéticas globales son función de las veces que el fluido es destellado y si éste es utilizado para otros procesos aparte de el de la producción de generación eléctrica. Si se destella una vez, eficiencias se encuentran entre 30% y 35%; si se destellan dos veces, 35% y 45%.

Si se agregan intercambiadores de calor para el proceso de producción de agua caliente, la eficiencia global es incrementada gradualmente.

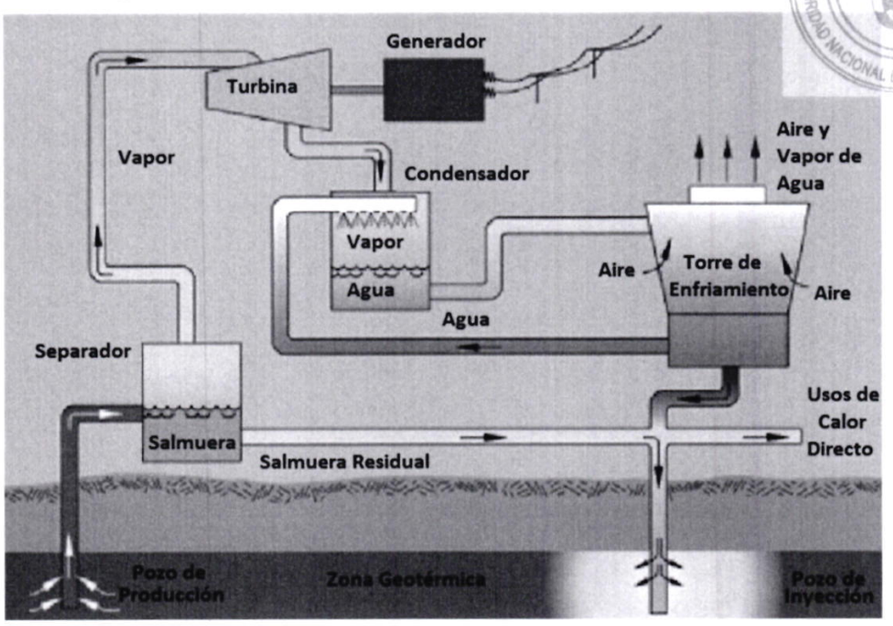
Centrales geotérmicas de vapor por destello sencillo requieren de un bajo costo de inversión, pero para poder ser competitivas deben disponer de un recurso geotérmico a temperaturas superiores a los 200°C; por otra parte, centrales con destello doble demandan mayor costo de inversión y para ser competitivas deben contar con el recurso geotérmico a temperaturas superiores a los 240°C.

Independientemente de la cantidad de veces que sea destellado el vapor, los costos de operación y mantenimiento aumentan considerablemente si el recurso tiene una alta concentración de minerales.

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

407

Figura 43 : Central geotérmica accionada por destello de vapor de una etap



Referencia: (The National Academies Press, 2013)

Ciclo Binario

Es la configuración más reciente e innovadora dentro del grupo y se espera que futuras instalaciones de centrales geotérmicas adopten este arreglo ya que operan con el ciclo Rankine orgánico o también con el ciclo Kalina. El agua está a temperaturas cercanas a 60°C son transportadas a un Figura 44 permite visualizar mejor el principio de funcionamiento del ciclo. En comparación con las tecnologías antes mencionadas, éste es un ciclo cerrado, lo cual significa que los fluidos primarios y secundarios no se mezclan durante el proceso y esto conlleva a una disminución en las evacuaciones de vapor y gases nocivos al ambiente virtualmente nulas.

intercambiador de calor en donde se transfiere su energía a un fluido de trabajo secundario con una temperatura de ebullición muy inferior que la del agua, causando que éste cambie de fase líquida a vapor y sea el que impulse las turbinas. La

Adicionalmente, no se requiere que las temperaturas del agua proveniente del reservorio sean tan elevadas. Una gran desventaja de este ciclo de operación es que la eficiencia del sistema es ligeramente inferior a las demás técnicas. Por ejemplo:

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

408

- Usando el ciclo Rankine Orgánico se pueden alcanzar eficiencias entre 25% y 45%.
- Con el ciclo Kalina pueden obtenerse eficiencias entre el 30% y 65%.

Los costos de operación y mantenimiento para una central de ciclo Rankine Orgánico son muy elevados debido a que el recurso contiene una mayor concentración de salinidad que puede afectar los elementos de la planta. En contraste, los costos de inversión y la complejidad tecnológica son muy elevados para centrales que utilizan el ciclo Kalina debido a que este esquema es relativamente nuevo.

La reducción de los costos de inversión para centrales con el ciclo Kalina la harán más competitiva contra la del ciclo Rankine Orgánico solamente cuando haya se efectúen más estudios de diseño y desarrollo.

Las centrales geotérmicas superan a las centrales térmicas que utilizan recursos no renovables (combustibles fósiles) en los siguientes aspectos:

- Cuentan con recurso energético confiable, abundante y renovable puesto que el agua puede ser reingresada al reservorio para producir más vapor.
- Reducción en el espacio físico de la central generadora ya que no se requiere de un depósito para el almacenamiento del combustible.
- Sus costos efectivos son más baratos debido a que no dependen de las variaciones de los precios del combustible.
- Las emisiones de gases de efecto invernadero son menores.

A pesar de las ventajas descritas anteriormente, la producción de energía eléctrica mediante esta tecnología lleva integrado intrínsecamente las siguientes desventajas:

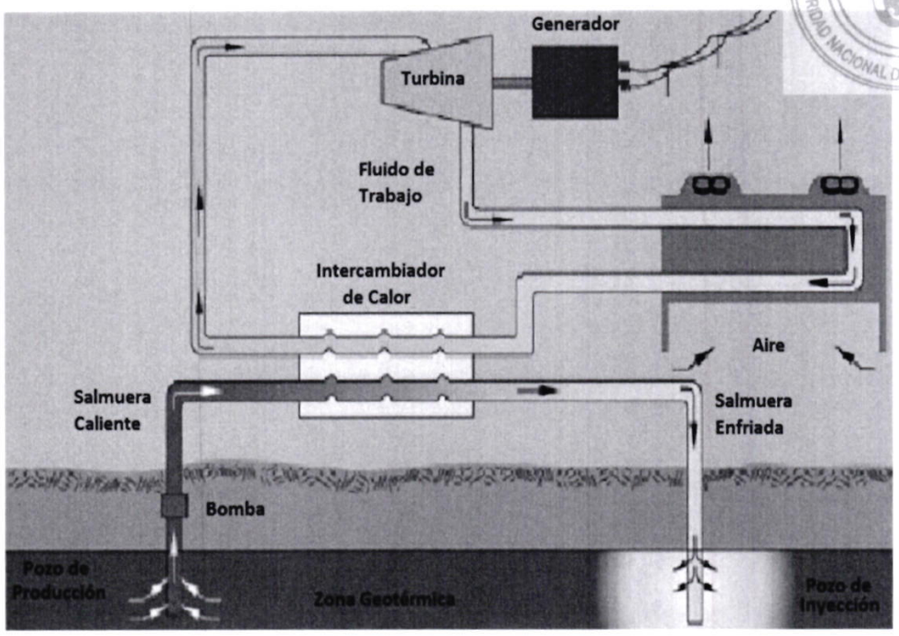
- La producción de energía puede verse limitada por el agotamiento del recurso hídrico en los reservorios.
- Los respiraderos naturales no son accesibles en su totalidad y solamente lo están en ubicaciones selectas. Por otra parte, los respiraderos artificiales son muy lejanos y profundos en la tierra para ser lo suficientemente efectivos.

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

409

Figura 44 : Central geotérmica de ciclo binario de una etapa



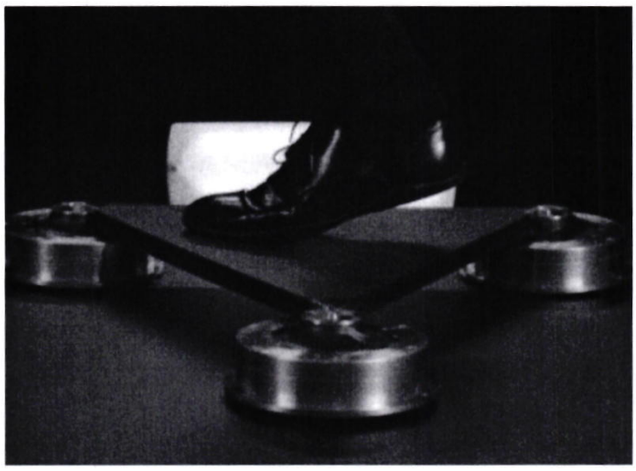
Referencia: (The National Academies Press, 2013)

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

Piezoelectricidad

La piezoelectricidad es una propiedad que tienen ciertos cristales de polarizarse eléctricamente cuando son sometidos a presión, y a la inversa. Esta propiedad es aprovechada por la empresa Pavegen que desarrolla aceras que convierten los pasos en electricidad, con un diseño de acera formada por un pavimento especial componiéndose de baldosas triangulares como se puede observar en la Figura 45 en las cuales cada esquina contiene un generador electromagnético, que se comprime cuando alguien pasa por encima. Al realizar este movimiento hacia abajo y hacia arriba se genera la electricidad. Tiene distintas aplicaciones a parte de la recolección de electricidad, como para encender luces, mecanismos, ser almacenada en baterías, respuestas sonoras, ect.

Figura 45: Baldosa piezoeléctrica Pavegen



Referencia: (Plataforma Arquitectura, 2019)

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

Tecnologías de Almacenamiento de Energía Eléctrica

El sistema de energía eléctrica debe abordar dos requisitos únicos: la necesidad de mantener un equilibrio casi en tiempo real entre la generación y la carga, y la necesidad de ajustar la generación (o carga) para administrar los flujos de energía a través de las instalaciones de transmisión individuales.

La demanda eléctrica es la suma de los requisitos de energía de miles de usuarios diferentes, desde hogares individuales hasta grandes empresas industriales y comerciales, todos los cuales pueden cambiar las cargas, con magnitudes muy diferentes, en horarios convenientes para cualquier actividad que realicen en el momento.

Esperan que la energía esté disponible a pedido y no consultan a la empresa de servicios públicos para advertirles con anticipación.

Debido a los impactos ambientales notorios en la actualidad, el almacenamiento de electricidad juega un papel crucial en la búsqueda de una matriz energética con más fuentes de energía renovable. Junto con el impulso de generación de energía solar y eólica, se permite la aguda descarbonización en segmentos clave del mercado energético.

Las tecnologías de producción de energía renovables no convencionales dependen de la disponibilidad momentánea del recurso, por lo que son consideradas como fuentes intermitentes. Con la finalidad de mitigar tal variabilidad, se recurren a los sistemas de acumulación de energía, los cuales permiten almacenar la energía en el momento en que se tiene disponible y posteriormente utilizarla cuando sea necesario.

La capacidad de almacenamiento de electricidad puede reducir las restricciones en la red de transmisión y puede aplazar la necesidad de grandes inversiones en infraestructura. Esto también se aplica a la distribución, independientemente de si las restricciones reflejan el crecimiento en energías renovables o un cambio en los patrones de demanda.

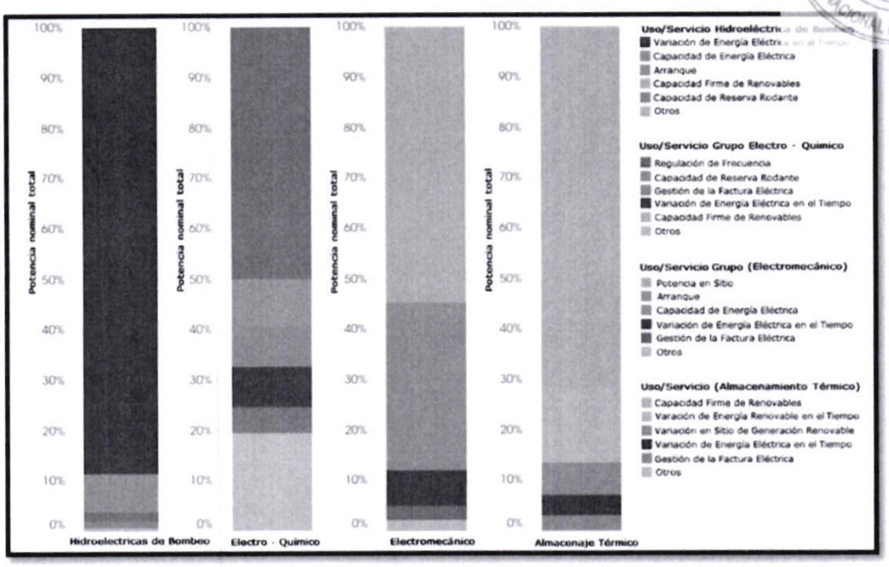
Dependiendo de la duración de la falta de coincidencia, el suministro inmediato se mantiene mediante la llamada "reserva rodante" o baterías hasta que un generador alternativo a más largo plazo entre en funcionamiento para asumir la carga.

Para satisfacer esta demanda, el sector eléctrico debe evaluar una gama de activos "lentos" y "rápidos" optimizados para satisfacer los componentes fijos y variables de la demanda y de sus necesidades, pero generalmente se necesitan activos de almacenamiento con acción particularmente rápida, que proporcionen la flexibilidad necesaria para enfrentar este desafío. Esto se muestra en la Figura 46.

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

412

Figura 46 : Capacidad Global de almacenamiento de Energía por Uso y Tecnolo



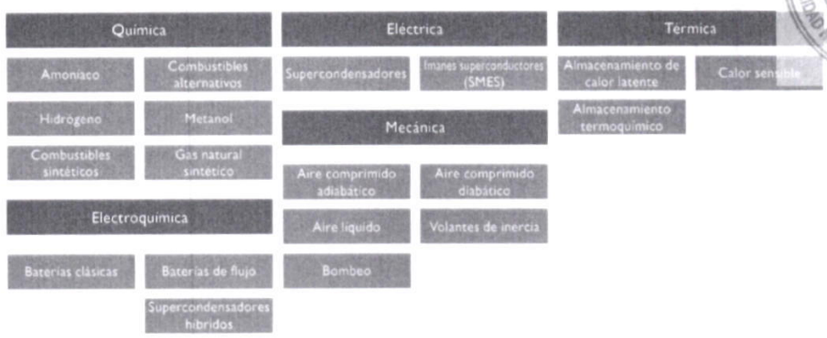
Referencia: (Irena Electricity Storage Cost, 2017)

En función de la tecnología de generación de energía eléctrica, se presentan en las siguientes secciones las diferentes alternativas disponibles de sistemas de acumulación de energía. La Figura 47 presenta un resumen de las tecnologías de almacenamiento de energía eléctrica; análogamente, en la Figura 48 se muestra la curva de madurez de las tecnologías de almacenamiento de energía. La Figura 49 y la Figura 50 son las comparaciones por tecnología en base al tiempo de descarga y a la densidad de energía y de potencia respectivamente.

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

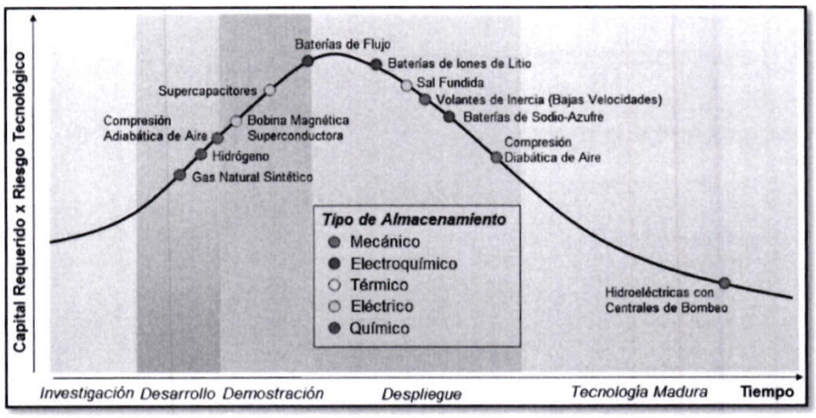
413

Figura 47 : Sistemas de almacenamiento de energía eléctrica



Referencia: (MITECO, 2021)

Figura 48: Curva de madurez de tecnologías de almacenamiento de energía eléctrica

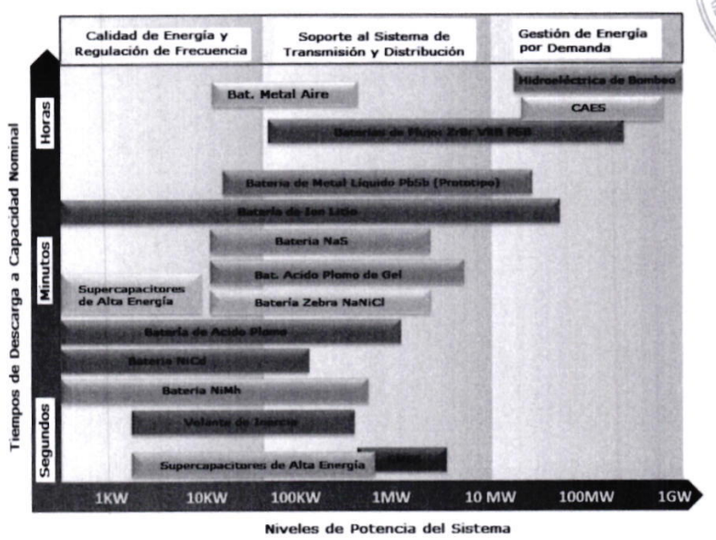


Referencia: (Scottish Renewables, 2016)

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

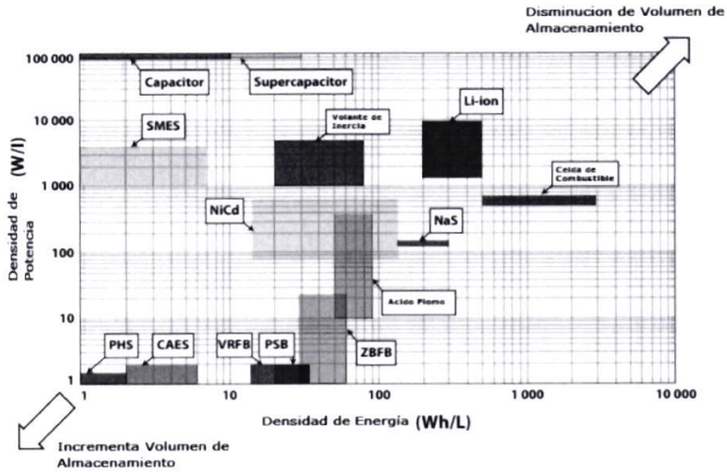
414

Figura 49: Gráfico de Comparación de Tiempos de Descarga por Tecnología



Referencia: (Irena Electricity Storage Cost, 2017)

Figura 50: Comparación mediante densidades de energía y potencia por Tecnología



Referencia: (Irena Electricity Storage Cost, 2017)

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ
AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS
415

Hidroeléctricas con Centrales de Bombeo

El bombeo hidráulico es un sistema de almacenamiento muy desarrollado y utilizado para producción de energía a gran escala, el cual, es su único fin, y se combina muy fácilmente con sistemas eólicos, donde la energía sobrante se utiliza para revertir el agua. Son centrales hidroeléctricas que tienen dos reservorios a diferentes elevaciones, en el cual se bombea agua durante horas valle desde el reservorio inferior hacia el reservorio superior.

En horas pico o cuando sea requerido por el sistema, el agua es turbinada desde el reservorio superior hacia el inferior para producir energía eléctrica. Mientras que los reservorios superiores son usualmente los mismos embalses o un embalse a mayor altura, existen varias alternativas técnicamente viables para los reservorios inferiores: pozos de minas inundadas, cavernas u otras cavidades subterráneas, e incluso el mar abierto. De ser posible, es recomendable que el reservorio inferior sea subterráneo, ya que se logra evitar la evaporación del agua.

Este tipo de centrales hidroeléctricas son reversibles, ya que los generadores pueden operar como motores, y las turbinas como bombas. Bajo esta configuración de central hidroeléctrica, su eficiencia oscila entre un 70% y 85%: tienen un rendimiento más bajo cuando operan como bombas que como turbinas.

Las principales ventajas de estas centrales son un tiempo de vida más extendido y la disposición del recurso virtualmente inagotable; por otra parte, las mayores limitaciones de las centrales son una gran dependencia de las condiciones topológicas y un mayor uso requerido de tierra inundable. En cuanto a problemas operativos se han identificado:

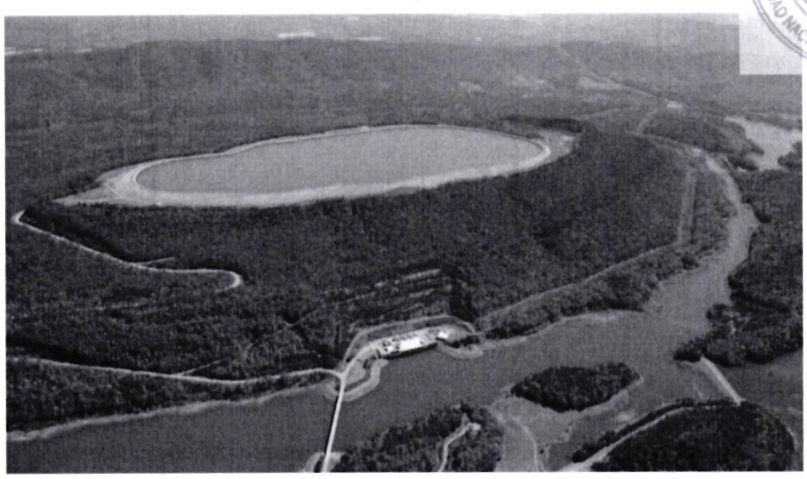
- Problemas de cavitación: la casa de máquinas debe ubicarse de tal manera que la bomba opere sumergida en todo momento.
- El cambio de dirección del flujo del agua incrementa la probabilidad de agrietamiento debido a fatiga en la estructura.
- El flujo del agua durante el modo de bombeo tiende a elevar la máquina axialmente, provocando mayores esfuerzos de tensión en cojinetes.
- Las parrillas retenedoras de basura sufren de vibraciones extremas en modo de bombeo.

En la Figura 51 puede apreciarse un proyecto desarrollado de central hidroeléctrica con bombeo. La central más grande del mundo (Bath County) tiene una capacidad instalada de 2100 MW está ubicada en Virginia, Estados Unido.

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

416

Figura 51: Central Hidroeléctrica con Bombeo de agua dulce Rocky Mountain (1095 MW) ubicada en el estado de Georgia, Estados Unidos.



Referencia: (Canary Systems, 2016)

Aire líquido

También conocido como LAES (Liquid Air Energy Storage), este sistema emplea el aire líquido como vector energético y puede integrarse en procesos de calor y frío residual industriales. El proceso se lleva a cabo en una planta de licuefacción de aire industrial que emplea energía eléctrica para enfriar el aire ambiente, hasta producir aire líquido (criogénico) que se almacena en un tanque aislado a baja presión. Cuando se requiere energía, el aire líquido es presurizado, re-gasificado y expandido en una turbina para generar electricidad. Este almacenamiento puede acompañarse de dos sistemas de almacenamiento térmico asociados a cada uno de los procesos de compresión y expansión de aire (foco frío y caliente). La implementación de estos sistemas permite incrementar la eficiencia de la conversión.

Aire Comprimido

El almacenamiento de energía mediante aire comprimido o CAES (Compressed Air Energy Storage) consiste en almacenar aire a altas presiones de 60-70 bar en cubículos bajo tierra. Dicho aire se presurizará de forma progresiva con enfriamientos intermedios en el proceso para lograr un mayor rendimiento de energía en periodos donde se posea energía excedente. La compresión de aire se realizará normalmente en las horas de bajo consumo (horas valle) para

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

417

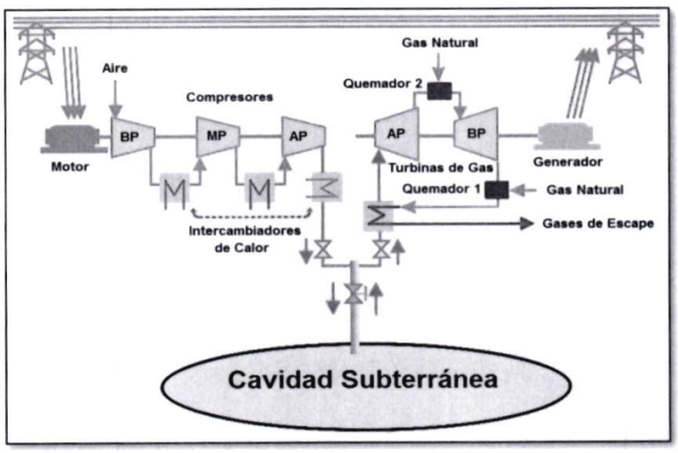
después producir energía en las horas pico. Posteriormente mezclarlo con gas natural, quemarlo y expandirlo en una turbina de gas modificada y producir energía eléctrica en las horas de demanda pico.

Existen actualmente dos tipos de compresión: diabática y adiabática; la primera alternativa ha sido implementada y demostrada desde el siglo XIX, mientras que la última se encuentra en fase de desarrollo. En un proceso de compresión diabática, el calor liberado durante la compresión es disipado por enfriamiento y éste no se almacena, por lo que el aire debe recalentarse previamente para su expansión en la turbina. En contraste, en un proceso de compresión adiabática, el calor liberado durante la compresión del aire es almacenado en un depósito térmico (por ejemplo, rocas porosas) y utilizado durante su expansión en la turbina.

En la mayoría de las ocasiones estos compartimentos donde se almacena el aire son antiguas minas, pozos petrolíferos o de gas natural o acuíferos, lo cual permite un almacenaje de aire masivo y sin los enormes costes que supondrían la realización del cubículo subterráneo.

La principal ventaja de estas centrales es su gran capacidad de almacenamiento; sin embargo, se restringen por su baja eficiencia global (menores a 50%) y por su disponibilidad geográfica. En la Figura 52 y Figura 53 se puede observar los esquemas de funcionamiento.

Figura 52: Central con almacenamiento por compresión diabática de aire.

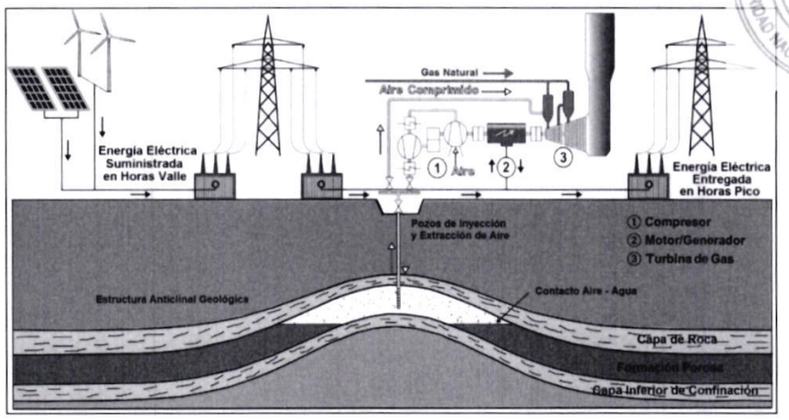


Referencia: (Huang, y otros, 2017)

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

418

Figura 53: Central con almacenamiento por compresión adiabática de aire.



Referencia: (Wang & Bauer, 2017)

Una innovadora alternativa de almacenamiento de energía por compresión de aire ha sido implementada: compresión submarina de aire. La idea consiste en aprovechar los principios y conceptos termodinámicos y mecánica de fluidos en un sistema de almacenamiento submarino: el almacenamiento del aire comprimido se da en acumuladores flexibles instalados cerca del fondo de lagos y océanos.

A medida que el aire ingresa, los acumuladores se expanden como un globo; la presión de diseño del aire dentro del acumulador se iguala a la presión hidrostática ejercida por el agua que rodea el acumulador, lo cual mantiene el aire comprimido en el acumulador incluso cuando éste se encuentra parcialmente lleno.

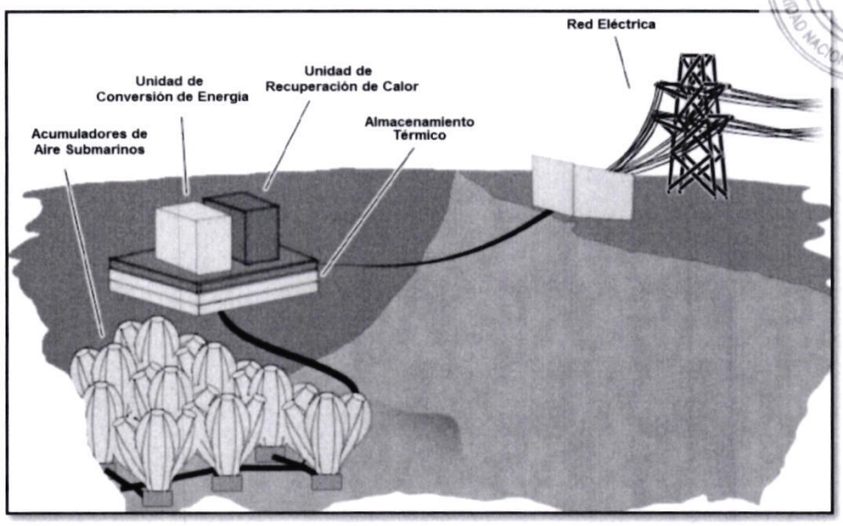
Esta alternativa resulta ser muy ventajosa en comparación con el uso de contenedores rígidos que experimentan una reducción en la presión a medida que el volumen de aire almacenado disminuye. En otras palabras, el aire comprimido en sistemas submarinos mantiene una presión constante independientemente del volumen.

Adicionalmente, durante el proceso de compresión del aire, el calor es almacenado en una plataforma cercana hasta por ocho horas antes de ser utilizado en el ciclo de descarga. Cada uno de estos principios físicos contribuyen a una mejora en la eficiencia global del ciclo de un 60% hasta un 80%. Se puede observar un diagrama de este sistema en la Figura 54.

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

419

Figura 54 : Sistema de almacenamiento de energía por compresión submarina de aire



Referencia: (Windpower Engineering & Develpment, 2014)

Almacenamiento de Aire Comprimido Isotérmico

La energía se puede almacenar en aire comprimido, con pérdidas mínimas de energía, y liberarse cuando más tarde se deja expandir el aire al igual que muchos almacenamientos de energía de aire comprimido tradicional, almacenan energía en formaciones geológicas subterráneas como las cavernas de sal. Sin embargo, en estos sistemas isotérmicos, el aire se calienta cuando se comprime y se enfría cuando se expande.

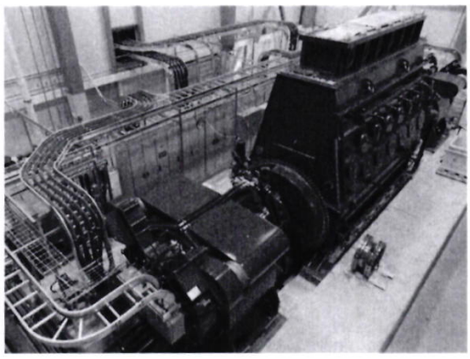
Los sistemas de aire comprimido convencionales generalmente utilizan turbinas de combustión de gas para recalentar el aire enfriado antes de expansión. Este proceso crea ineficiencias y emisiones.

El sistema ICAES (isothermal compressed air energy storage) captura el calor de la compresión en el agua y almacena la captura el calor hasta que se necesita nuevamente para la expansión. El almacenamiento del calor capturado elimina la necesidad de una turbina de combustión de gas y mejora la eficiencia. Así se logra el ciclo isotérmico combinando innovaciones patentadas con un control de diseño en componentes y principios industriales. Esto lo podemos observar en la Figura 55.

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

420

Figura 55 : Almacenamiento de Aire comprimido Isotérmico de la Compañía Sustain-X



Referencia: (Isothermal Compressed Air Energy Storage, 2012)

Volantes de Inercia

El volante de inercia es un elemento capaz de almacenar la energía en forma de cinética mediante una rotación, la cual será liberada en el momento que sea necesario. Los volantes se cargan y descargan gracias a la acción de una máquina eléctrica que actúa como motor o generador y gracias a esta máquina y utilizando la energía proporcionada por la red eléctrica provocamos el movimiento del rotor del volante hasta alcanzar su velocidad nominal (proceso de carga).

Después la energía mecánica almacenada se transformará en el momento de su utilización a energía eléctrica mediante el generador, disminuyendo en el proceso la velocidad del rotor del volante hasta su valor mínimo de diseño. Luego se transformará a corriente alterna mediante un inversor y un sistema de control se encargará de controlar los valores de utilización.

Existen dos tipos de volantes de inercia en base a su velocidad:

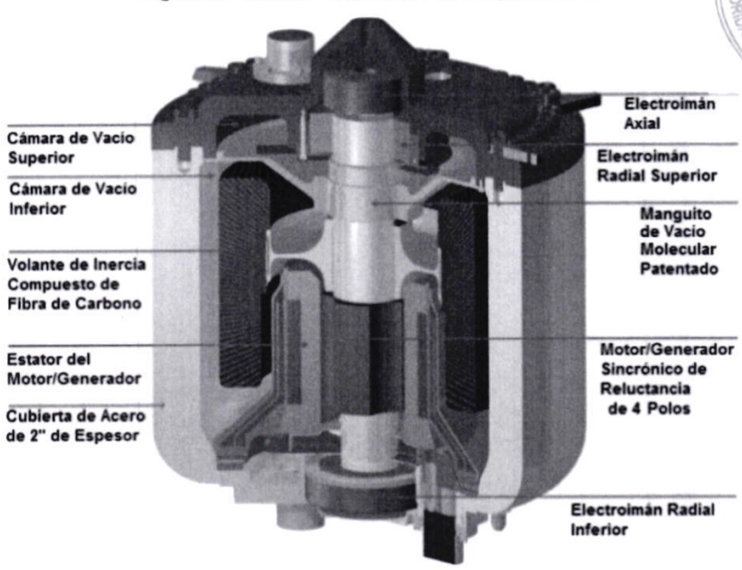
- Volante de inercia a bajas velocidades: $< 6x10^3$ rpm, su principal uso es en aplicaciones de calidad de energía (regulación de frecuencia, y sistemas de alimentación ininterrumpida).
- Volantes de inercia a altas velocidades: $10^4 - 10^5$ rpm, su principal uso es en aplicaciones de la industria del transporte (vehículos híbridos) e industria aeroespacial (satélites y catapultas en portaviones).

Entre las ventajas de implementar volantes de inercia como acumuladores de energía se pueden mencionar un mantenimiento reducido, densidad de potencia alta, larga vida útil, excelente estabilidad en los ciclos de carga/descarga y el uso de materiales ambientalmente inertes. Un diseño de volante de inercia se muestra en la Figura 56.

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

421

Figura 56: Volante de inercia de cuarta generación.



Referencia: (Powerthru, 2016).

Sistemas de Almacenamiento Electroquímicos

Esta sección describe el principio de funcionamiento de una gran variedad de baterías; pueden clasificarse principalmente en dos grupos: baterías secundarias y de flujo.

Baterías Secundarias

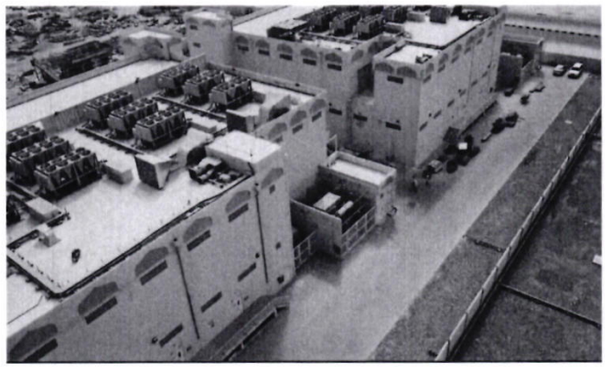
Son baterías recargables utilizadas como respaldo ante interrupciones en el suministro de energía a una carga eléctrica, mitigación de fluctuaciones energéticas provenientes de centrales eólicas, y sistemas aislados con paneles solares fotovoltaicos; usualmente están dispuestas en bancos, e inclusive en subestaciones de almacenamiento. En la actualidad existen subestaciones de este tipo en Estados Unidos, Canadá, Alemania, Australia, Indonesia, China y Japón; el proyecto de mayor capacidad instalada fue construido en Abu Dhabi (Figura 57), son 15 sistemas, en diez ubicaciones distintas, que suman 108 MW / 648 MWh, mediante baterías de sulfuro de sodio. Cada sistema es capaz de almacenar energía durante seis horas. El compromiso total incluye 12 sistemas de 4 MW y tres sistemas de 20 MW. Este es un sistema virtual ya que no

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

422

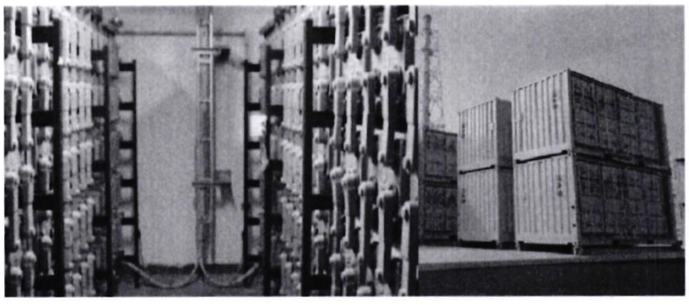
se encuentra en una sola ubicación, pero puede ser controlado de manera unitaria. En la Figura 58 se muestra el interior de los módulos de baterías e inversores, elementos importantes de las subestaciones de almacenamiento de energía. Las siguientes secciones explican las tecnologías disponibles en almacenamiento de energía con baterías secundarias

Figura 57: Sistema de Almacenamiento de 20MW ubicado en Abu Dhabi.



Referencia: (Energy Storage News, 2019)

Figura 58: Interior de un módulo de baterías (izquierda) y módulo inversor (derecha).



Referencia: (Saur Energy, 2019).

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

423

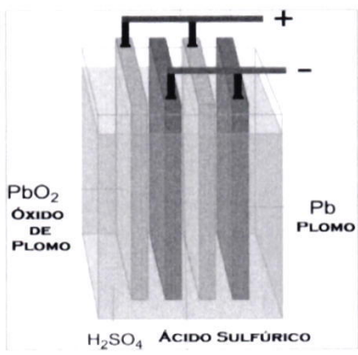
Plomo ácido

Las baterías de plomo-ácido son ampliamente utilizadas en sistemas fotovoltaicos. Además, tienen una vital importancia actualmente en aplicaciones en automóviles de motor de combustión para su utilización en el arranque del vehículo. No suele ser una opción recomendable para implantar en coches eléctricos debido a sus inconvenientes, sino que se utilizan su variante (plomo-gel).

Tiempos típicos de vida útil varían entre 6 a 15 años con unos 1500 ciclos de vida a un 80% de descarga, y se obtienen eficiencias de ciclo entre 80% y 90%. Entre sus ventajas se encuentran: una favorable razón costo/rendimiento, son fáciles de reciclar, y disponen de una tecnología simple para ser cargadas. Pese a esto, se puede mencionar entre sus desventajas que su capacidad de almacenamiento decrece cuando se descarga una gran cantidad de energía, tienen una baja densidad energética, y está el hecho de que utilizan plomo – un metal peligroso y prohibido en algunos países.

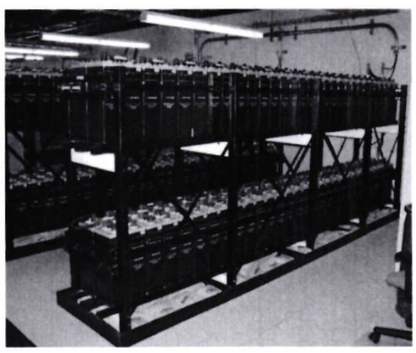
Acerca del futuro de las baterías de plomo-ácido, son más utilizadas por el aumento constante de la flota de vehículos, y debido a su precio y su disponibilidad son en muchas ocasiones una mejor opción. Además, con el surgimiento de una nueva generación de baterías de plomo ácido, cuyo rendimiento alcanza el 90%, sigue haciendo a estas antiguas baterías aún atractivas a todos los niveles de aplicación. Su estructura se muestra en la Figura 59 y en la Figura 60 se muestra un banco de estas.

Figura 59: Estructura interna de una batería de plomo ácido



Referencia: (Chemical Glossary, 2017).

Figura 60: Banco de baterías de plomo ácido



Referencia: (Storage Battery Solutions, LLC, 2018)

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

Níquel cadmio e hidruro metálico de níquel:

En contraste a las baterías de plomo ácido, este tipo de baterías tienen una mayor densidad energética, una densidad de potencia ligeramente superior, y un número de ciclos de vida más alto.

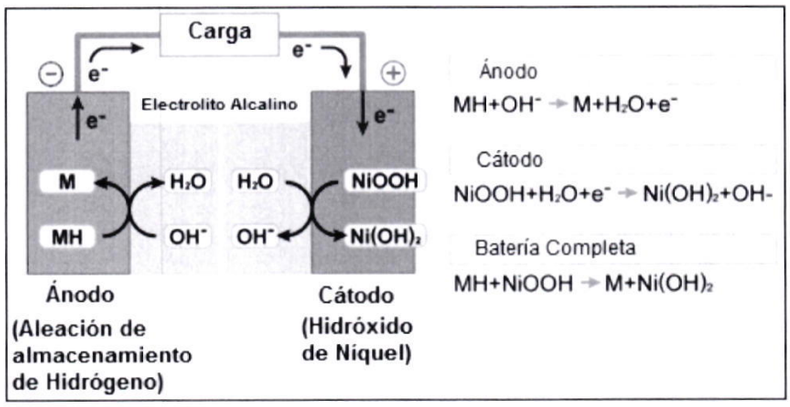
Las baterías de Ni-Cd presentan un largo ciclo de vida, más de 3500 ciclos combinados con bajos requerimientos de mantenimiento. Sin embargo, su vida útil depende principalmente de los niveles de descarga en cada ciclo, pudiendo alcanzar hasta 50.000 ciclos con un 10% de descarga.

Estas baterías requieren mantenimiento con menor frecuencia, pueden entregar más corriente en un menor tiempo y su duración es mayor con respecto a las baterías de Pb-ácido. Pueden mantener estados de descarga por periodos largos, siendo más robustas que otras tecnologías al mantener una tensión estable durante ciclos de carga/descarga profundos. Poseen una resistencia interna muy baja, por lo que son ideales para disponer en conexiones en serie.

Baterías de níquel cadmio han estado comercialmente activas desde el año 1915, mientras que aquellas de hidruro metálico de níquel desde el año 1995 (Figura 61). Debido a la alta toxicidad del cadmio, en Europa su uso fue permitido exclusivamente para aplicaciones estacionarias, y desde el 2006 han sido prohibidas para consumidores.

En la actualidad, estas baterías han sido reemplazadas por las de iones de litio, salvo para en el uso de vehículos híbridos, debido a su robustez y seguridad.

Figura 61 : Banco de baterías de níquel cadmio



Referencia: (Kawasaki, 2018).

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

425

Batería de Ion Litio

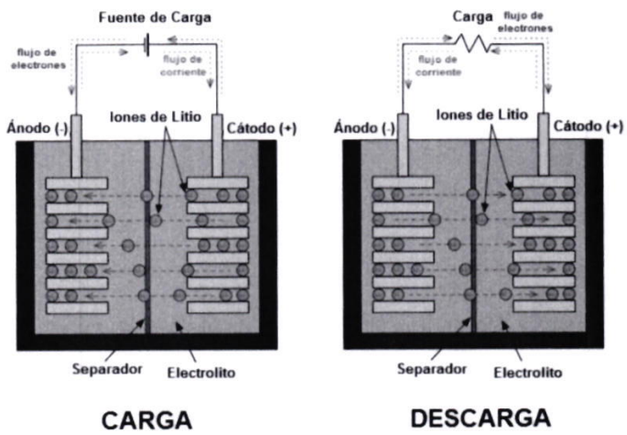
La batería de iones de litio, también denominada batería Li-Ion, es un dispositivo diseñado para almacenamiento de energía eléctrica que emplea como electrolito, una sal de litio que procura los iones necesarios para la reacción electroquímica reversible que tiene lugar entre el cátodo y el ánodo.

Las propiedades de las baterías de Li-ion, como la ligereza de sus componentes, su elevada capacidad energética y resistencia a la descarga, la ausencia de efecto memoria o su capacidad para operar con un elevado número de ciclos de regeneración, han permitido el diseño de acumuladores livianos, de pequeño tamaño y variadas formas, con un alto rendimiento, especialmente adaptados para las aplicaciones de la industria electrónica de gran consumo. Poseen una mayor densidad energética y una reducción considerable en costos por medio de producciones en masa.

Adicionalmente, pueden llegar hasta 5000 ciclos de vida, son altamente eficientes (95% - 98%) y tienen la flexibilidad de tiempos de descarga desde segundos hasta semanas.

Los problemas de seguridad más frecuentes asociados a esta tecnología son las fallas estructurales de los aislantes debido a sobrecargas o sobre descargas, causando calentamiento en los materiales activos debido a la reacción exotérmica acumulando presión y una subsecuente explosión de la batería, con riesgo adicional de combustión como resultado de la exposición al oxígeno. Su funcionamiento se puede observar en la Figura 62.

Figura 62: Funcionamiento de Batería de Ion Litio.



Referencia: (Apteligent, 2016).

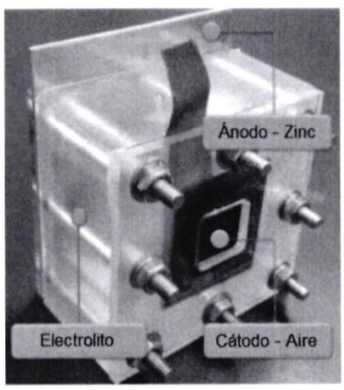
Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

426

Metal - Aire

Están compuestas por un ánodo hecho de metal puro, y el cátodo conectado a una fuente inagotable de aire, en donde solamente el oxígeno presente en el aire es utilizado para producir la reacción electroquímica. Bajo esta configuración, técnicamente cualquier metal podría ser utilizado para la reacción electroquímica; sin embargo, se prefiere el uso de baterías de zinc aire sobre las de litio aire por el hecho de que el litio es muy reactivo con el aire y la humedad y puede provocar riesgos de seguridad, incluyendo explosiones e incendios. Con el zinc, la velocidad de reacción puede controlarse adecuadamente al variar el flujo de aire, y la pasta de electrolito / zinc oxidado puede sustituirse fácilmente con una pasta nueva. Una batería recargable de este tipo tiene el potencial de brindar una alta energía específica y un bajo costo de materiales; no obstante, en la actualidad ninguna batería ha alcanzado el nivel de madurez comercial. En las Figura 63 y Figura 64 se muestran respectivamente modelos de baterías de zinc aire y litio aire. Dentro de la familia metal/aire, el par electroquímico de mayores posibilidades de éxito comercial en su aplicación a las diversas necesidades relacionadas con Smart Grids, es el basado en el Aluminio/aire. El aluminio es accesible en el mercado, reciclable y, frente a otros sistemas de la misma familia, presenta una gran densidad energética (8 kWh por cada kg) y un voltaje por celda similar al conocido de baterías alcalinas, basadas en electrodos de Níquel. En las baterías de Al-Aire la placa de aluminio constituye el ánodo y el aire realiza las funciones del cátodo. La ecuación química básica está formada por cuatro átomos de aluminio, tres moléculas de oxígeno y seis moléculas de agua, que se combinan para producir cuatro moléculas de óxido de aluminio hidratado más la energía.

Figura 63 : Batería de zinc aire

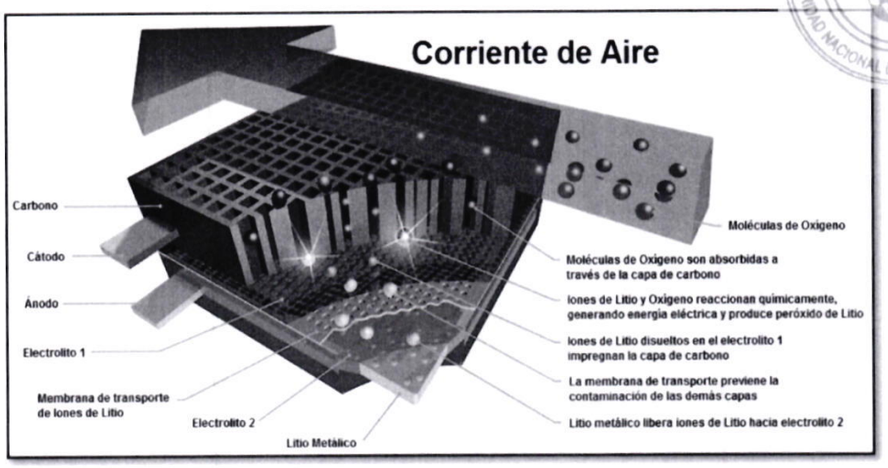


Referencia: (The Agency for Science, Technology and Research, 2017).

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

427

Figura 64 : Principio de funcionamiento de una batería de litio aire



Referencia: (IBM, 2012).

Sulfuro de Sodio

Físicamente en las baterías NaS el electrodo positivo consiste en azufre (S), mientras que el material activo del electrodo negativo corresponde a sodio (Na).

Este tipo de tecnología trabaja normalmente a altas temperaturas, entre 300 °C y 350 °C con la finalidad de mantener los electrodos fundidos debido a las reacciones exotérmicas, en consecuencia, existen cambios de presión y consecuentes riesgos de explosión o incendio, pero esto no ha detenido el desarrollo de esta prometedora tecnología, si hay un cauteloso control de la temperatura, los riesgos son mínimos y las pérdidas por auto descarga son bajas.

En comparación con otras baterías, las NaS tienen una respuesta extremadamente rápida, siendo adecuadas para aplicaciones relacionadas con Calidad de Energía, Adicionalmente, estas baterías pueden inyectar hasta un 600% su potencia por pulso (Rated Power Pulse) alcanzando hasta 30 segundos de duración, lo que está limitado por las subidas de temperatura en las celdas, y la profundidad de descarga. Esto permite que esta tecnología pueda ser utilizada en aplicaciones de calidad y almacenamiento reduciendo picos rápidos en la demanda o en la producción de un parque eólico. Las baterías de NaS presentan una larga vida útil debido a que los electrodos son líquidos, eliminando la corrosión que afecta al resto de las tecnologías de electrodos sólidos.

Son insensibles a cambios de temperatura externos, facilitando su instalación en interiores o exteriores, lo que reduce su impacto respecto al lugar físico que se utiliza, los módulos son reubicables, no producen ruidos o

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

428

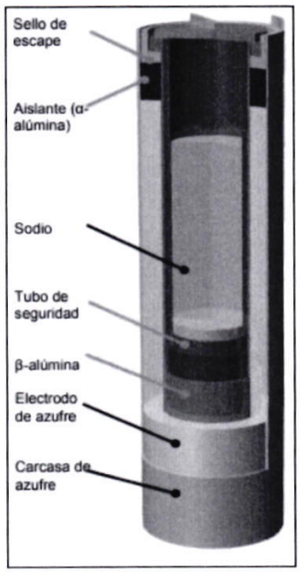
vibraciones por esto permiten su integración cercana a las cargas.

Esta tecnología no es adecuada para sistemas de respaldo (UPS), en los cuales se pueden llegar a descargar totalmente con el consecuente deterioro de los electrodos, sumado a que mantener una temperatura y voltajes adecuados es esencial en este tipo de baterías, además son necesarios sistemas de control y protección que ocupan un espacio físico adicional.

En Japón se ha demostrado la efectividad de esta tecnología en alrededor de 200 sitios, principalmente utilizada en supresión de picos de demanda; adicionalmente se ha implementado en Alemania, Francia, Estados Unidos y Emiratos Árabes Unidos.

La estructura de una celda de NaS se muestra en la Figura 65.

Figura 65: Estructura de una celda de NaS.



Referencia: (Universidad Distrital Fransisco José de Caldas, 2015)

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

429

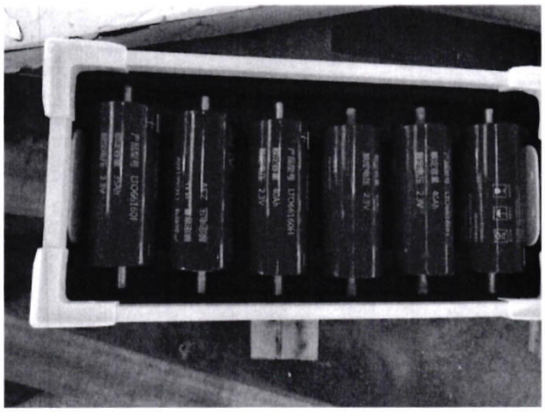
Titanato de Litio

El Titanato de litio es una clase relativamente nueva de iones de litio. Se caracteriza por un ciclo de vida muy largo medido en miles de ciclos, junto con muy alta capacidad de velocidad de descarga y carga. Titanato de litio también es muy seguro y comparable a la de fosfato de hierro en este sentido.

La densidad de energía es más baja que otras químicas de iones de litio y la tensión nominal es 2.4V. Esta tecnología es conocida por su carga muy rápido, resistencia interna baja / alta carga y velocidad de descarga, el ciclo de vida muy alto, y una excelente resistencia / seguridad. Se ha encontrado un uso principalmente en vehículos eléctricos y de almacenamiento de energía, y los relojes de pulsera. Más recientemente, se está comenzando a encontrar uso en dispositivos médicos móviles debido a su alta seguridad. Una de las razones subyacentes de esta característica de la tecnología es que la química utiliza nanocristales en el ánodo en lugar de carbono, lo que proporciona un área de superficie mucho más eficaz.

Desafortunadamente, esta batería tiene tensiones en los terminales más bajos que otros tipos de litio. Debido a los beneficios del titanato de litio en términos de alta seguridad, alta estabilidad, larga vida útil y características ecológicas, las baterías de titanato de litio se pueden usar ampliamente en vehículos militares, aeroespaciales, eléctricos y estaciones de carga, así como sistemas de energía de respaldo críticos para el sistema. En la Figura 66 se pueden observar este tipo de baterías.

Figura 66: Batería de Titanato de Litio con encapsulado tipo botella.



Referencia: (EV Lithium, s.f.)

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

430

Baterías de flujo

Son baterías en las cuales la energía es almacenada en una o más sustancias disueltas en electrolito líquido. Dichos electrolitos son almacenados externamente en tanques y son bombeados a través de la celda electroquímica que convierte directamente la energía química a eléctrica y viceversa. La potencia de las baterías es definida por el tamaño y diseño de la celda electroquímica, mientras que la energía es definida por el tamaño de los tanques. Originalmente desarrolladas por la NASA en los años 1970 para vuelos espaciales de largo plazo, las baterías de flujo proveen una solución alternativa y prometedora para el almacenamiento de energía, con duraciones de horas e incluso hasta días, y con potencias del orden de los MW. A la fecha, existen dos tipos de baterías: reducción-oxidación (redox) e híbridas.

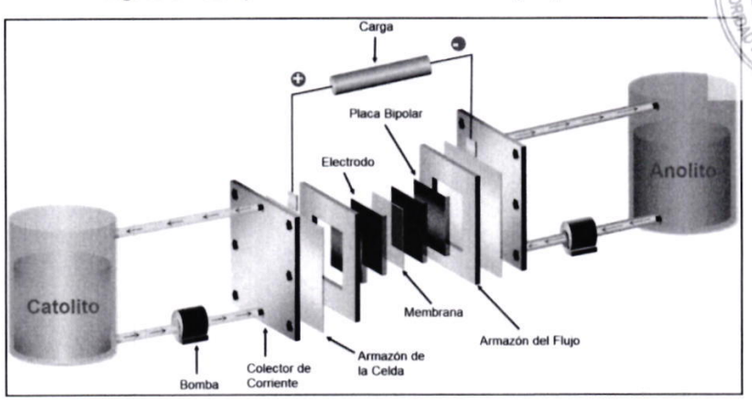
Reducción-oxidación

Como puede observarse en la Figura 67 dos disoluciones de electrolitos líquidos con iones de metal como masas activas son bombeadas a los lados opuestos de una celda electroquímica. Los electrolitos en los electrodos negativo y positivo son llamados respectivamente anolito y catolito. Durante los ciclos de carga y descarga, los iones metálicos permanecen disueltos en el electrolito como líquido; no se produce algún cambio de fase. Durante el proceso de carga, el anolito y catolito fluyen por los electrodos porosos, separados por una membrana que permite el paso de protones a través de ella para efectuar la transferencia de electrones, produciendo una corriente eléctrica. En el proceso de descarga, los electrodos son suministrados continuamente con las masas activas disueltas de los tanques; una vez convertido, el producto final es removido del tanque. Poseen un sistema de bajo impacto, que no utiliza metales pesados contaminantes y de no ser por el deterioro de la membrana de carbono, tendrían un ciclo de vida prácticamente indefinido, en el cual el electrolito permite un reciclaje completo, sin problemas de disposición de desechos. El tipo de batería de flujo más conocido es el flujo redox de vanadio. El mecanismo de almacenamiento de la batería de flujo redox de vanadio (VRFB) involucra reacciones redox en la célula que son alimentadas por materiales activos de vanadio iónico de los tanques, que resultan en electrones.

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

431

Figura 67: Componentes de una batería de flujo tipo redox.



Referencia: (Kim, y otros, 2015).

Híbridas

En este tipo de baterías, una de las masas activas es almacenada internamente dentro de la celda electroquímica, mientras que la otra masa permanece en el electrolito líquido y es almacenada externamente en un tanque. Bajo esta configuración, baterías híbridas combinan las ventajas de las baterías secundarias convencionales y las de flujo de reducción-oxidación: su capacidad depende del tamaño de la celda electroquímica. Ejemplos típicos de baterías híbridas son las de zinc-cerio y zinc-bromo: en ambos casos el anolito consiste en una solución ácida de iones de zinc (Zn^{2+}), durante la carga el zinc es depositado en el electrodo y durante la descarga, Zn^{2+} regresa a la solución. Una membrana de material poliolefina microporosa es utilizada; la gran mayoría de los electrodos son compuestos de carbono y plástico. Esta tecnología está en fase de comercialización, habiendo sistemas con capacidades de hasta 1 MW/3 MWh. La batería de flujo de zinc bromo (ZBFB) es probablemente el más conocido de los tipos de baterías de flujo híbrido. Una célula ZBFB consiste en dos compartimentos separados típicamente por una membrana microporosa. Electrodos en cada lado de la celda (uno en el lado de zinc uno en el lado del bromo) está hecho de materiales compuestos de plástico al carbono, dado que los electrodos de metal sufrirían corrosión en presencia de un ambiente rico en bromo. Dos tanques externos bombean el electrolito acuoso hacia las pilas de células durante la carga y descarga (es decir, en una configuración a la del VRFB).

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS
432

Hidrógeno

El almacenamiento gracias al hidrógeno trata de, mediante la energía eléctrica o térmica procedente de centrales térmicas, nucleares, eólicas, convertir compuestos químicos para convertirlo más adelante en energía eléctrica. Este elemento se encuentra en grandes cantidades en nuestro planeta, aunque este no se encuentra en su estado puro.

El hidrógeno es un vector de energía que puede ser obtenido de varios productos, como el gas natural, el agua o el refinado de aceites pesados. Sin embargo, la única producción considerada como limpia es la que implica su obtención a base de agua y energía procedente de fuentes renovables.

Permite tanto el almacenamiento masivo como el almacenamiento a pequeña escala, sin embargo, es más atractiva la idea de almacenamiento masivo, debido a la reducción de costes.

Como se ha dicho anteriormente, este sistema de almacenamiento (ver Figura 68) puede combinarse con cualquier fuente de energía, renovable o no, además de poder utilizarse incluso como fuente de energía en sí mismo.

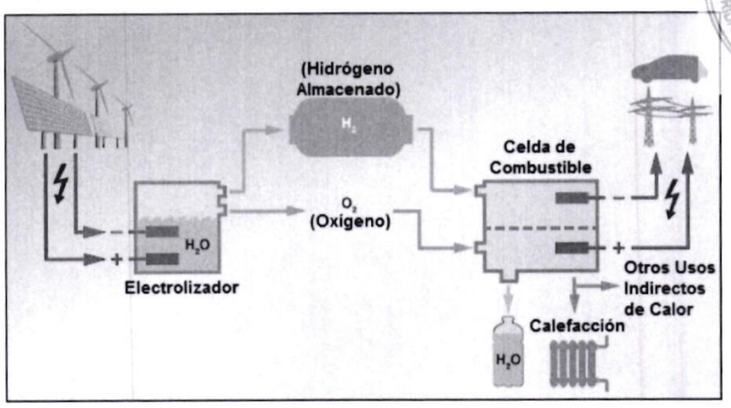
La utilidad del almacenamiento de hidrógeno se basa en la producción de energía eléctrica a partir del hidrógeno; luego de su almacenamiento, se puede utilizar posteriormente como:

- Combustión de hidrógeno: Para la generación de energía eléctrica, se obtiene oxígeno de la atmósfera y se combina con el hidrógeno gracias a unas turbinas de gas, ciclos combinados o utilizado simplemente a modo de combustible (de motores, por ejemplo). Esta aplicación tiene un potencial inconveniente: la temperatura en la llama supera los 3000°C. Como solución a este problema se puede añadir agua para controlar la temperatura alcanzada.
- Pilas de combustible de hidrógeno: se trata de la principal aplicación del hidrógeno, en el que el hidrógeno actúa como combustible en la pila, la cual genera electricidad a partir de la reacción química. Aunque la pila de combustible también funciona con combustibles fósiles, su rendimiento es mayor con hidrógeno, debido a su mayor densidad energética.

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

433

Figura 68: Ciclo operativo de un sistema de almacenamiento con hidrógeno

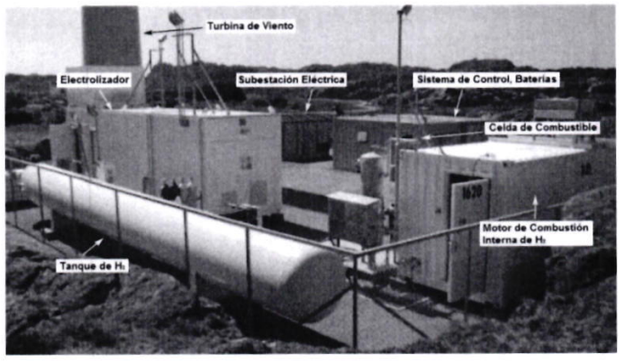


Referencia: (Deutsche Welle, 2016).

Actualmente no existe ningún sistema de almacenamiento con hidrógeno de forma comercial, pero sí existen varios proyectos en fase de desarrollo que han demostrado su viabilidad exitosamente. Entre algunos casos de éxito pueden mencionarse el proyecto en la isla de Utsira en Noruega (Ver Figura 69), la central híbrida de Enertag en Alemania y Groenlandia.

Por otro lado, Futuros proyectos consideran la instalación de centros de carga de hidrógeno para vehículos como alternativa para el reemplazo de productos derivados del petróleo (Ver Figura 70).

Figura 69: Central de almacenamiento de hidrógeno en Noruega.



Referencia: (New Energy and Fuel, 2010).

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

434

Figura 70: Centro de carga para vehículos con celdas de hidrógeno.



Referencia: (International Fleet World, 2018).

Gas Natural Sintético

Otro sistema alternativo de almacenamiento químico disponible en la actualidad es la metanación, el cual es el proceso de sintetización del metano para la producción de gas natural sintético (GNS). Posterior al proceso de electrólisis y separación del hidrógeno, éste se mezcla con dióxido de carbono para producir metano en un reactor de metanación.

El gas natural sintético puede almacenarse en tanques a presión, contenedores, cavernas para su posterior uso, o suministrarse directamente a la red de gas.

Excelentes fuentes de dióxido de carbono para la metanación son centrales termoeléctricas, instalaciones industriales o centrales de biogás. Para reducir pérdidas energéticas, debe evitarse el transporte del CO_2 (procedente de la fuente) y H_2 (proveniente del proceso de electrólisis) hacia la central de metanación; la producción del GNS es preferible en ubicaciones donde haya excedentes de CO_2 y electricidad. Centrales de producción de biogás son excelentes lugares con excesos de CO_2, sin embargo, un almacenamiento intermedio en sitio del gas es necesario, debido a que la metanación es un proceso continuo.

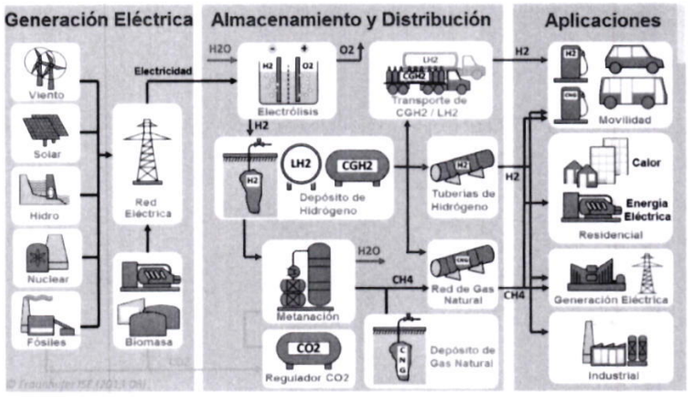
En la Figura 71 se muestra el esquema del uso del hidrógeno y GNS como almacenamiento de energía química.

La principal desventaja en sistemas de almacenamiento de energía con GNS es la relativamente baja eficiencia global, debido a las pérdidas energéticas en la conversión durante la electrólisis, metanación, almacenamiento, transporte y posterior generación eléctrica. Eficiencias suelen ser inferiores al 35%.

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

435

Figura 71: Concepto global del uso de hidrógeno y gas natural sintético como portadores de energía



Referencia: (Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, s.f.).

Amoniaco, Metanol y Combustibles alternativos

Para incrementar la densidad energética volumétrica y aprovechar otras infraestructuras ya existentes, el hidrógeno puede incorporarse a moléculas mayores como amoníaco o líquidos orgánicos portadores de hidrógeno. Así, el hidrógeno puede utilizarse en la síntesis de sustancias líquidas fácilmente transportables empleando las actuales redes de suministro, tales como alcoholes sintéticos, el metanol, el octano, el amoníaco o los derivados amónicos, entre otros. De entre ellos, destaca el amoníaco, al contar con una infraestructura propia desarrollada que favorecería su almacenamiento energético. Este compuesto no contiene carbono; sin embargo, posee nitrógeno y sus emisiones contribuyen a la formación de aerosoles de sulfato amónico y nitrato amónico, que deterioran la calidad del aire.

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

436

Capacitores de Doble Capa

Los condensadores electroquímicos o EDLC (Electrochemical Double Layer Capacitors) también son conocidos como supercondensadores. (Ver Figura 72). Los ultracondensadores son componentes electrónicos pasivos que permiten el almacenamiento de energía en pequeños periodos de tiempo.

El principio de funcionamiento en el que se basan los ultracondensadores es la pseudocapacitancia que es el almacenamiento de energía asociado a la acumulación de carga eléctrica entre las láminas del condensador gracias al medio aislante. Es un fenómeno que depende de la tensión, por lo que posee una capacitancia variable.

Figura 72: Ejemplo de Supercondensadores.



Referencia: (Energy Storage Technologies in the Electricity grid, 2017)

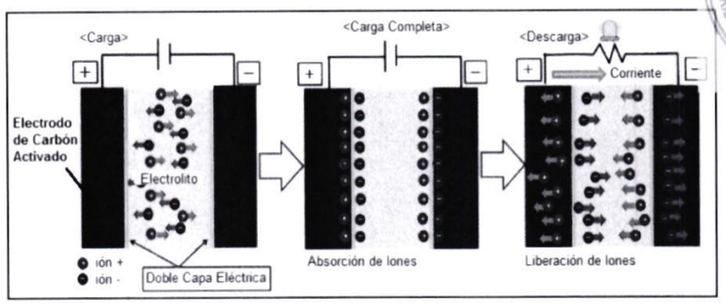
El cambio principal frente a los condensadores consiste en acercar las cargas de distinta polaridad dentro del dispositivo a nivel molecular y además aumentar la superficie efectiva de los conductores.

Se encuentran entre la categoría de capacitores convencionales utilizados en circuitos electrónicos y baterías de uso general, por su prácticamente ilimitado ciclo de estabilidad como por su elevada capacidad de potencia y de almacenamiento. A diferencia de los capacitores convencionales de cerámica y los electrolíticos de aluminio, estos no contienen un material dieléctrico, pero sí un electrolito sólido o líquido introducido entre dos electrodos. Esta configuración hace que se forme una doble capa eléctrica, haciendo de éste el nuevo material dieléctrico. La capacitancia del supercondensador es proporcional al área superficial de la doble capa; por consiguiente, al usar carbón activado como electrodos se logran capacitancias muy elevadas. Al aplicar un voltaje en los electrodos, los iones se desplazan hacia las paredes de la doble capa eléctrica, resultando en el proceso de carga del supercondensador; cuando se descarga, se produce el proceso opuesto, tal como aparece en la Figura 73.

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

437

Figura 73: Ciclo de carga y descarga de un supercapacitor.



Referencia: (Murata, s.f.).

En sistemas fotovoltaicos se utilizan ultracondensadores dispuestos en paralelo para estabilizar la tensión de salida de las células, permitiendo además disminuir picos de tensión. Los ultracondensadores no solo tienen una mayor vida útil que las baterías para el almacenamiento solar, sino que además su eficiencia de carga es mayor que en las baterías (pérdida de energía en la carga 30% en baterías de plomo-ácido frente a un 10% de los EDLC). También su rango de temperaturas de trabajo se presenta como un factor clave para la elección de los mismos.

No obstante, el uso de supercapacitores no son recomendables para el almacenamiento de energía por periodos extendidos de tiempo porque estos dispositivos tienen una tasa de auto descarga alta, otro motivo por el cual en la mayoría de las ocasiones se descartan como opción válida es su densidad de energía, muy baja comparado con las baterías, lo que para el mismo espacio de almacenamiento tendríamos una cantidad mucho menor de energía almacenada, además de su mayor coste.

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

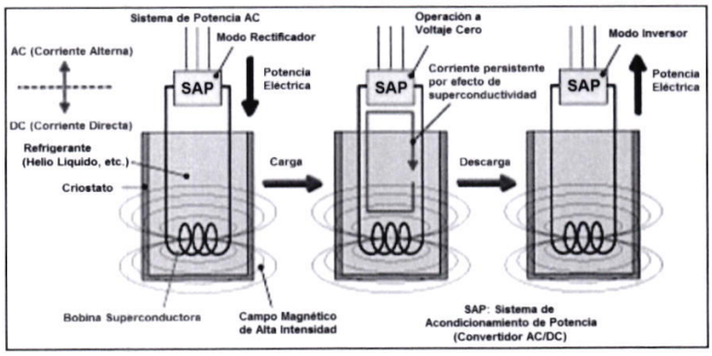
438

Bobinas Magnéticos Superconductoras

Los superconductores son capaces de transportar altos niveles de corrientes en la presencia de altos niveles de campos magnéticos a bajas temperaturas con cero resistencias al flujo de corriente eléctrica, a menos que sus valores críticos: temperatura (Tc), densidad de flujo magnético (Bc) y densidad de corriente (Ic), sean excedidos. La energía es almacenada en el campo magnético creado por el flujo de corriente directa en una bobina superconductora, el cual se mantiene a una temperatura inferior a su temperatura crítica superconductora. El componente principal de esta tecnología es la bobina compuesta de un material superconductor; componentes complementarios incluyen el sistema de refrigeración criogénica y el equipo de acondicionamiento de potencia.

La superconductividad fue descubierta en 1911 por Heike Kamerlingh Onnes, quien se encontraba estudiando la resistencia del mercurio sólido a temperaturas criogénicas, utilizando helio líquido como refrigerante. Una temperatura de 4 K era requerida debido a estudios e investigaciones científicas, en la actualidad se han diseñado materiales con capacidad de funcionar a temperaturas críticas más altas, alrededor de los 100 K. En la Figura 74 se muestra el método de almacenamiento de energía mediante esta tecnología. La principal ventaja de este sistema es su virtualmente instantáneo tiempo de respuesta ante el suministro de energía. Adicionalmente, se caracteriza por ser altamente eficiente (85% - 90%), brindar grandes cantidades de energía en un reducido periodo de tiempo, y no disponer de partes móviles en su sistema principal. Teóricamente, la energía puede almacenarse indefinidamente, siempre y cuando el sistema de refrigeración se encuentre en funcionamiento, aunque tiempos extendidos de almacenamiento son limitados significativamente por la demanda energética del sistema de refrigeración.

Figura 74: Almacenamiento de energía aprovechando el fenómeno de superconductividad



Referencia: (Nomura, 2015).

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

439

Sistemas de Almacenamiento Térmicos

Se caracterizan por almacenar la energía en forma de calor disponible en depósitos aislados térmicamente para luego emplearla en aplicaciones residenciales o industriales tales como calefacción o enfriamiento, producción de agua caliente o generación de energía eléctrica.

Los sistemas de almacenamiento térmico tienen el potencial de incrementar el uso efectivo de la energía térmica y de facilitar el control de la producción térmica a gran escala. Suelen ser especialmente útiles para la corrección de la discordancia entre demanda y producción de energía.

Almacenamiento de Calor Sensible

Es una de las tecnologías más conocidas y con múltiples aplicaciones implementadas comercialmente, tal como es el uso de un tanque para un sistema de agua caliente doméstico.

El almacenamiento de calor sensible se lleva a cabo mediante transferencia de calor a un elemento que lo almacena sin cambiar de estado. Los materiales usados para almacenar energía sensible se mantienen sin cambio de fase en el rango de temperaturas del proceso de almacenamiento y el calor almacenado.

Además de la densidad y del calor específico, existen otras propiedades que influyen en el almacenamiento de calor sensible, como son la temperatura de operación, la conductividad térmica, difusión, presión de vapor y por último es muy importante tener en cuenta los costes. Una gran variedad de fluidos ha sido probada como materiales de almacenamiento, agua, aceites y sodio; destacando entre ellos, las sales fundidas. El esquema de este sistema de almacenamiento se muestra en la Figura 75.

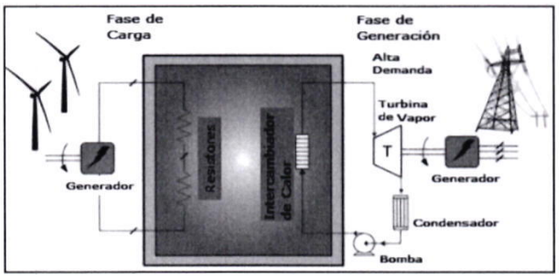
Su elección atiende a que son líquidas a presión atmosférica, presentan una excelente relación entre la capacidad de almacenamiento y el precio, sus temperaturas de operación son compatibles con las altas presiones y temperaturas en las turbinas de vapor, y no son inflamables ni tóxicas (a diferencia de los aceites sintéticos).

Sus principales aplicaciones son el almacenamiento de calor solar, centrales térmicas con turbinas de vapor y la climatización, siendo este último donde más extendida está su aplicación.

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

440

Figura 75: Esquema de Sistema de Almacenamiento de Calor Sensible.



Referencia: (Energy Storage Toolbox, 2018)

Para este tipo de almacenamiento, las tecnologías que se encuentran desarrolladas son las siguientes:

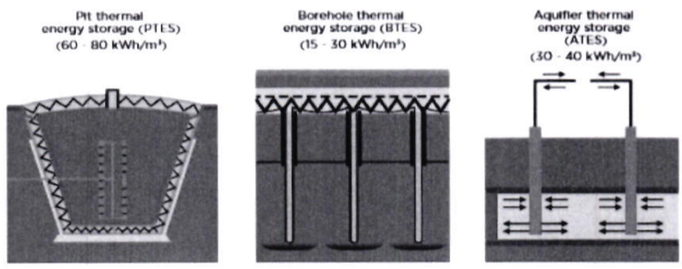
- Almacenamiento de energía térmica de tanque (TTES)
- Almacenamiento de estado sólido
- Almacenamiento por sales fundidas
- Almacenamiento de energía térmica bajo tierra (UTES)

El TTES utiliza un fluido, comúnmente agua, como medio para el almacenamiento, es la forma más simple, generalizada y técnicamente madura de almacenamiento térmico, en términos de volumen estos tanques van desde unos cientos de litros hasta los 80,000.00 m^3, limitado por el espacio y la construcción del tanque. Usualmente proveen almacenamiento diario, y son cargados por tecnología térmica solar calentando agua a 80-90°C. El almacenamiento de estado sólido implica el uso de material particulado para almacenar calor y un fluido que circula a través del lecho para transferir calor dentro y fuera del sistema. Estos sistemas varían en tamaño y se pueden utilizar una gama de materiales, como bloques de cerámica, lechos de cemento, entre otros. Esta tecnología es simple, relativamente barata y escalable, se usan en instalaciones que requieren un grado bajo de calor. El almacenamiento por sales fundidas es utilizado en almacenamiento de alto grado de calor altamente controlados, como el sistema de potencia, es específicamente utilizado en las plantas de concentración solar, donde el calor es almacenado durante el día y se descarga durante la noche accionando una turbina manteniendo una producción eléctrica continua. El sistema UTES tiene distintos medios de almacenamiento, pueden ser estratos geológicos, formados por tierra, arena o roca sólida, o agua en fosas artificiales, o acuíferos. Las tecnologías UTES clave son el almacenamiento de energía térmica de acuíferos (ATES), el almacenamiento de energía térmica de pozos (BTES) y el almacenamiento de energía térmica en boxes (PTES), como se observa en la Figura 76. Estos sistemas tienen la ventaja clave de que grandes cantidades de energía térmica se pueden almacenar a lo largo de las estaciones; sin embargo, la eficiencia de estos sistemas es relativamente baja y, por lo tanto, se despliegan mejor junto con una fuente barata de energía térmica.

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

441

Figura 76: Principio de funcionamiento de materiales de cambio de fase.



Referencia: (IRENA, 2020)

Almacenamiento de Calor Latente

Se basa en la energía almacenada en un cambio de fase, fusión o vaporización, mientras que, en sentido inverso, con la solidificación o condensación se recupera la energía. Este método se caracteriza por tener siempre una temperatura constante.

Este método posee una densidad de energía mayor que el calor sensible. Otras ventajas destacables son que, como la temperatura constante a lo largo del proceso, no tendremos variaciones de volumen, además de una extensa variabilidad en los materiales a utilizar y temperaturas de operación. Sin embargo, los materiales son más costosos que en calor sensible y es más complicado transmitir calor al medio.

La energía térmica en forma de calor latente puede almacenarse al utilizar como medio de almacenamiento materiales que cambian de fase, los cuales pueden ser orgánicos (parafinas) o inorgánicos (hidratos de sales). El material más común empleado para el almacenamiento de calor latente son los materiales de cambio de fase sólido líquido (PCM).

En cualquier caso, son capaces de almacenar grandes cantidades de calor durante el cambio de fase de líquido a sólido. Los materiales PCM pueden almacenar entre 5 y 14 veces más energía en el mismo volumen en comparación con otros materiales como el agua o la roca.

Sin embargo, la mayoría de estos materiales presentan el gran inconveniente de un bajo coeficiente de conductividad del calor, por lo que se deben emplear métodos de mejora de la transmisión energética para así aumentar el rendimiento y utilidad del sistema de almacenamiento.

La gran ventaja que tienen estos sistemas en comparación con los sistemas de calor sensible es su gran capacidad de almacenamiento de energía en un volumen reducido de medio y a una diferencia de temperatura reducida, traduciéndose en una transferencia de calor más efectiva y eficiente.

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

442

Para este tipo de almacenamiento se diferencian cuatro tipos de tecnología, las cuales son:

- Sub-cero (cambio de fase debajo de 0°C)
- Hielo (cambio de fase del agua a 0°C)
- Baja temperatura (cambio de fase del agua de 0°C a [illegible]°C)
- Alta temperatura (cambio de fase del agua de por encima de 120°C)

Absorción y Adsorción Electroquímica

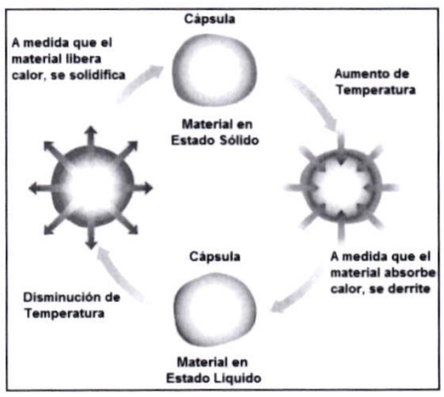
Sistemas de este tipo fungen como bombas de calor termoquímicas bajo condiciones de vacío; por consiguiente, tienen un diseño mucho más complejo y tienen un costo muy elevado.

Durante el proceso de almacenamiento, calor proveniente de una fuente a alta temperatura es transferido a un adsorbente (gel de sílice o zeolita), y vapor de un fluido de trabajo como el agua es desorbido y condensado a bajas temperaturas en un condensador, removiendo así el calor de condensación del sistema. Posteriormente, el adsorbente seco y el fluido de trabajo separado puede almacenarse por el tiempo deseado.

En el proceso de descarga, el fluido de trabajo recibe calor a bajas temperaturas dentro de un evaporador; seguidamente, el vapor del fluido de trabajo adsorbe en el adsorbente y calor de adsorción es liberado a altas temperaturas. El funcionamiento puede observarse gráficamente en la Figura 77.

Dependiendo de la combinación de adsorbente y fluido de trabajo, la temperatura del calor liberado puede llegar hasta 200°C y la densidad de energía puede llegar a ser hasta tres veces más alta que la del calor sensible almacenable en el agua.

Figura 77: Principio de funcionamiento de materiales de cambio de fase.



Referencia: (University of Southern California, 2010).

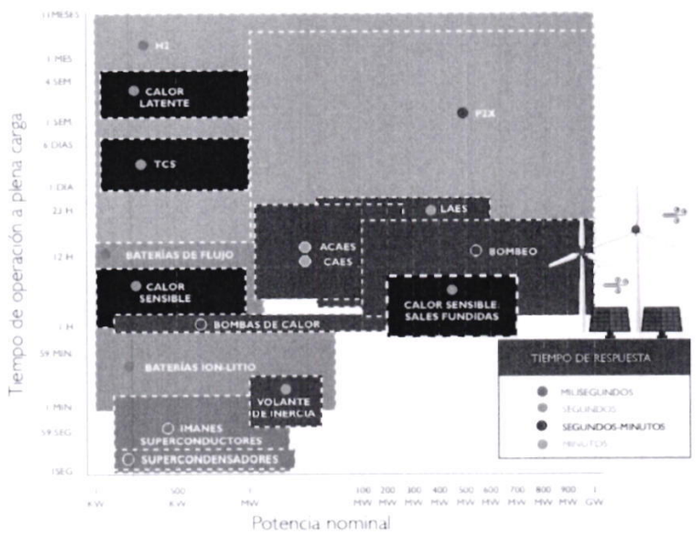
Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

443

Resumen

En la Tabla 1, Tabla 2, Tabla 3 y en la Figura 78 se presenta un resumen comparativo de las tecnologías de almacenamiento de energía. En la Tabla 4 se observa las aplicaciones respectivas de las tecnologías de almacenamiento.

Figura 78: Comparación de tecnologías de almacenamiento de energía: potencia nominal, energía y tiempo de descarga



TECNOLOGÍA		CAPACIDAD ENERGÉTICA	EFICIENCIA DE CICLO COMPLETO	NIVEL DE MADUREZ
MECÁNICA	Bombeo (PHS)	1-100 GWh	80%	
	Bombas de calor (PHES)	500 kWh - 1GWh	70 - 75%	
	Aire comprimido adiabático (ACAES)	10 MWh - 10 GWh	> 70%	
	Aire comprimido (CAES)	10 MWh - 10 GWh	45 - 60%	
	Aire líquido (LAES)	10 MWh - 8 GWh	50 - 100%	
	Volante de inercia	5 - 10 kWh	85%	
ELECTROQUÍMICA	Baterías ión-litio	<10 MWh	86%	
	Baterías de flujo (V, Zn,Fe, Zn Br)	<100 MWh	70%	
ELÉCTRICA	Imanes superconductores (SMES)	1 - 10 kWh	>90%	
	Supercondensadores	1 - 5 kWh	90%	
QUÍMICA	Power to gas (H2)	Hasta 100 GWh	20- 40%	
	Power to X (P2X)	1 MWh - varios GWh	50%	
TÉRMICA	Calor sensible: Sales fundidas	100 MWh - 10GWh	40 - 60%	
	Calor sensible	10 - 50 kWht	50 - 90%	
	Calor latente (PCM)	50 - 150 kWht	75 - 90%	
	Termoquímico (TCS)	12 - 250 kWht	75 - 100%	

MUY MADURO NO MADURO

Referencia: (MITECO, 2021)

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

444

Tabla 1: Comparación de Sistemas de Baterías por su Potencia y Energía Almacenada.

Tipo de batería	Rango de potencia	Potencia específica (W/kg)	Energía específica (Wh/kg)	Densidad de energía (Wh/L)
Pb-ácido	Alta (decenas de MW)	Media	Muy baja	Baja
Ni-Cd	Alta (decenas de MW)	Media	Baja	Media-baja
NiMH	Baja	Media	Media	Media-alta
Zebra	Baja (decenas de KW)	Baja	Alta	Alta
Sodio-sulfuro	Alta (decenas de MW)	Baja	Media	Media
Metal-aire	Media (MW)	Media	Alta	Alta
Titanato de bario	N/A	N/A	N/A	N/A
Ión-Litio	Baja (decenas de KW)	Alta	Alta	Alta
Litio-Fosfato de Hierro	Baja	Alta	Media-alta	Alta
Li-Po	Baja	Alta	Alta	Alta

Referencia: (Universidad de Valladolid, 2016)

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

445

Tabla 2: Comparación de Tecnologías de Almacenamiento.

Tipo de Almacenamiento	Voltaje Nominal (V)	Tiempo de Respuesta	Energía Especifica (Wh/Kg)	Densidad Energetica (Wh/L)	Vida Util (Años)	Ciclos de Vida	Temperatura de Trabajo (°C)	Tiempo Tipico de Carga	Tiempo Tipico de Descarga	Porcentaje de Perdidas por día	Eficiencia Energetica (%)	Costo por kWh (USD/kWh) '
Hidroelectricas con Central de Bombeo	–	Minutos	0.2 - 2	0.2 - 2	> 30	> 15000	–	–	Horas	0 - 0.5	70 - 80	20 - 105
Aire Comprimido	–	Minutos	–	2 - 6	> 30	> 10000	–	–	Horas	0 - 10	41 - 75	44 - 53
Volantes de Inercia	–	< segundos	5 - 30	20 -80	15 - 20	2x10^7	–	–	Segundos	–	80 - 90	1500 - 6000
Hidrogeno Centralizado	–	Segundos	33330	600 (200 bar)	10 - 30	10^3 - 10^4	–	–	Horas - Semanas	0 - 1	24 - 45	10
Gas Natural Sintetico	–	Minutos	10000	1800 (200 bar)	10 - 30	10^3 - 10^4	–	–	Horas - Semanas	–	30 - 38	
Capacitores de Doble Capa	2.3 - 2.75	< Segundos	1 - 15	3.6	4 - 20	10^6	-40 - 65	Segundos	< Segundos	–	80 - 98	7200
Bobinas Magnéticas Superconductoras	–	< Segundos	1 - 10	6	Ilimitados	Ilimitados	-224	Segundos	Segundos	0 @ 4 Kelvin	75 - 95	300 - 1000

Referencia: Los datos para cada tecnología fueron obtenidos de International Renewable Energy Agency (IRENA), U.S Energy Information Administration (EIA) y otras fuentes.

Definiciones

- **Tiempo de Respuesta**: Tiempo que le toma al sistema el reaccionar a una entrada especifica.
- **Energía especifica**: Medida de la densidad de energía almacenada en vatios-hora / kilogramo.
- **Densidad Energética**: Medida de la densidad de energía almacenada en vatios-hora / Litro.
- **Vida Útil**: Número de años que el sistema de almacenamiento puede realizar satisfactoriamente antes
- necesidad de ser reemplazado.
- **Ciclos de Vida**: Número total de ciclos de carga y descarga que el sistema de almacenamiento puede
- Administrar en su vida.
- **Temperatura de Trabajo:** Temperatura necesaria para un funcionamiento óptimo.
- **Tiempo Típico de Carga**: Tiempo que le toma a la batería alcanzar su valor nominal.
- **Tiempo Típico de Descarga**: Tiempo que le toma a la batería alcanzar el 10% de su valor nominal.
- **Porcentaje de Perdidas por día**: Valor porcentual de las pérdidas en base al total del sistema diario.
- **Eficiencia**: Relación de "salida de potencia útil" sobre "entrada de potencia total".
- **Costo por kWh**: costo de almacenamiento por kWh de cada tecnología.

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

446

Tabla 3: Comparación de Baterías por Tecnología

Tipo de Almacenamiento	Voltaje Nominal (V)	Tiempo de Respuesta	Energía Específica (Wh/Kg)	Densidad Energética (Wh/L)	Vida Útil (Años)	Ciclos de Vida	Temperatura de Trabajo (°C)	Tiempo Típico de Carga	Tiempo Típico de Descarga	Porcentaje de Pérdidas por día	Eficiencia Energética (%)	Costo por kWh (USD/kWh)[1]
Plomo - Ácido	2.1	< segundos	35 - 40	80 - 90	10	250 - 1500	–	Horas	Minutos	0.3	85	147 - 263
Plomo - Ácido (GEL)	2 - 6	< segundos	42	30 - 80	12	100 - 2000	–	Horas	Horas	0.3	81	150 - 369
Litio (NMC)	3.6 - 3.7	< segundos	175	345	14	1000 - 2000	–	Horas	Horas	0.1	92.5	480 - 775
Litio (LFP)	3.2	< segundos	120	220	10	1000 - 2000	–	Horas	Horas	0.1	86.5	600 - 1020
Titanato de Litio	2.4	< segundos	110	177	17	6000 - 20000	–	Horas	Horas	0.1	96.5	473 - 1260
Litio (NCA)	3.8	< segundos	215	120	14	± 500	–	Horas	Horas	0.2	92.5	450 - 729
Batería de Sal Fundida (ZEBRA)	2.58	Minutos	90	160	20 - 30	± 7000	400 - 700	–	Horas	1 - 8	90 - 99	219
Sulfuro de Sodio (NaS)	2	< segundos	206	150 - 300	16	± 5500	300	Horas	> Horas	7	85	386 - 735
Redox de Vanadio	1.15 - 1.55	segundos	45	15 - 25	10 - 20	> 10000	–	Horas	> Horas	0.2	75 - 80	150 - 1000
Redox (ZnBr)	1.8	segundos	50	39	12	> 2000	–	Horas	> Horas	15	75.9	525 - 1000
Níquel - Cadmio	1.2	< segundos	40 - 70	50 - 120	15	1500 - 3000	–	Horas	Minutos	0.32	70 - 90	400 - 1200
Níquel - Metal Hidruro	1.2	< segundos	70 - 120	140 - 300	8	500 - 2000	–	Horas	> Horas	0.5	75	800 - 3500

Referencia: Los datos para cada tecnología fueron obtenidos de International Renewable Energy Agency (IRENA), U.S Energy Information Administration (EIA) y otras fuentes

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

447

Tabla 4: Aplicaciones de los Almacenamientos de Energía

Tipo de Tecnología	Balance Energetico	Calidad de Energia	Generación Eléctrica	Servicios Auxiliares	Generación Eléctrica en Horas punta	Alto consumo de Corriente	Almacenamiento	Transporte	Integración con Renovables
Hidroelectricas con Central de Bombeo	√	√			√		√		
Volantes de Inercia	√	√					√	√	
Aire Comprimido	√				√		√		√
Hidrogeno Centralizado	√	√	√		√				
Gas Natural Sintetico			√		√				
Capacitores de Doble Capa	√	√							
Bobinas Magnéticas Superconductoras	√	√							
Plomo - Acido	√	√		√				√	
Plomo - Acido (GEL)	√	√		√			√	√	
Litio (NMC)				√			√	√	
Litio (LFP)				√		√	√		
Titanato de Litio				√			√		
Litio (NCA)				√			√	√	
Bateria de Sal Fundida (ZEBRA)			√		√		√		
Sulfuro de Sodio (NaS)	√	√	√	√	√		√		√
Redox de Vanadio	√			√			√		
Redox (ZnBr)	√			√			√		
Niquel - Cadmio	√							√	
Niquel - Metal Hidruro	√							√	

Referencia: (ETESA, 2019)

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

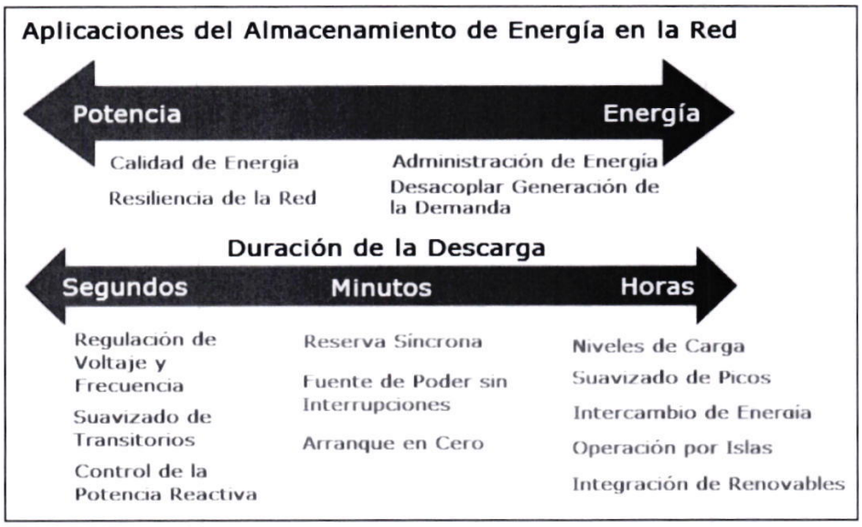
Aplicaciones de los Sistemas de Almacenamiento de Energía en la Red Eléctrica

En años anteriores, la energía eléctrica no podía almacenarse económicamente en grandes cantidades y tenía que producirse en el instante en que se necesitaba y se consumía tan rápido como era su producción.

Las tecnologías modernas de almacenamiento de energía han cambiado todo eso, allanando el camino para la adopción de fuentes de energía renovables, la oferta de nuevos servicios al cliente y una red más segura y rentable.

Con el avance de la electrónica de potencia y la reducción de costos en los materiales de construcción de los sistemas de almacenamiento, se hace viable su aplicación en los sistemas eléctricos de potencia como se muestra en la Figura 79.

Figura 79: Tiempo de descarga según aplicación en la Red Eléctrica.



Referencia: (Grid Scale Energy Storage Systems, s.f.)

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

449

Integración de Renovables:

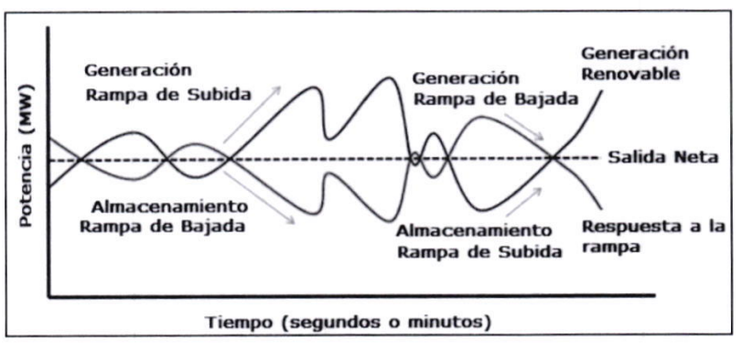
Aparte de la variabilidad del suministro, el problema con estas fuentes de energía intermitentes es que la energía puede estar disponible cuando no se necesita y puede no estar disponible cuando se necesita. Aunque no hay Sol durante la noche, al menos sabemos que el Sol sale todos los días y la variación de la intensidad de radiación recibida tiende a coincidir aproximadamente con el perfil de demanda de electricidad. El viento sin embargo es menos predecible.

Sin embargo, el almacenamiento de energía es especialmente adecuado con estas tecnologías para amortiguar y suavizar la variabilidad de estos sistemas y se está utilizando ampliamente para este propósito.

Seguimiento de las Rampas de Generación:

Es el cambio de generación de potencia de salida a lo largo de marcos de tiempo que van desde unos pocos segundos a unos pocos minutos. Similar al seguimiento de la demanda, el servicio auxiliar de respuesta a rampa de generación implica recursos que compensan la rampa de salida. Por lo tanto, los recursos utilizados para el servicio de rampa proporcionan una variabilidad de salida que es la inversa de la variabilidad de salida de otras generaciones debido a la rampa. Un ejemplo de esto lo vemos en la Figura 80.

Figura 80: Generación de Energía Renovable y Almacenamiento en Rampa



Referencia: (E&I Consulting, s.f.)

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

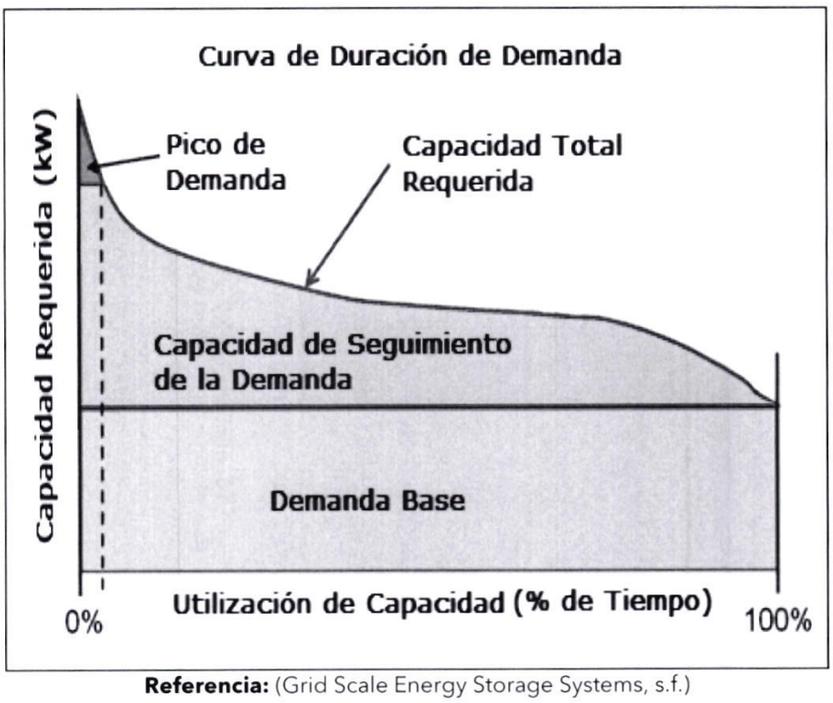
Seguimiento de la Demanda

El seguimiento de carga se requiere durante las llamadas "horas de carga" en el ciclo de demanda eléctrica diaria:

- Mientras que la demanda eléctrica aumenta en la mañana a medida que las personas comienzan su día y se preparan para el trabajo y la escuela y otras actividades diarias normales.
- A medida que la demanda eléctrica disminuye por la noche, el trabajo y las actividades domésticas disminuyen.

En la Figura 81 se observa el modelo de la curva de duración de la demanda y en la Figura 82 la curva de duración de la demanda horaria del año 2024, en Panamá.

Figura 81: Curva de Duración de la Demanda

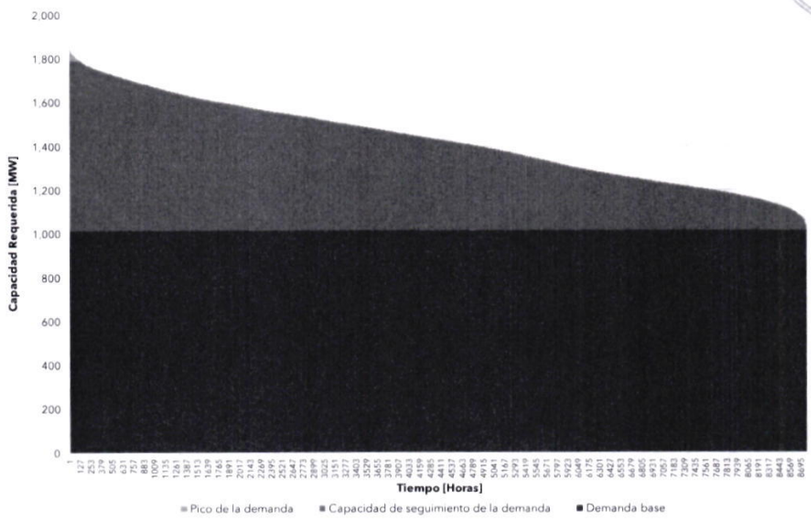


Referencia: (Grid Scale Energy Storage Systems, s.f.)

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

451

Figura 82: Curva de duración de la demanda eléctrica de Panamá 2024



Referencia: (ETESA, 2025)

Transmisión y Distribución

Calidad de Energía

La calidad de energía describe la capacidad de la red eléctrica para suministrar un flujo de energía limpio y estable que actúa como una fuente de alimentación que siempre está disponible, tiene una forma de onda sinusoidal sin ruido y está siempre dentro de las tolerancias de voltaje y frecuencia.

Los principales factores que contribuyen a la inestabilidad del voltaje y la interferencia en, o la distorsión de la forma de onda del voltaje, son el flujo de potencia reactiva y la presencia de transitorios y armónicos en la red como resultado de las cargas reactivas y los circuitos de conmutación de alta potencia conectados a ella.

La mayoría de las cargas conectadas al sistema de distribución de la red, como motores, transformadores y cables, son de naturaleza inductiva y hacen que fluya en el circuito un componente reactivo de la corriente que los alimenta, así como un flujo de corriente resistiva que alimenta el dispositivo.

La energía para suministrar esta corriente reactiva (ya sea para cargas inductivas o capacitivas) tiene que ser suministrada por el generador, que

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

452

debe desviar parte de su energía disponible para satisfacer esta demanda.

La consecuencia es que la tensión que crea la corriente resistiva disminuye, lo que reduce la tensión en la red y, por lo tanto, la potencia disponible para la carga. Esto significa que el voltaje en cualquier punto de la red será menor que el voltaje disponible para una carga resistiva pura y dependerá de la magnitud de la potencia reactiva transportada por la línea de transmisión.

El método aplicado para este inconveniente es la corrección del factor de potencia, que busca contrarrestar los flujos de potencia reactiva con pérdida introduciendo componentes reactivos compensadores para equilibrar las reactancias positivas y negativas para devolver el factor de potencia a la unidad y así reducir la corriente del generador.

La mayoría de las cargas en la red son inductivas y la compensación pasiva del factor de potencia se puede proporcionar en la subestación conectando los capacitores en paralelo con la carga.

Sin embargo, las cargas en la red suelen ser variables, ya que son el agregado de las cargas de numerosos consumidores, mientras que la capacidad de los bancos de condensadores solo está disponible en incrementos fijos, de modo que la compensación solo es efectiva en un rango de reactancia estrecho. Los consumidores industriales pueden proporcionar esta compensación en sus propias instalaciones.

De manera similar, los reguladores de voltaje y los transformadores de potencia con cambiadores de tomas en carga (OLTC) se instalan en subestaciones para proporcionar control de voltaje.

Aplazamiento de Actualización de los Sistemas

El almacenamiento de energía puede retrasar la sustitución tanto de antiguos equipos como de sistemas de la red eléctrica, gestionando así un ahorro de dinero para los propietarios de infraestructuras de transmisión. Por ejemplo; cuando un transformador se reemplaza por un transformador nuevo, más grande, su tamaño se selecciona para manejar incremento de la demanda eléctrica en los próximos 15 a 20 años. Esto conduce a la subutilización de transformadores para la mayoría de sus vidas. Sistemas de almacenamiento de energía puede descongestionar los transformadores existentes durante las horas pico, evitando así la necesidad de equipos de mayor potencia.

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

453

Extensión de la vida útil de los equipos de Transmisión y distribución

Al igual que con los aplazamientos de la actualización de Transmisión y Distribución, se pueden utilizar pequeñas cantidades de almacenamiento para prolongar la vida útil del equipo T&D si el uso del almacenamiento reduce la carga y, por lo tanto, el calentamiento y desgaste excesivos del equipo existente que se acerca a su vida útil prevista. El resultado es una extensión de la vida útil de los equipos existentes. Quizás el ejemplo más convincente en nuestro caso sea las líneas de transmisión. La prolongación de la vida útil se logra reduciendo la carga máxima de estas líneas que, a su vez:

- Evita la sobrecarga excesiva de las líneas.
- Reduce el número o la posibilidad de fallas a tierra que tienen un efecto dramático en la vida útil del cable.

Suavizado de Picos de Demanda

Sin almacenamiento de energía, las cargas pico de corta duración normalmente son suministradas por generadores de acción rápida como las turbinas de gas. Estos son activos costosos, generalmente con menor eficiencia térmica que los generadores de carga base, y pueden tener un factor de carga de solo 2% o menos debido al tiempo limitado que se requieren.

El suavizado de picos se refiere al recorte de la demanda de capacidad de generación inmediata durante los cortos períodos de demanda máxima y al suministro de cargas en lugar de fuentes de energía almacenadas. Por lo tanto, la capacidad de generación o transmisión máxima se puede reducir por el potencial total de todo el almacenamiento más las cargas diferibles, lo que ahorra el gasto de esta capacidad.

Comercial, Industrial y Residencial

Transferencia de Energía en función de la hora

La transferencia de energía eléctrica en función de la hora implica el almacenamiento de energía eléctrica cuando el uso y el valor de la energía son bajos, de modo que la energía se puede usar o vender, más adelante, cuando el uso y el valor de la energía son altos.

El objetivo es utilizar energía de bajo precio en momentos en que el costo para producir la energía o el precio para comprar la energía son altos (es decir, durante los períodos de "demanda máxima"). El precio para comprar esa energía en tiempo real (cuando sea necesario) es alto porque la demanda de electricidad es alta. El costo de producción de energía en ese momento también es alto, principalmente porque se utiliza la generación con menor consumo de combustible.

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

Funcionamiento como islas

Pueden requerirse medidas especiales para garantizar suministros a clientes remotos. Algunas comunidades isleñas o sitios industriales sin capacidad de generación local pueden estar conectadas a la red a través de un único enlace vulnerable. En tales casos, la energía de emergencia puede ser proporcionada por baterías grandes capaces de mantener el suministro por un día o más.

Servicios Auxiliares

Regulación y Respuesta de Frecuencia

La regulación de frecuencia es el medio por el cual se mantiene la frecuencia de sincronización de los generadores de una red eléctrica dentro de límites aceptables, típicamente 50 o 60 Hz. Esto se realiza mediante ajustes continuos a la potencia de salida para lograr un valor estable de la frecuencia, sin embargo, cuando el consumo de energía eléctrica excede momentáneamente la energía que se está generando en ese momento, ya sea, por un mayor uso por parte del cliente o una capacidad de generación reducida en algún lugar de la red, el aumento de carga en los generadores en operación resultará en una disminución de su velocidad de rotación y, dado que los generadores son máquinas sincrónicas, la frecuencia de la corriente alterna de la red también disminuirá.

Del mismo modo, si el consumo cae repentinamente por debajo de la potencia generada o si se cambia la capacidad de generación a la red, el generador se acelerará y la frecuencia de la red aumentará. La razón principal para un control de frecuencia preciso es sincronizar la velocidad de rotación de los muchos generadores conectados a la red.

El desajuste de frecuencia entre los generadores en la red puede tener serias consecuencias. Cuando dos generadores síncronos se conectan en paralelo y suministran a la misma carga, solo hay una corriente a través de la carga, de modo que la velocidad de rotación y la salida de frecuencia de ambos generadores serán iguales y están bloqueadas a la frecuencia de la corriente a través de la carga.

Los pares de torque del generador pueden ser diferentes, pero son máquinas síncronas y, como tales, se sincronizarán entre sí. Si el motor primario de una máquina no produce suficiente energía para mantener el rotor de su generador girando a la velocidad síncrona deseada, la energía fluirá desde el otro motor primario para que ambos giren a una nueva velocidad síncrona. Esto se conoce como "motorización" del generador.

El generador "motorizado" más lento se convierte en una carga para el sistema y, de hecho, comenzará a impulsar su propio motor primario que, en consecuencia, estará sujeto a fuerzas involuntarias. Además, esto puede dar lugar a corrientes excesivas en la red. Esta no es una condición normal y puede dañar el generador o su motor

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

455

principal, así como la inestabilidad en la red.

Para evitar la posibilidad de dañar los escenarios de desequilibrio de energía que afectan adversamente a la red, el operador de la red debe mantener una capacidad de generación de reserva para cubrir los desequilibrios con diferentes magnitudes y duraciones para mantener la capacidad de generación lo más cerca posible en línea con la demanda en todo momento.

La gestión de este requisito requiere una capacidad de reserva de acción rápida que se puede conectar a la red para proporcionar un balanceo inmediato a corto plazo y, posiblemente, una respuesta más lenta, generando capacidad para cubrir los desajustes de capacidad de mayor duración. La regulación de frecuencia implica la conciliación momento a momento de la demanda de electricidad y el suministro. La conciliación se realiza cada pocos segundos y la duración de la intervención o el soporte puede ser de milisegundos a minutos.

Además, la justificación económica de los sistemas de almacenamiento por baterías para regulación de frecuencia podría variar según las características propias de la operación del sistema eléctrico analizado.

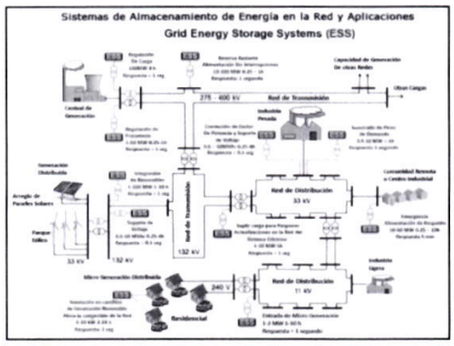
Reserva

La capacidad de reserva es esencialmente una generación de respaldo para la red eléctrica, para su uso si una o dos fuentes de energía grandes no están disponibles de forma inesperada. Por lo tanto, al utilizar el almacenamiento como capacidad de reserva de suministro eléctrico, la necesidad y el costo de las reservas basadas en la generación se compensan y, en menor medida, los costos de operación incurridos para la capacidad de reserva basada en la generación se reducen / evitan. La cantidad de capacidad de reserva necesaria depende de las normas relacionadas con la confiabilidad del suministro eléctrico (generalmente, 10 a 20% de la capacidad de suministro eléctrico normal). Cuando está cargado, el almacenamiento puede, en la mayoría de los casos, proporcionar reservas simplemente al estar listo para descargar. Además, las reservas se necesitan con poca frecuencia, por lo que el almacenamiento utilizado para la capacidad de reserva en realidad se descarga con poca frecuencia. Eso le da al almacenamiento una ventaja sobre las reservas de hilatura basadas en la generación, ya que la generación utilizada debe estar realmente "girando" y lista para recuperar la carga en cualquier momento.

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

456

Figura 83: Ejemplo de aplicaciones de los Sistemas de Almacenamiento en la Red Eléctrica.



Referencia: (Grid Scale Energy Storage Systems, s.f.)

Impactos Ambientales

Al momento de evaluar y de comparar las distintas fuentes de energía que pueden ser utilizadas para la producción eléctrica, cada vez cobran mayor importancia las consideraciones referidas a su impacto ambiental. Estas consideraciones son tan importantes que están afectando decisivamente la configuración del futuro energético de muchos países.

En la actualidad, la generación de energía eléctrica se realiza optimizando los sistemas de producción para minimizar y eliminar los contaminantes; esto es gracias a la evolución tecnológica. Debido a esto, es posible utilizar combustibles con un alto poder energético generando un menor impacto ambiental y a la vez emplear materias primar que de lo contrario no serían aprovechadas.

Como cualquier otra actuación humana, las actividades necesarias para generar, transportar y distribuir la electricidad dan lugar a determinados efectos sobre el medio ambiente que se controlan y se tratan de minimizar, mediante medidas preventivas y correctoras.

La generación de energía eléctrica conlleva el consumo de recursos naturales (principalmente combustibles), emisiones a la atmósfera que generan de forma directa e indirecta una serie de impactos tanto a nivel local como global.

Cada tecnología de generación de energía eléctrica presentada tiene sus ventajas y desventajas operativas, innovación, costos, riesgos e impactos ambientales.

Dentro de esos impactos ambientales pueden mencionarse los siguientes:

1. **Impactos locales:**
   1.1. **Explotación de los suelos:** La producción, transporte, almacenamiento y consumo de

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

457

energía suponen una importante ocupación de suelos, y desplazan otros usos de la corteza terrestre.

1.2. **Agotamiento progresivo de los recursos de origen fósil no renovables:** Hay un gran número de las fuentes actuales de energía que son recursos no renovables, con riesgo de agotamiento, con el consiguiente impacto en las generaciones futuras.

1.3. **Generación de residuos sólidos:** La producción y consumo de energía produce residuos sólidos, que a menudo son de difícil y costoso tratamiento para evitar impactos ambientales significativos. Los residuos radioactivos representan un problema particularmente importante.

1.4. **Contaminación del aire:** La producción, transporte y consumo de energía es hoy fuente de emisiones atmosféricas: el dióxido de carbono, los óxidos de azufre y de nitrógeno, el metano, el monóxido de carbono, los metales pesados, las partículas en suspensión y los clorofluorocarbonos, son algunos de los contaminantes principales.

1.5. **Contaminación del suelo y del agua:** La producción, transporte y consumo de energía es hoy fuente de emisiones atmosféricas: el dióxido de carbono, los óxidos de azufre y de nitrógeno, el metano, el monóxido de carbono, los metales pesados, las partículas en suspensión y los clorofluorocarbonos, son algunos de los contaminantes principales.

1.6. **Contaminación visual:** Las instalaciones de generación de energía eléctrica conllevan un impacto visual, que puede ser significativo cuando se afecta a un entorno natural. En lo relativo a la distribución de energía eléctrica, el impacto visual más significativo es el de las redes y de las diferentes actuaciones acometidas a su alrededor en entornos en algunos casos con un alto valor ambiental.

1.7. **Contaminación auditiva:** Otro de los impactos de la generación y distribución de la energía eléctrica es la inevitable generación de ruidos. La huella sonora de las instalaciones está determinada por su ubicación y por sus condiciones técnicas, por lo que no se puede generalizar el impacto para todas las instalaciones.

2. **Impactos globales:**

2.1. **Contribución al cambio climático:** En la generación de energía eléctrica en centrales térmicas, la quema de combustibles fósiles da lugar a emisiones de dióxido de carbono (CO_2) y óxido nitroso (N_2O). Con el fin de minimizar lo máximo posible estas emisiones, se tiene en cuenta el valor calorífico neto de los combustibles utilizados (contenido energético), su factor de emisión de CO_2 y N_2O (emisiones por cantidad de combustible utilizado) y las tecnologías disponibles (incremento de eficiencia energética), como consecuencia

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

de la acentuación del efecto invernadero. Con sus consecuencias, entre otras, de posible subida del nivel del mar, extensión de la aridización, y difusión de enfermedades.

2.2. **Reducción drástica de la capa de ozono:** En los años setenta se descubrió que ciertos productos químicos, clorofluorocarbonos, o CFCs, usados hasta entonces como refrigerantes y como propelentes en los aerosoles, dan lugar a la destrucción de la capa de ozono que rodea el planeta tierra, presenta consecuencias para la salud humana (mayores cánceres de piel y enfermedades de visión, por ejemplo).

2.3. **Incremento en la formación de lluvias ácidas:** La lluvia ácida es un fenómeno ambiental generado por las emisiones de óxidos de nitrógeno y azufre a la atmósfera, tiene consecuencias negativas para los ecosistemas y para las infraestructuras humanas. No se trata de un fenómeno local, ya que las emisiones de estas sustancias pueden dar lugar a lluvias ácidas a miles de kilómetros de distancia del foco de emisiones.

2.4. **Pérdida de los ecosistemas y biodiversidad:** La conservación de la biodiversidad se viene haciendo más difícil a lo largo de los años con el actual desarrollo económico. Debido a esto, disminución de la biodiversidad es un grave problema no sólo estético y cultural, sino también, y, sobre todo, de disminución de la información genética que necesitamos para producir nuevos fármacos y materiales.

Si bien las energías renovables no utilizan combustibles fósiles en su generación esto no es suficiente argumento como para aseverar que son tecnologías que no impactan el medioambiente. Si la matriz de generación energética es optimizada basándose únicamente en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, nuevos impactos podrían ser introducidos en la región estudiada a partir de otras emisiones (por ejemplo, NOx y SO2).

Así, se vuelve imperante una nueva perspectiva respecto a los impactos ambientales que puede ocasionar la generación eléctrica, de modo de tener claridad de los impactos transversales de estas tecnologías y entregar elementos de análisis que puedan servir para balancear la penetración de cada tecnología de generación renovable no convencional.

La herramienta de análisis de ciclo de vida (ACV) es cada vez más utilizada a nivel nacional e internacional y ha demostrado su utilidad en todos los campos de producción/generación. La metodología de ACV permite la evaluación de impactos ambientales en productos y servicios a lo largo de todo su ciclo de vida.

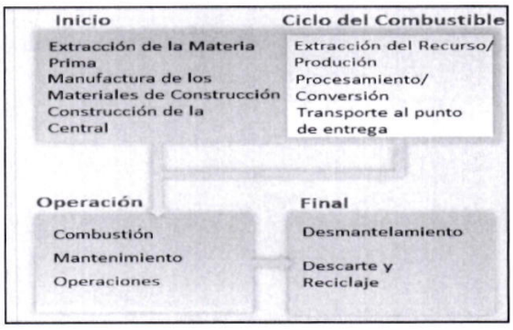
El análisis de ciclo de vida es una herramienta de toma de decisiones muy útil a la hora de seleccionar entre diferentes alternativas que proveen de un mismo producto, en este caso la energía.

La Figura 84 es una representación visual del ciclo de vida general para cualquier fuente de generación.

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

459

Figura 84: Aspectos considerados en un Análisis de Ciclo de Vida para un recurso energético



Referencia: (National Renewable Energy Laboratory, 2013).

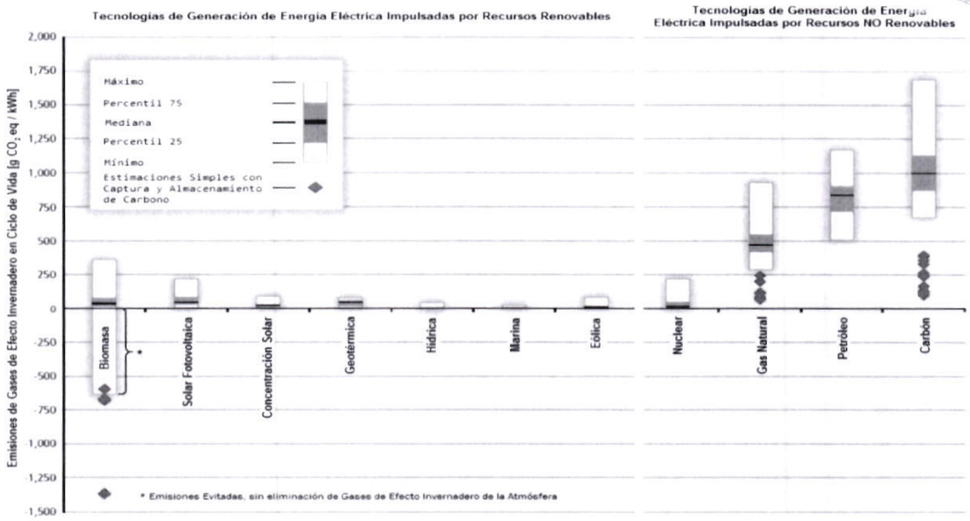
Las tecnologías más responsables por impactos negativos al ambiente son aquellas dependientes de combustibles fósiles como el carbón y derivados del petróleo; seguidamente por las centrales que operan con gas natural y por las centrales nucleares por sus nocivos residuos de índole radiactiva. Por otra parte, tecnologías de generación con recursos renovables presentan huellas de carbono muy bajas, esto se muestra en la Figura 85.

A pesar de que estas tecnologías renovables no liberan emisiones de gases de efecto invernadero al ambiente como lo hacen las termoeléctricas convencionales, las principales fuentes de huellas de carbono surgen de los procesos de extracción de la materia prima y manufactura de los materiales de construcción. Dentro de los elementos de construcción que contribuyen a las huellas de carbono pueden mencionarse: las aspas de las turbinas de viento para los parques eólicos, los paneles de silicio cristalino para los parques solares fotovoltaicos y los espejos reflectores en centrales de concentración solar.

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

460

Figura 85: Huellas de Carbono de diferentes tecnologías de Generación



Referencia: (National Renewable Energy Laboratory, 2011)

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

461

Referencias

Isothermal Compressed Air Energy Storage. (2012, Octubre). Retrieved from https://www.energy.gov/sites/prod/files/SustainX.pdf

Appa renovables. (2022). *¿Qué es la energía marina?* Retrieved from https://www.appa.es/appa-marina/que-es-la-energia-marina/

Apteligent. (2016, Octubre 26). *Li-ion Batteries in the Hot Seat (A Primer on the Science of Exploding Smartphones)!* Retrieved from http://www.apteligent.com/2016/10/li-ion-batteries-hot-seat-primer-science-exploding-smartphones/

Aqua Helica. (n.d.). *Hidro tornillo como micro central eléctrica*. Retrieved from http://www.ib-deutschmann.de/html/body_hydroenergie.html

Betsolar. (2023). *Estructuras flotantes*. Retrieved from https://betsolar.es/producto/estructuras-2/

Caloryfrio. (2016, Febrero 2). *Usos de la energía geotérmica en función de su temperatura.* Retrieved from https://www.caloryfrio.com/energias-renovables/geotermia/usos-energia-geotermica-en-funcion-temperatura.html

Canary Systems. (2016, Agosto). *Project Profile: Rocky Mountain Pumped Storage Hydroelectric Plant*. Retrieved from http://canarysystems.com/2016/08/project-profile-rocky-mountain-pumped-storage-hydroelectric-plant/

Carrera por Energía Solar Espacial. (2017, Febrero 24). Retrieved from Proyectos FSE: http://www.proyectofse.mx/2016/10/05/la-carrera-por-la-energia-solar-espacial/

Chemical Glossary. (2017, Agosto 29). *Lead-acid battery*. Retrieved from https://glossary.periodni.com/glossary.php?en=lead-acid+battery

Department of Energy U.S. (n.d.). *Offshore Wind Transmission Federal Planning & Support*. Retrieved from https://www.energy.gov/gdo/offshore-wind-transmission-federal-planning-support

Deutsche Welle. (2016, Junio 15). *Hydrogen and wind: Allies for sustainable energy*. Retrieved from http://www.dw.com/en/hydrogen-and-wind-allies-for-sustainable-energy/a-19330382

E&I Consulting. (n.d.). Retrieved from http://energystorage.org/energy-storage/energy-storage-benefits/benefit-categories/grid-operations-benefits

El Mundo. (2022, Mayo 5). *Las cometas que quieren revolucionar la generación de energía eólica.* Retrieved from https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.elmundo.es%2Fciencia-y-salud%2Fmedio-ambiente%2F2022%2F05%2F05%2F6262d61ee4d4d80e128b457e.html&psig

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

=AOvVaw0RsFjlBuQlo89NnGmFHKCg&ust=1691502448645000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=2ahUKEwik6fzl

Energy Review. (2020, Mayo 15). *Los paneles solares de grafeno una nueva solución para instalaciones de pequeña escala*. Retrieved from https://www.revistaenergy.com/solar/los-paneles-solares-de-grafeno-una-nueva-solucion-para-instalaciones-de-pequena-escala

Energy Sources and Energy Use. (2018). Retrieved from https://www.nationalgeographic.org/activity/energy-sources-and-energy-use/

Energy Storage News. (2019, Febrero 8). *Energy Storage News*. Retrieved from https://www.energy-storage.news/news/uae-integrates-648mwh-of-sodium-sulfur-batteries-in-one-swoop

Energy Storage Technologies in the Electricity grid. (2017, Septiembre). Retrieved from https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/12027/396460.pdf?sequence=1

Energy Storage Toolbox. (2018). *Energy Storage Toolbox*. Retrieved from https://estoolbox.org/index.php/8-samples/8-tes-introduction

Energy Techonology Systems Analysis Programme & International Renewable Energy Agency. (2016, Marzo). *Wind Power - Technology Brief*. Retrieved from https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA-ETSAP_Tech_Brief_Wind_Power_E07.pdf

ETESA. (2019).

ETESA. (2023). Retrieved from https://www.cnd.com.pa/index.php/informes/categoria/informes-de-mercado?tipo=1118

ETESA. (2025). *ETESA*.

ETSI. (n.d.). *Captador solar fresnel - Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla*. Retrieved from https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/12072/fichero/Memoria%252FCap%C3%ADtulo+2.pdf

EV Lithium. (n.d.).

Formosa, C. P. (2018, Agosto 1). *Definición de energía solar*. Retrieved from https://www.ingenierosformosa.com.ar/?pag=leer&id=91

Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems. (n.d.). *Power to Gas*. Retrieved from https://www.ise.fraunhofer.de/en/business-areas/hydrogen-technologies/hydrogen-production-by-water-electrolysis/power-to-gas.html

Generadoras de Chile. (2021). *Energía Eólica*. Retrieved from http://generadoras.cl/tipos-energia/energia-eolica

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

463

geologiaymedioambiente. (2015, Febrero). Retrieved from https://geologiaymedioambiente.com/2015/02/turbinas-eolicas-flotantes/

Grid Scale Energy Storage Systems. (n.d.). Retrieved from https://www.mpoweruk.com/grid_storage.htm

Heliovis. (2020). *heliovis*. Retrieved from https://heliovis.com/technology/

Huang, Y., Chen, H., Zhang, X., Keatley, P., Huang, M., Vorushylo, I., . . . Hewitt, N. (2017, Mayo). *Techno-economic Modelling of Large Scale Compressed Air Energy Storage Systems*. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/317305678_Techno-economic_Modelling_of_Large_Scale_Compressed_Air_Energy_Storage_Systems?_sg=98g6HIPX22Wy_OuHwHQyzCREIMuObcwOi-_W3TD0HKjWISWAilEgmERoSO9kl8Edv5o1s86lvDHTozAmMMRHbaaZqv1WmhiEWw

IBM. (2012, Abril 20). *IBM Battery 500 - IBM creates breathing, high-density, light-weight lithium-air battery*. Retrieved from http://www.extremetech.com/computing/126745-ibm-creates-breathing-high-density-light-weight-lithium-air-battery

Ingemecánica. (n.d.). *Planta Termosolar con Tecnología de Torre*. Retrieved from https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn134.html

Ingeoexpert. (2018, marzo 22). *Ingeoexpert*. Retrieved from https://ingeoexpert.com/2018/03/22/como-funciona-una-central-hidroelectrica/

International Fleet World. (2018, Septiembre). Retrieved from https://internationalfleetworld.com/whatever-happened-to-hydrogen/

International Renewable Energy Agency. (2014). *IRENA*. Retrieved from irena.org

IRENA. (2020). *www.irena.org*. Retrieved from https://www.irena.org/publications/2020/Nov/Innovation-outlook-Thermal-energy-storage

Irena Electricity Storage Cost. (2017). Retrieved from https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2017/Oct/IRENA_Electricity_Storage_Costs_2017.pdf

ITSE. (2020, Noviembre 17). *Promueven el conocimiento en energía solar térmica para combatir el cambio climático*. Retrieved from https://www.itse.ac.pa/Promueven-el-conocimiento-en-energia-solar-termica-para-combatir-el-cambio-climatico

Jóhannesson, T., & Chatenay, C. (2014, Marzo). *Direct Use of Geothermal Resources*. Retrieved from https://orkustofnun.is/gogn/unu-gtp-sc/UNU-GTP-SC-18-20.pdf

Kawasaki. (2018). *Battery Energy Storage System - GIGACELL - Frequently Asked Questions*. Retrieved from

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

http://global.kawasaki.com/en/energy/solutions/battery_energy/questions/index.html

Kim, K. J., Park, M.-S., Kim, Y.-J., Kim, J. H., Dou, S., & Skyllas-Kazacos, M. (2015, Junio 9). *A technology review of electrodes and reaction mechanisms in vanadium redox flow batteries.* Retrieved from http://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2015/ta/c5ta02613j/unauth#!div Abstract

Kougias, I. (2019, Octubre). *sciencedirect.com*. Retrieved from https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032119304575

Laboratory National Renewable Energy. (2019). Retrieved from https://www.nrel.gov/news/features/2019/beneath-solar-panels-the-seeds-of-opportunity-sprout.html

LACYQS. (2015). *Canal parabólico y fresnel.* Retrieved from https://concentracionsolar.org.mx/concentracion-solar/canal-parabolico-y-fresnel

Memarsa. (2023). *¿Qué es la energía solar?* Retrieved from http://www.instalaciones-electricas.net/que-es-la-energia-solar/

MeyGen // Nova Scotia. (n.d.). *simecatlantis.com // offshore-energy.biz*. Retrieved from https://simecatlantis.com/projects/meygen/ -- https://www.offshore-energy.biz/nova-scotia-drops-cape-sharp-tidal-turbine-project/

Millennium Energy Systems. (2016). *Colector Solar Fresnel*. Retrieved from http://www.millenniumenergies.com/wp-content/uploads/2016/02/FICHA-FRESNEL-MES.pdf

Ministerio de Ambiente. (2022, Julio 19). *Proyecto Termosolar: En tres hospitales panameños mitigarán el impacto del cambio climático al generar agua caliente sin emisiones (CO2).*

MITECO. (2021, Febrero). Retrieved from https://www.miteco.gob.es/es/prensa/estrategiadealmacenamientoenergetico_tcm30-522655.pdf

ML-Ingesol. (2023). *Energía solar fotovoltaica*. Retrieved from https://ml-ingesol.com.ar/alumbrados-autonomos/

Murata. (n.d.). *The Structure and Principle of Electrical Double Layer Capacitor*. Retrieved from https://www.murata.com/en-us/products/capacitor/edlc/techguide/principle

National Renewable Energy Laboratory. (2011). *Life Cycle Assessment Harmonization*. Retrieved from https://www.nrel.gov/analysis/life-cycle-assessment.html

National Renewable Energy Laboratory. (2012, Junio). Retrieved from https://www.nrel.gov/docs/fy12osti/52409-2.pdf

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

465

National Renewable Energy Laboratory. (2013, Enero). *Life Cycle Greenhouse Gas Emissions from Electricity Generation*. Retrieved from https://www.nrel.gov/docs/fy13osti/57187.pdf

New Energy and Fuel. (2010, Junio 15). *Wind to Fertilizer Construction Begins*. Retrieved from https://newenergyandfuel.com/http:/newenergyandfuel/com/2010/06/15/wind-to-fertilizer-construction-begins/

Nomura, S. (2015). *Store Electricity! - Opening of Energy Technology by Zero Electrical Resistance*. Retrieved from http://www.meiji.ac.jp/cip/english/frontline/nomura/index.html

Nuclear Power. (2014). *BWR - Boiling Water Reactor*. Retrieved from https://www.nuclear-power.net/bwr-boiling-water-reactor/

Nuclear Power. (2014). *Nuclear Power Plant*. Retrieved from https://www.nuclear-power.net/nuclear-power-plant/

Nuclenor. (2007). *Cuestiones sobre la Energía*. Retrieved from https://www.nuclenor.org/aula/222_07/capitulo8.htm#:~:text=El%20combustible%20nuclear%20se%20encuentra,se%20llama%20un%20reactor%20nuclear.

Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. (2013, Agosto). *Linear Concentrator System Basics for Concentrating Solar Power*. Retrieved from https://www.energy.gov/eere/solar/articles/linear-concentrator-system-basics-concentrating-solar-power

OVACEN. (2022). *Ventanas fotovoltaicas luminiscentes*. Retrieved from https://ovacen.com/ventanas-luminiscentes/

Pérez Porto, J. G. (2014, agosto 12). *Definición.DE*. Retrieved from Hidroeléctrica - Qué es, definición y concepto: https://definicion.de/hidroelectrica/

Plataforma Arquitectura. (2019, Febrero 21). Retrieved from https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/911968/veredas-que-generan-energia-a-traves-de-los-pasos-de-los-peatones

Powerthru. (2016). *Carbon Fiber Flywheel Technology for Government Applications*. Retrieved from http://www.power-thru.com/carbon_fiber_flywheel_technology.html

ProyectoFSE. (2018, Junio). *¿Sabes cómo funciona una turbina eólica de eje vertical?* Retrieved from http://www.proyectofse.mx/2018/06/28/turbina-eolica-de-eje-vertical/

Reactor Heavy Water. (2016). Retrieved from https://askeyphysics.org/2016/05/14/516-520-wkepowertorque/candu-reactor-schematic/

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ
AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

Renovables Verdes. (n.d.). *Energía maremotérmica.* Retrieved from https://www.renovablesverdes.com/energia-maremotermica/

Reve. (2012, Noviembre 7). *Construirán en Salta la primera termosolar de Argentina con una inversión de 100 millones de dólares.* Retrieved from https://www.evwind.com/2012/11/07/construiran-en-salta-la-primera-termosolar-de-argentina-con-una-inversion-de-100-millones-de-dolares/

Salgado, M., Zepeda, J., Prado, M. d., Villalobos, J., & Cruz, R. (2019, Octubre). *Celda biofotovoltaica para la generación de energía eléctrica a través de plantas vivas.* Retrieved from https://www.academia.edu/40802176/Celda_biofotovoltaica_para_la_generaci%C3%B3n_de_energ%C3%ADa_el%C3%A9ctrica_a_trav%C3%A9s_de_plantas_vivas

Saur Energy. (2019, Febrero 6). Retrieved from https://www.saurenergy.com/solar-energy-news/abu-dhabi-commissions-worlds-largest-storage-battery

Save the Earth. (2016, Diciembre). *The Limitless Power of Geothermal Energy* . Retrieved from https://savetheearth.coop/blog/power-geothermal-energy/

Scottish Renewables. (2016, Agosto). *The Benefits of Pumped Storage Hydro to the UK.* Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/312098425_The_Benefits_of_Pumped_Storage_Hydro_to_the_UK?_sg=3C5eh1Y9_mxzl_ifRNKuPnl7lXgv9sUpaATDLjpgTdH754UEnPQeTC3EmZv3OX5HIwQVQqSZTgtif4sM7KOCrUcNbD2A8MEXOA

Solar Reviews. (2022, Septiembre 26). *Smartflower solar tracker: a change for residential solar?* Retrieved from https://www.solarreviews.com/blog/solar-flower-smartflower-solar-tracker

Storage Battery Solutions, LLC. (2018). *Stationary / Standby Power*. Retrieved from http://www.sbsbattery.com/products-services/by-application/stationary-standby-power.html

The Agency for Science, Technology and Research. (2017, Enero 14). *A breath of fresh air: Improving zinc-air batteries*. Retrieved from https://www.sciencedaily.com/releases/2017/01/170114191153.htm

The National Academies Press. (2013). Retrieved from https://www.nap.edu/read/13355/chapter/6

Turbulent. (2022). *turbulent.be*. Retrieved from https://www.turbulent.be/

Universidad de Valladolid. (2016). *Sistemas de Almacenamiento de Energia*. Retrieved from https://uvadoc.uva.es/bitstream/10324/18325/1/TFG-P-432.pdf

Universidad Distrital Fransisco José de Caldas. (2015). *ANÁLISIS TÉCNICO DE LOS DIFERENTES TIPOS DE BATERÍAS*. Retrieved from http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/3663/1/ANA%CC%81LISIS%20TE%CC%81CNICO%20DE%20LOS%20DIFERENTES%20TIPOS%20DE%20

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

BATERI%CC%81AS%20COMERCIALMENTE%20DISPONIBLES%20PARA%20SU%20INTEGRACIO%CC%81N%20EN%20EL%20PROYECTO%20DE%20UNA%20MICRORRED%20AI

Universidad Tecnolófica Nacional - Buenos Aires. (2016). *Aprovechamiento de la Energía Undimotriz*. Retrieved from https://docplayer.es/9771882-Aprovechamiento-de-la-energia-undimotriz.html

Universidad Tecnológica Nacional - Buenos Aires. (2022, Abril 9). *El Proyecto Undimotriz avanza en el diseño del convertidor a escala real y en su instalación en el puerto marplatense*. Retrieved from https://undimotriz.frba.utn.edu.ar/el-proyecto-undimotriz-avanza-en-el-diseno-del-convertidor-a-escala-real-y-en-su-instalacion-en-el-puerto-marplatense/

University of Bristol. (n.d.). *Tidal lagoons and offshore wind*. Retrieved from https://www.bristol.ac.uk/cabot/research/casestudies/2017/tidal-lagoons.html

University of Southern California. (2010, Noviembre 10). *Get That "Just Right" Feel: Incorporating Phase Change Materials Into Textiles*. Retrieved from http://illumin.usc.edu/2/get-that-34just-right34-feel-incorporating-phase-change-materials-into-textiles/

Vortex Bladeless. (n.d.). Retrieved from https://vortexbladeless.com/es/tecnologia/

Wang, B., & Bauer, S. (2017, Abril 27). *Compressed air energy storage in porous formations: a feasibility and deliverability study*. Retrieved from https://pubs.geoscienceworld.org/pg/article/23/3/306/519394/compressed-air-energy-storage-in-porous-formations

Wikipedia. (2023, Julio 6). *Central termoeléctrica solar de torre*. Retrieved from https://es.wikipedia.org/wiki/Central_termoel%C3%A9ctrica_solar_de_torre

Wind for Future Magazine. (2020, Septiembre 29). *Solar Panel Highways – How do they Work?*

Windpower - Engineering&Development. (2018, Abril 17). *SheerWind's novel INVELOX wind-turbine patent portfolio up for auction*. Retrieved from https://www.windpowerengineering.com/sheerwinds-novel-invelox-wind-turbine-patent-portfolio-up-for-auction/

Windpower Engineering & Develpment. (2014, Abril 28). *Underwater compressed-air storage making good progress*. Retrieved from https://www.windpowerengineering.com/business-news-projects/underwater-compressed-air-storage-making-good-progress/

Yuba. (2015, Marzo 5). *Aplicaciones de la energía solar térmica*. Retrieved from http://www.yubasolar.net/2015/03/aplicaciones-de-la-energia-solar-termica.html

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ
AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS
468

ANEXO V

METODOLOGÍA DE LOS MODELOS OPTGEN Y SDDP

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

469

ETESA
Empresa de Transmisión Eléctrica, S.A.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

470

OptGen

Manual de Metodología

VERSIÓN 8.1

PSR

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

471

Tabla de contenido

1 Introducción 1
2 OptGen 1 - Estrategia de solución del primer enfoque 3
2.1 Introducción 3
2.2 Metodología de solución 5
2.3 Manejando incertidumbres 14
2.4 La incorporación de las restricciones de seguridad 17
2.5 Formulación detallada del problema 20
3 OptGen 2 - Estrategia de solución del segundo enfoque 26
3.1 Introducción 26
3.2 Metodología de solución 27
3.3 Manejando incertidumbres 30
3.4 Formulación detallada del problema 32
4 Consideraciones finales y comparación entre estratégias de solución 45

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS 472

1 INTRODUCCIÓN

En todo el mundo se nota un aumento en el interés sobre la planificación óptima de la expansión de sistemas de potencia. En los países emergentes de América Latina, Asia y África, con alto crecimiento de la demanda y recursos financieros limitados, el énfasis está en el plan de expansión más económico. En los países desarrollados, el crecimiento de demanda es generalmente más moderado. En estos casos, las fuentes de energía renovable variable (ERV) se están construyendo como parte de las políticas de descarbonización y para desplazar plantas térmicas más ineficientes. Para ambos los tipos de países, seleccionar el "mejor" de un grupo de alternativas es lo que caracteriza la naturaleza combinatoria del problema de planificación de la expansión.

El objetivo principal del proceso de planificación de la expansión es garantizar un equilibrio apropiado entre el suministro de electricidad y la demanda, es decir, determinar el conjunto óptimo de las plantas de generación y las vías de transmisión que deben ser construido para cumplir con los requisitos de la demanda a lo largo de un horizonte de estudio (medio y largo plazo), mientras minimiza una función de costos considerando: (i) costos de inversión (capital) y operación de las centrales de generación (combustible, O&M, etc.) y (ii) penalizaciones de energía no suministrada, también conocida como costo de déficit.

En términos generales, este proceso de decisión implica en el cumplimiento de criterios económicos, de confiabilidad y ambientales, en el ámbito de las políticas nacionales de energía. Además, uno de los mayores desafíos es cómo manejar las incertidumbres inherentes al proceso de planificación, tales como el crecimiento de la demanda, los caudales hidrológicos y la disponibilidad de generación, especialmente en los sistemas basados en renovables. Tomados en cuenta todos los factos mencionados, el problema de planificación de la expansión se modela como un grande y complejo problema estocástico multietapa entero mixto que debe ser solucionado por un algoritmo de optimización especializado.

Este manual presenta una descripción de la metodología adoptada por el modelo OptGen, herramienta computacional para la planificación de la expansión de sistemas de potencia. Las principales características del modelo son:

- Horizontes de estudio que varían desde 1 año hasta varias décadas;
- Tipos de proyectos candidatos diferentes que se puede contemplar en el estudio, tales como:
    - Producción de energía: plantas hidroeléctricas, centrales térmicas y fuentes renovables (eólica, solar, biomasa, etc.);
    - Interconexiones regionales y circuitos de transmisión (líneas, transformadores, enlaces CC, etc.);
    - Gasoductos, nodos de producción, estaciones de regasificación.

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

- Otros componentes de energía: baterías, estaciones de bombeo hidráulicas, etc.

- Datos financieros detallados de los proyectos como, por ejemplo, costos de inversión, cronogramas de desembolso, tiempo de vida útil, tiempo de construcción;
- Datos detallados específicos de los proyectos, tales como, tipo de decisión (obligatoria u opcional), tipo de variable de decisión (binaria, entera o continua), fechas mínima y máxima de entrada en operación, cronograma de entrada de unidades generadoras etc.;
- Restricciones adicionales, tales como, restricciones de energía / potencia firme, exclusividad, asociación y precedencia entre proyectos, mínima y máxima capacidad adicional, metas de capacidad de generación y así sucesivamente;
- Diferentes estrategias de solución están disponibles, basado principalmente en la partición del horizonte de expansión y en la solución encadenada de problemas con horizontes más cortos.

En resumen, el objetivo del OptGen es determinar un cronograma de inversiones de mínimo costo para la construcción de nuevas capacidades de generación (proyectos hidroeléctricos, térmicos y renovables), interconexiones regionales (o circuitos de transmisión detallados), fuentes de producción de gas y gasoductos. Esto se logra mediante la optimización del equilibrio entre los costos de inversión para construir nuevos proyectos y el valor esperado de los costos operativos y del déficit de energía.

Con el fin de determinar el mejor plan de expansión, el OptGen presenta dos tipos de estrategias de solución que pueden ser seleccionadas por el usuario. Esta selección se realiza a través de la opción "Opciones de Estudio>> Planificación de la expansión >> Estrategia de solución" en la pantalla principal.

- "OptGen 1": Utiliza técnicas de descomposición que permiten el uso del modelo SDDP para la evaluación de *trade-off* multietapa considerando operación hidrotérmica estocástica;
- "OptGen 2": Utiliza modelo horario de operación y escenarios de caudal / generación renovable para incorporar *unit commitment*, restricciones de rampa y reserva probabilística de generación.

Cada enfoque y sus aplicaciones correspondientes se explican en detalle a lo largo de este manual. El Capítulo 2 describe el primer enfoque, también llamado "OptGen 1", el Capítulo 3 describe el segundo enfoque, también llamado "OptGen 2" y el Capítulo 4 presenta las consideraciones finales y la comparación entre las dos estrategias.

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

2 OPTGEN 1 - ESTRATEGIA DE SOLUCIÓN DEL PRIMER ENFOQUE

2.1 Introducción

Como se mencionó en el capítulo anterior, el objetivo básico de la tarea de planificación es minimizar la suma de los costos de inversión y el valor esperado de los costos de operación. La formulación del problema para las decisiones de inversión requiere, además de las *variables continuas*, también *variables binarias* (si el proyecto de generación o transmisión está listo / no listo para operar en cada año $t = 1,\ldots,T$ del horizonte de estudio). Adicionalmente, las incertidumbres en los caudales fluviales, la generación renovable, la disponibilidad de los equipos y otros factores tornan la simulación de la operación del sistema esencialmente un problema de *optimización estocástico multi-etapa.*

Un grande desafío para este tipo de formulación es que ninguno de los paquetes de optimización actuales, tales como Xpress, CPLEX o Gurobi, puede resolver *directamente* un problema de optimización con todas las características de los problemas de inversión y operación: estocástico, multi-etapa y lineal-entero mixto. A continuación, se ilustra el esquema adoptado por PSR, conocido como la descomposición de Benders, que permite la obtención de la solución óptima global a través de la solución iterativa de problemas *separados* de optimización entera y optimización estocástica multi-etapa.

2.1.1 Descomposición de Benders

PSR ha sido pionera a nivel mundial en el desarrollo y aplicación de la técnica de descomposición de Benders para problemas de planificación. Este esquema separa el problema de optimización estocástico / entero en dos módulos de optimización, que se resuelven de manera iterativa hasta la obtención de la solución óptima global: (i) módulo de *inversión*, donde un plan de expansión candidato se determina a través de la solución de un problema de optimización lineal entero mixto (MILP); y (ii) módulo de *operación*, que calcula el valor esperado de los costos operativos resultante de cada plan candidato producido por el módulo de inversión, a través de la solución de un problema de optimización estocástico multi-etapa. La siguiente figura muestra el esquema de descomposición de Benders.

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

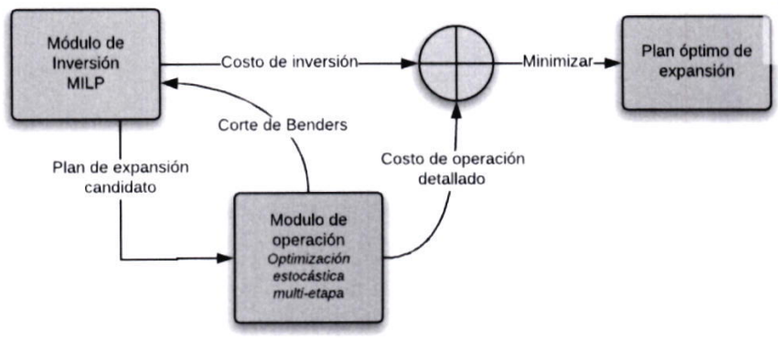


Figura 2.1 - Optimización del problema de planificación de la expansión por descomposición de Benders

2.1.1.1 Módulo de inversión

El módulo de inversión representa los proyectos candidatos como variables continuas / binarios a lo largo del horizonte de estudio. El problema de optimización es minimizar la suma del valor presente de los costos de inversión y una aproximación del valor esperado del costo de operación resultante del plan. Como se describe a continuación, esta aproximación es una función lineal por partes producida por el módulo de operación.

2.1.1.2 Módulo de operación

El módulo de operación calcula la política estocástica que minimiza el promedio de los costos de operación para todo el horizonte de estudio, teniendo en cuenta las incertidumbres en los caudales, generación renovable, fallas de los equipos, etc. Este problema se resuelve a través del algoritmo de Programación Dinámica Dual Estocástica (SDDP – *Stochastic Dual Dynamic Programming*), desarrollado por PSR. El algoritmo SDDP, que se puede interpretar como una descomposición de Benders estocástica multi-etapa, es reconocido mundialmente como uno de los esquemas más eficientes para resolver problemas reales de este tipo y es objeto de múltiplos artículos de investigación de las universidades en todo el mundo. Por ejemplo, en el Congreso Internacional ICSP (*International Congress on Stochastic Optimization*) en 2016, que es el principal evento académico en esta área, 10% de los artículos presentados tenía SDDP como tema.

2.1.1.3 Retroalimentación del módulo de operación para el módulo de inversión

Esta retroalimentación es una restricción lineal, conocida como un corte de Benders, que se añade al problema del módulo de inversión. El corte de Benders puede interpretarse como una aproximación lineal del valor esperado del costo de operación con respecto a diferentes decisiones de inversión en el plan de expansión, calculados en torno del plan candidato generado por el módulo de inversión. Esto significa que, en cada iteración del esquema, se mejora la representación aproximada del costo de operación en el módulo

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

de inversión. Con esto, tenemos el criterio de convergencia para el esquema de descomposición, que se presenta a continuación.

2.1.1.4 Criterio de convergencia

El valor de la solución óptima del módulo de inversión en cada iteración es un *límite inferior* para la solución óptima global (la razón es que la representación lineal del costo de operación es una aproximación por debajo del costo real). Por su vez, la suma del costo de la inversión del plan candidato y el costo "real" de operación (calculado por el módulo de operación) es un *límite superior* para el óptimo global (la razón es que el plan de candidato producido por el módulo de expansión es un plan factible, no necesariamente óptimo).

Como la incorporación de los cortes Benders en cada iteración mejora sucesivamente la aproximación del costo de operación en el módulo de inversión, entonces el límite inferior aumenta progresivamente. Por su vez, el límite superior disminuye progresivamente, porque los planes de expansión candidato se tornan mejores. Por lo tanto, sabemos que el óptimo global se ha logrado cuando los límites superior e inferior coinciden (con una tolerancia especificada por el usuario).

2.2 Metodología de solución

El problema de planificación de la expansión de un sistema de energía se modela como un problema de programación matemática, expresado en su forma simplificada por la formulación a continuación. Se supone, por simplicidad, que todas las plantas son proyectos candidatos para el problema de la expansión.

2.2.1 Formulación simplificada del problema

2.2.1.1 Función objetivo

$$\text{Min} \quad ci \cdot x + co \cdot g + cd \cdot d \tag{2.1}$$

ci	costo de la inversión del proyecto	M$
co	costo de operación del proyecto	M$
cd	costo de déficit del sistema	M$
x	decisión de inversión del proyecto	p.u.
g	producción de energía del proyecto	MWh
d	déficit de energía del sistema	MWh

2.2.1.2 Límites de las variables de decisión

$$x \leq 1$$

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

2.2.1.3 Suministro a la demanda

$$g + d = D$$

D	demanda de energía del sistema	MWh

2.2.1.4 Límites operacionales

$$g - \overline{g} \cdot x \leq 0$$

$\overline{g}$	producción máxima de energía del proyecto	MWh

Como podemos ver, este problema tiene estructura en bloques, que es adecuado para la aplicación de técnicas de descomposición.

	variables de inversión		**variables de operación**	
Min	$ci \cdot x$	+	$co \cdot y$	
s/a	$A \cdot x$			$\geq b$
			$C \cdot y$	$\geq d$
	$E \cdot x$	+	$F \cdot y$	$\geq h$

En "OptGen 1", aplicamos la metodología de descomposición de Benders, que se describe a continuación.

2.2.2 Técnica de descomposición de Benders

El problema de planificación de la expansión (2.1) de un sistema de energía se puede escribir como:

$$\text{Min} \quad z(x) = c(x) + w(x) \tag{2.2}$$

$$\text{s/a} \quad x \in X$$

Donde X representa el conjunto de decisiones de inversión viables, es decir, aquellas que cumplen con las restricciones $A \cdot x \geq b$. Las funciones $c(x)$ y $w(x)$ representan, respectivamente, los costos de inversión y operación del plan de expansión candidato x.

El proceso de optimización se muestra en la Figura 2.2.

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

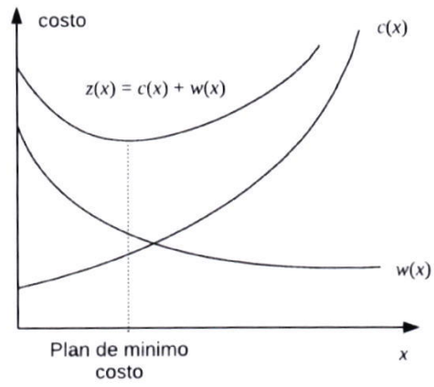


Figura 2.2 - Proceso de optimización de la expansión

Se observa que la función de costo de inversión $c(x)$ es **conocida**, mientras que la función de costo de operación $w(x)$ se representa implícitamente a través de la solución del siguiente problema de operación.

$$w(x) = \text{Min} \quad co \cdot y \tag{2.3}$$

$$\text{s/a} \quad F \cdot y \geq h - E \cdot x$$

$$y \geq 0$$

La metodología de solución adoptada en "OptGen 1", conocida como descomposición de Benders, construye una aproximación de la función $w(x)$ representada dentro del módulo de inversión (2.2), a partir de la solución del problema de la operación (2.3). La Figura 2.3 ilustra este proceso interactivo:

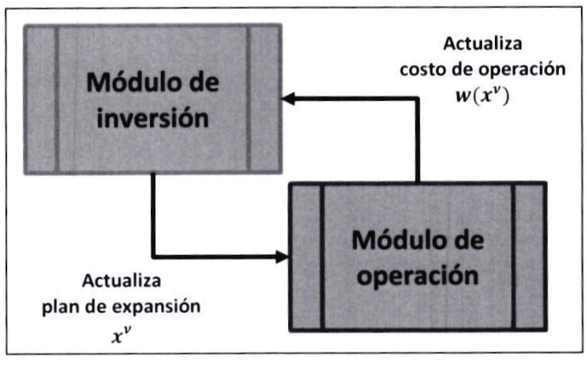


Figura 2.3 – Descomposición del problema de expansión

Esta figura muestra que la descomposición entre los problemas de inversión y operación permite la utilización de módulos independientes para cada problema. Esto significa que

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación GO6AFF191FB3870
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

el esfuerzo en la solución de un problema de inversión no se ve afectado por el nivel de detalles representado en la formulación de la operación.

2.2.2.1 Características de la función $w(x)$

El problema (2.3) es un modelo de optimización de programación lineal (PL). De la teoría de PL, el problema dual se formula como:

$$\begin{aligned} w(x) = \text{Max} \quad & \pi \cdot (h - E \cdot x) \\ \text{s/a} \quad & \pi \cdot F \leq co \\ & \pi \geq 0 \end{aligned} \tag{2.4}$$

De la teoría de PL, sabemos que los valores de la solución óptima del problema dual (2.4) y del problema de la operación (2.3)- conocido como primal - coinciden. Además, las variables duales π son el vector de multiplicadores simplex asociados a las restricciones del problema primal (2.3) en la solución óptima.

Sea $\Pi = \{\pi^i, i = 1, \dots, r\}$ el conjunto de soluciones básicas factibles del problema dual (2.4). Se observa que este conjunto no depende de la decisión de inversión x. Por lo tanto, la solución óptima podría, en principio, ser obtenida por enumeración:

$$w(x) = \text{Max} \quad \{\pi^i \cdot (h - E \cdot x), \pi^i \in \Pi\} \tag{2.5}$$

El problema (2.5) se puede reescribir de la siguiente manera equivalente:

$$\begin{aligned} w(x) = \text{Min} \quad & \alpha \\ \text{s/a} \quad & \alpha \geq \pi^1 \cdot (h - E \cdot x) \\ & \alpha \geq \pi^2 \cdot (h - E \cdot x) \\ & \dots \\ & \alpha \geq \pi^r \cdot (h - E \cdot x) \end{aligned} \tag{2.6}$$

Donde α es una variable escalar irrestricta (positiva o negativa). Como α debe ser mayor o igual a cada una de las restricciones $\alpha \geq \pi^i \cdot (h - E \cdot x)$, entonces debe ser mayor o igual al máximo de estas restricciones. Como el objetivo es minimizar α, se concluye que debe ser igual a $Max\{\pi^i \cdot (h - E \cdot x)\}$, que es la expresión (2.5).

La ventaja de la formulación de (2.6) es que muestra claramente que $w(x)$ es una función lineal por partes, como se muestra en la Figura 2.4:

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

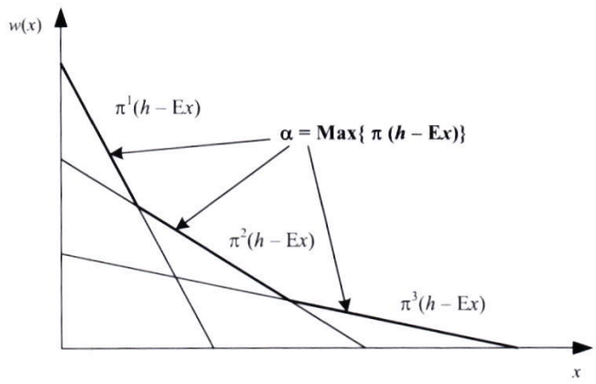


Figura 2.4 - Gráfico de la función w (x)

2.2.2.2 Problema aproximado de inversión

A través de la sustitución de la expresión (2.6) en el problema de expansión (2.2), obtenemos:

$$\begin{aligned} \min \quad & c(x) + \alpha && (2.7) \\ \text{s/a} \quad & \alpha \geq \pi^i \cdot (h - E \cdot x) && i = 1, \ldots, r \\ & x \in X \end{aligned}$$

El número de restricciones $\alpha \geq \pi^i \cdot (h - E \cdot x)$ en el problema (2.7) puede ser elevado. Sin embargo, sólo algunas de esas restricciones estarán activas (es decir, satisfechas en la igualdad) en la solución óptima; esto significa que las demás restricciones pueden ser relajadas, sin pérdida de optimalidad.

El algoritmo de descomposición de Benders, presentado a continuación, se basa en la relajación del problema (2.7) y en la generación iterativa de las restricciones $\alpha \geq \pi^i \cdot (h - E \cdot x)$ a partir de la solución del problema de la operación (2.3).

2.2.2.3 Algoritmo de descomposición

1. Inicializar: número de iteraciones $\nu = 0$; límite superior $\overline{z} = +\infty$; tolerancia para la convergencia ξ (dato de entrada)
2. Incrementar el número de iteraciones $\nu = \nu + 1$ y resolver el problema aproximado de la inversión:

$$\begin{aligned} z = \text{Min} \quad & ci \cdot x + \alpha && (2.8) \\ \text{s/a} \quad & \alpha \geq \pi^\mu \cdot (h - E \cdot x) && \mu = 1, \ldots, \nu - 1 \\ & x \in X \end{aligned}$$

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

3. Sea $\{x^v, \alpha^v\}$ la solución óptima de (2.8). Como este problema es una relajación del problema original (2.7), su valor es un límite inferior para el valor de la solución óptima del problema original. Se define el límite inferior $\underline{z}$ como:

$$\underline{z} = ci \cdot x^v + \alpha^v \tag{2.9}$$

4. Resolver el problema de la operación:

$$w(x^v) = \text{Min} \quad co \cdot y \tag{2.10}$$

$$\text{s/a} \quad F \cdot y \geq h - E \cdot x^v$$

$$y \geq 0$$

5. Sea y^v la solución óptima de (2.10). El conjunto (x^v, y^v) es una solución factible del problema original (2.7), pero no necesariamente la solución óptima. Como el costo de una solución factible es por definición mayor que o igual al valor óptimo, entonces el valor:

$$\overline{z} = Min\{\overline{z}, ci \cdot x^v + co \cdot y^v\} \tag{2.11}$$

es un límite superior de la solución óptima del problema original.

6. Si $\overline{z} - \underline{z} \leq \xi$, entonces el problema está resuelto; la solución asociada a $\overline{z}$ es una solución ξ-óptima. Caso contrario, se construye la siguiente restricción lineal, conocida como un corte de Benders:

$$\alpha \geq \pi^v \cdot (h - E \cdot x) \tag{2.12}$$

Donde π^v es el vector de multiplicadores simplex asociados a las restricciones del problema de operación (2.10), y volver al paso 2.

2.2.2.4 Interpretación geométrica del algoritmo

A partir de la igualdad de las soluciones primal y dual del problema de operación (2.4), Podemos escribir los cortes de Benders de una forma alternativa, como sigue:

$$w(x^v) = \pi^v \cdot (h - E \cdot x^v) \tag{2.13}$$

Manejando la ecuación, tenemos una expresión para $\pi^v \cdot h$:

$$\pi^v \cdot h = w(x^v) + \pi^v \cdot E \cdot x^v \tag{2.14}$$

Sustituyendo (2.14) en la expresión de corte de Benders $\alpha \geq \pi^v \cdot (h - E \cdot x)$, resulta en:

$$\alpha \geq w(x^v) - \pi^v \cdot E \cdot (x - x^v) \tag{2.15}$$

Hay un camino diferente para llegar a la expresión alternativa de corte de Benders. Sea la función:

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

$$H(x) = h - E \cdot x \tag{2.16}$$

que representa el lado derecho (RHS - *Right-hand Side*) de las restricciones del problema de operación (2.4). Si π^v es el vector de las variables duales asociadas a la solución óptima de este problema, sabemos que:

$$\left.\frac{\partial w(x)}{\partial H(x)}\right|_{x=x^v} = \pi^v \tag{2.17}$$

Usando la regla de la cadena, podemos deducir la derivada de $w(x)$ con respecto a x:

$$\left.\frac{\partial w(x)}{\partial x}\right|_{x=x^v} = \left.\frac{\partial w(x)}{\partial H(x)} \cdot \frac{\partial H(x)}{\partial x}\right|_{x=x^v} = -\pi^v \cdot E \tag{2.18}$$

Como $w(x)$ es una función lineal por partes, la expresión (2.18) corresponde a un sub gradiente de $w(x)$ alrededor del punto $x = x^v$. Por lo tanto, podemos concluir que:

$$w(x) \geq w(x^v) + \left.\frac{\partial w(x)}{\partial x}\right|_{x=x^v} \cdot (x - x^v) \tag{2.19}$$

Definiendo $\alpha = w(x)$, obtenemos la expresión (2.15).

De la inecuación (2.19), vemos que el corte Benders puede interpretarse como una aproximación de primer orden de la función de costo de operación $w(x)$ alrededor del vector decisión de inversión producido por el módulo de inversión (2.8).

2.2.2.5 Expresión alternativa para el problema aproximado de la inversión

Sustituyendo (2.15) en el problema aproximado de expansión (2.8), tenemos:

$$\begin{aligned} z = \text{Min} \quad & ci \cdot x + \alpha \\ \text{s/a} \quad & \alpha \geq w(x^\mu) + \lambda(x^\mu) \cdot (x - x^\mu) \qquad \mu = 1, \dots, v \\ & x \in X \end{aligned} \tag{2.20}$$

donde $\lambda(x^\mu) = -\pi^\mu \cdot E, \mu = 1, \dots, v$.

2.2.3 La descomposición de Benders aplicada al problema de planificación de la expansión

En esta sección, se presenta la aplicación de la metodología de descomposición de Benders al problema de planificación de la expansión (2.1). Como se comentó anteriormente, el problema de la operación se resuelve para cada plan de inversión candidato. El corte Benders se construye a partir del costo óptimo y el vector de multiplicadores simplex del problema de operación. Este corte se añade como una nueva restricción lineal al problema aproximado de inversión, que es resuelto nuevamente y produce un nuevo plan de expansión candidato.

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

2.2.3.1 *Problema de operación*

Dado un plan de expansión x^v para un horizonte de planificación T, el problema operación se formula como la minimización del costo de operación, sujeto al suministro a la demanda, límites operativos y otras restricciones:

$$w(x^v) = \text{Min} \quad \sum_{t\in T}\left(\sum_{i\in I} co_{t,i}\cdot g_{t,i} + cd\cdot d_t\right) \tag{2.21}$$

$$\text{s/a} \quad \sum_{i\in I} g_{t,i} + d_t = D_t \qquad \forall t \in T$$

$$g_{t,i} \le \overline{g}_i \cdot \sum_{\tau=1}^{t} x_{\tau,i}^v \qquad \forall t \in T, \forall i \in I$$

2.2.3.2 *Cálculo del corte de Benders*

En el problema de operación (2.21) sólo las restricciones de generación de los proyectos dependen de las decisiones de inversión x^v. Para facilitar la notación, estas restricciones se escriben en el formato estándar de programación lineal:

$$-g_{t,i} \ge -\overline{g}_i \cdot \sum_{\tau=1}^{t} x_{\tau,i}^v \qquad \forall t \in T, \forall i \in I \qquad \pi_{t,i}^v$$

Donde $\pi_{t,i}^g$ es la variable dual asociada a esta restricción en la solución óptima. Usando la regla de la cadena, se puede deducir que la derivada asociada a una decisión de inversión $x_{t,i}$ es:

$$\left.\frac{\partial w(x)}{\partial x_{t,i}}\right|_{x=x^v} = \sum_{\tau=t}^{T} \pi_{\tau,i}^v \cdot (-\overline{g}_i) = -\overline{g}_i \cdot \sum_{\tau=t}^{T} \pi_{\tau,i}^v \tag{2.22}$$

El corte de Benders se calcula como:

$$\alpha \ge w(x^v) - \sum_{t\in T}\sum_{i\in I}\left(\overline{g}_i \cdot \sum_{\tau=t}^{T} \pi_{\tau,i}^v\right)\cdot\left(x_{t,i} - x_{t,i}^v\right) \tag{2.23}$$

Agregando valores como:

$$rhs^v = w(x^v) + \sum_{t\in T}\sum_{i\in I}\left(\overline{g}_i \cdot \sum_{\tau=t}^{T} \pi_{\tau,i}^v\right)\cdot x_{t,i}^v \tag{2.24}$$

y pasando las variables al lado izquierdo (LHS – *Left-Hand Side*) se resulta en:

$$\alpha + \sum_{t\in T}\sum_{i\in I}\left(\overline{g}_i \cdot \sum_{\tau=t}^{T} \pi_{\tau,i}^v\right)\cdot x_{t,i} \ge rhs^v \tag{2.25}$$

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

2.2.3.3 Problema aproximado de expansión

El objetivo del problema aproximado de expansión es minimizar la suma del valor presente de los costos de inversión de los proyectos, más una aproximación del costo de operación α, sujeto a las restricciones de integralidad y unicidad de los proyectos y otras restricciones. En cada iteración del algoritmo de descomposición, se añade una nueva restricción a este problema, que se calcula a partir de los resultados del problema de operación.

El problema aproximado de expansión en la ν-ésima iteración se formula como:

$$\text{Min} \quad \sum_{t\in T}\sum_{i\in I}\left(ci_{t,i}\cdot x_{t,i}+\alpha\right) \tag{2.26}$$

$$\text{s/a} \quad x_{t,i}\in\{0,1\} \qquad \forall t\in T, \forall i\in I$$

$$\sum_{t\in T} x_{t,i}\le 1 \qquad \forall i\in I$$

$$\alpha+\sum_{t\in T}\sum_{i\in I}\left(\overline{g}_i\cdot\sum_{\tau=t}^{T}\pi_{\tau,i}^{\mu}\right)\cdot x_{t,i}\ge rhs^{\mu} \qquad \mu=1,\dots,\nu$$

2.2.4 Criterio de valor esperado

El algoritmo de Benders también se puede aplicar a problemas de planificación con múltiplos escenarios. La estructura en bloques del problema es aún más evidente.

	Variables de inversión		**Variables de operación Esc. 1**		**Variables de operación Esc. 2**		**Variables de operación Esc. S**	
Min	$ci\cdot x$	+	$co_1\cdot y_1$	+	$co_2\cdot y_2$	...	$co_S\cdot y_S$	
s/a	$A\cdot x$							$\ge b$
	$E_1\cdot x$	+	$F_1\cdot y_1$					$\ge h_1$
	$E_2\cdot x$			+	$F_2\cdot y_2$			$\ge h_2$
	...							
	$E_M\cdot x$					+	$F_S\cdot y_S$	$\ge h_S$

La expansión óptima con el criterio de valor esperado se formula como:

$$\text{Min} \quad c(x)+\overline{w}(x) \tag{2.27}$$

$$\text{s/a} \quad x\in X$$

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

donde $c(x)$ y $\overline{w}(x)$ son, respectivamente, el costo de inversión y el costo esperado de operación para el plan de candidato x:

$$\overline{w}(x) = \sum_{s=1}^{S} p_s \cdot w_s(x) \tag{2.28}$$

donde p_s es la probabilidad del escenario s. Sea la decisión x^v, entonces el problema de operación para cada escenario s, con $s = 1, \ldots, S$, se formula como el siguiente problema de optimización:

$$\begin{aligned} w_s(x^v) = \text{Min} \quad & co_s \cdot y_s && (2.29) \\ \text{s/a} \quad & F_s \cdot y_s \geq h_s - E_s \cdot x^v && \pi_s^v \\ & y_s \geq 0 \end{aligned}$$

El corte de Benders asociado a cada problema de operación se obtiene a partir de (2.29):

$$\alpha \geq w_s(x^v) + \lambda_s(x^v) \cdot (x - x^v) \qquad s = 1, \ldots, S$$

donde $\lambda_s(x^v) = -\pi_s^v \cdot E_s$. Como la expresión (2.28) es lineal, el corte de Benders es el promedio de todos los cortes ponderado por la probabilidad. Definiendo:

$$\overline{\lambda}(x^v) = \sum_{s=1}^{S} p_s \cdot \lambda_s(x^v) \tag{2.30}$$

Tenemos:

$$\alpha \geq \overline{w}(x^v) + \overline{\lambda}(x^v) \cdot (x - x^v) \tag{2.31}$$

Sustituyendo $\overline{w}(x)$ en (2.27) por los cortes (2.31) generados en cada iteración del algoritmo de descomposición, se obtiene el siguiente problema relajado de expansión:

$$\begin{aligned} z = \text{Min} \quad & c(x) + \alpha && (2.32) \\ \text{s/a} \quad & \alpha \geq \overline{w}(x^\mu) + \overline{\lambda}(x^\mu) \cdot (x - x^\mu) && \mu = 1, \ldots, v \\ & x \in X \end{aligned}$$

2.3 Manejando incertidumbres

Una cuestión fundamental de la metodología de planificación de la expansión es cómo manejar las incertidumbres inherentes al proceso de planificación, como los caudales hidrológicos y los escenarios de generación renovable variable. Como se puede ver en la sección anterior, el modelo de planificación de la expansión puede contemplar múltiplos escenarios operativos, y el algoritmo propuesto es capaz de capturar sus efectos a través de un enfoque probabilístico. Además, al aplicar el algoritmo de descomposición de Benders, los problemas de inversión y operación pasan a resolverse separadamente. Por

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

esta razón, el OptGen puede trabajar con dos opciones de modelos de operación, como se muestra en la Figura 2.5:

- **SDDP**: utiliza el modelo completo de programación dinámica dual estocastica (SDDP) como módulo de operación;
- **Escenarios**: utiliza un modelo de simulación de escenarios multi-determinísticos como módulo de operación.

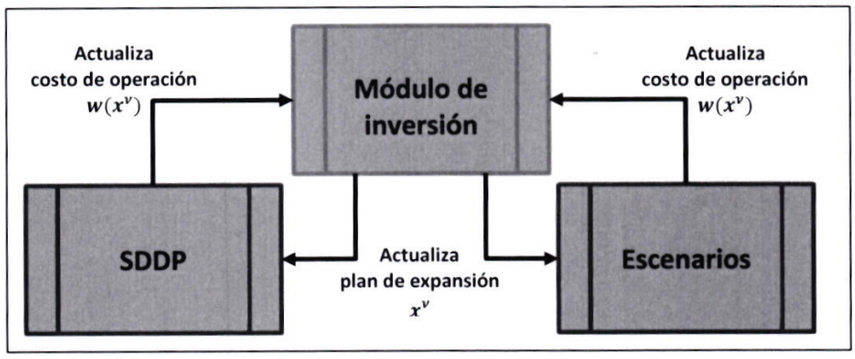


Figura 2.5 - Opciones para resolver el sub-problema de la operación en el enfoque "OptGen 1"

El proceso de descomposición se muestra en la Figura 2.6. En esta figura, observamos cómo las incertidumbres son manejadas por cada opción operativa: (i) SDDP y (ii) Escenarios, teniendo en cuenta la solución del plan de expansión a cada iteración del OptGen.

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPUBLICA DE PANAMA AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PUBLICOS

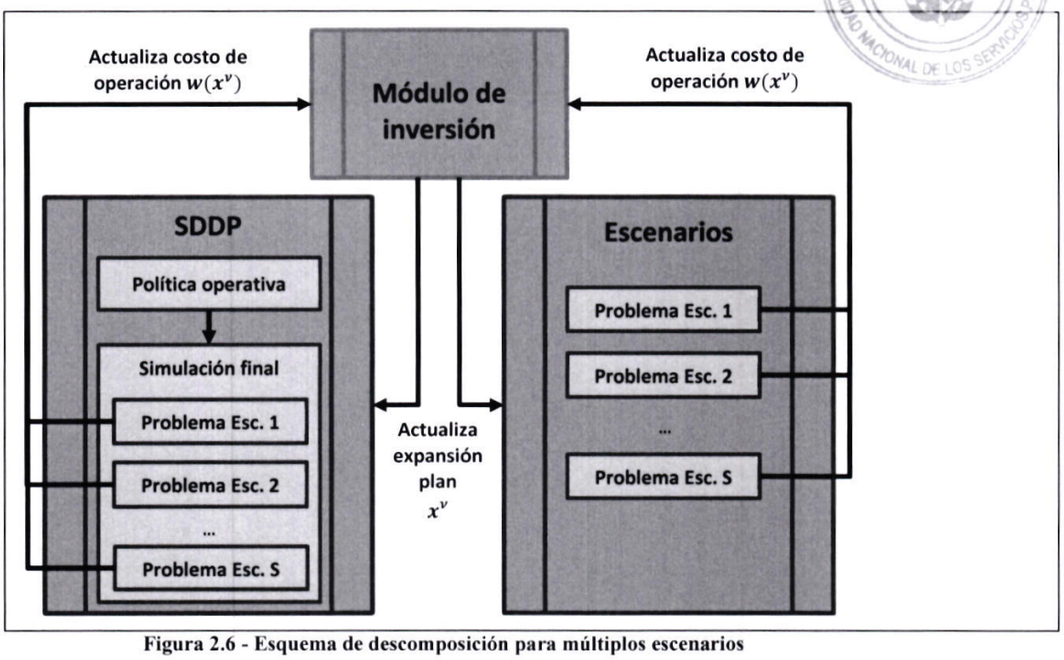


Figura 2.6 - Esquema de descomposición para múltiplos escenarios

2.3.1.1 SDDP

Cuando se selecciona la opción "SDDP" como módulo de operación, para cada plan de expansión candidato encontrado a cada iteración del OptGen, se realiza una ejecución completa del SDDP, es decir, el SDDP primero calcula la política operativa estocástica por un procedimiento de descomposición multi-etapa que construye una Función de Costo Futuro (FCF) para cada etapa, con el objetivo de minimizar los costos operativos promedios a lo largo del horizonte de estudio (considerando incertidumbres en los caudales hidrológicos y generación renovable). A continuación, para generar los resultados operativos, SDDP contempla la FCF y realiza la simulación final de la operación del sistema, resolviendo un problema para cada etapa y para cada escenario de incertidumbre.

2.3.1.2 Escenarios

En vez de calcular la política operativa y realizar la simulación final, la opción "Escenarios " resuelve un único problema de optimización multi-etapa (involucrando todo el horizonte de estudio) para cada escenario de incertidumbre. Como consecuencia, para generar los resultados operativos, el modelo realiza una simulación de escenarios multi-determinísticos.

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

2.3.1.3 Retroalimentación de la operación

Aunque cada modelo tiene una estrategia de solución diferente que optimiza la operación del sistema, ambos los enfoques (SDDP y Escenarios) realizan simulaciones de escenarios cuyos resultados operativos se utilizan para generar un nuevo corte de Benders que se incorpora al problema de planificación de la expansión de la próxima iteración.

En ambos los enfoques, los coeficientes de los cortes de Benders y el lado derecho se calculan con base en el valor esperado del costo total de operación y en las derivadas del costo de operación con respecto a las decisiones de inversión.

Estas derivadas, a su vez, se obtienen a partir de los multiplicadores de Lagrange asociados a las siguientes restricciones: (i) límites de almacenamiento y caudal turbinable hidro; (ii) límites de capacidad de generación térmica; (iii) producción de energía de las fuentes renovables; y (iv) segunda ley de Kirchhoff y límites de flujo de los componentes de transmisión. Los multiplicadores traen las informaciones sobre las reducciones de costos operativos relacionados con cada decisión de inversión para cada escenario y cada etapa de tiempo. En ese caso, antes de crear el corte de Benders, necesitamos tener un número final que represente los beneficios operativos esperados relacionados con cada decisión de inversión. Por lo tanto, teniendo en cuenta cada resultado arriba mencionado, calculamos el VPN para tener un valor único por escenario. A continuación, calculamos el promedio de todos los escenarios.

2.4 La incorporación de las restricciones de seguridad

Para cada plan de expansión propuesto, los índices de confiabilidad, tales como LOLP y EPNS, pueden ser evaluados por CORAL, el modelo para análisis confiabilidad de sistemas. Además, las restricciones de seguridad mínima pueden ser incluidas en el problema de expansión como criterio de planificación. Por lo tanto, es posible evaluar el beneficio de cada proyecto tanto en términos de reducción del costo operativo, así como en el aumento de la confiabilidad global del sistema.

De esta manera, el análisis económico y de confiabilidad se hacen en un problema único para la planificación de la expansión:

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & z(x) = c(x) + w(x) \\ \text{s/a} \quad & r(x) \leq \bar{r} \\ & x \in X \end{aligned} \tag{2.33}$$

Donde X representa el conjunto las decisiones de inversión viables. Las funciones $c(x)$ y $w(x)$ representan, respectivamente, los costos de inversión y operación del plan de expansión candidato x. La función $r(x)$ es el índice de confiabilidad evaluado para el plan de expansión x y $\bar{r}$ es el valor máximo informado aceptado para esta medida de riesgo.

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

2.4.1 La descomposición de Benders aplicada al problema de planificación de la expansión

Como se mencionó anteriormente, se utiliza la técnica de descomposición de Benders para separar el problema original en módulos de inversión, operación y confiabilidad. Esta partición permite que cada sub-problema se resuelva por un algoritmo especializado a través de un procedimiento iterativo, donde el sub-problema de operación se resuelve mediante la Programación Dinámica Dual Estocástica (SDDP - *Stochastic Dual Dynamic Programming*), y el sub-problema de confiabilidad mediante simulación Monte Carlo (MC). La Figura 2.7 ilustra este proceso iterativo.

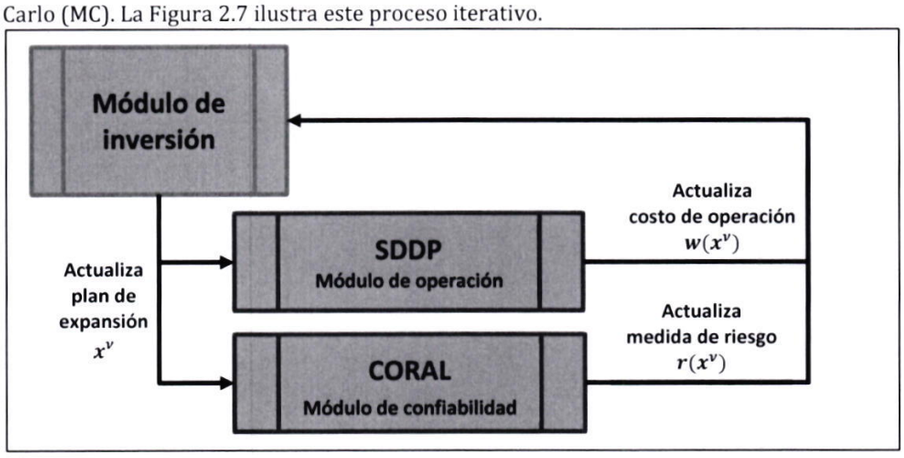


Figura 2.7 - La descomposición del problema de expansión

En términos generales, la aplicación de la técnica de descomposición de Benders descrita anteriormente para la construcción de una aproximación de la función costo de operación $w(x)$, se puede extender para la medida de confiabilidad $r(x)$.

Dado un plan candidato de inversión x^v, el sub-problema de confiabilidad calcula el valor de la medida de riesgo $r(x^v)$ asociada a este plan. Si la solución no es factible, $r(x^v) > \bar{r}$, entonces el análisis de sensibilidad realizado en este problema, utilizando el modelo **CORAL**, fornece la derivada de la función de confiabilidad con respecto a la decisión de inversión. Esta derivada, a su vez, se utiliza para la construcción de los cortes de Benders que aproximan la región factible asociada al criterio de confiabilidad adoptado en el problema maestro.

En otras palabras, el problema maestro (2.34) es una relajación del problema de planificación de la expansión (2.33), donde tanto la función de costo de operación $w(x)$ cuanto la función de confiabilidad $r(x)$ se aproximan por un conjunto de restricciones lineales, conocidas como cortes de Benders, que se construyen de manera iterativa por la solución de los modelos SDDP y CORAL para cada decisión de expansión x^v.

$$z = \text{Min} \quad ci \cdot x + \alpha \tag{2.34}$$

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

$$\text{s/a} \quad \alpha \geq w(x^{\mu}) + \left.\frac{\partial w(x)}{\partial x}\right|_{x=x^{\mu}} \cdot (x - x^{\mu}) \qquad \mu = 1, \dots, \nu$$

$$r(x^{\mu}) + \left.\frac{\partial r(x)}{\partial x}\right|_{x=x^{\mu}} \cdot (x - x^{\mu}) \leq \bar{r} \qquad \mu = 1, \dots, \nu$$

$$x \in X$$

2.4.2 Criterio de máxima EPNS

En la versión actual del OptGen, consideramos $r(x) = EPNS(x)$, el valor esperado de la potencia no suministrada, como la medida de riesgo, que es el valor promedio del corte de carga del sistema. En este caso, a cada iteración del algoritmo de descomposición de Benders, se resuelve el siguiente problema de planificación de la expansión:

$$z = \text{Min} \quad ci \cdot x + \alpha \tag{2.35}$$

$$\text{s/a} \quad \alpha \geq w(x^{\mu}) + \left.\frac{\partial w(x)}{\partial x}\right|_{x=x^{\mu}} \cdot (x - x^{\mu}) \qquad \mu = 1, \dots, \nu$$

$$EPNS(x^{\mu}) + \left.\frac{\partial EPNS(x)}{\partial x}\right|_{x=x^{\mu}} \cdot (x - x^{\mu}) \leq \overline{EPNS} \qquad \mu = 1, \dots, \nu$$

$$x \in X$$

Donde $\overline{EPNS}$, la máxima potencia esperada no suministrada, es el criterio de riesgo informado por el planificador.

2.4.2.1 Problema de confiabilidad

Dado un plan de expansión x^{ν} del problema (2.35), el sub-problema de confiabilidad, para cada etapa t, se formula como la minimización de la potencia esperada no suministrada:

$$EPNS_t(x^{\nu}) = \text{Min} \quad \sum_{s \in S} p_s \cdot d_s \tag{2.36}$$

$$\text{s/a} \quad d_s \geq D_t - \sum_{i \in I} \left(\xi_{i,t,s} \cdot \bar{g}_i \cdot \sum_{\tau=1}^{t} x_{\tau,i}^{\nu} \right) \qquad \forall s \in S$$

$$d_s \geq 0 \qquad \forall s \in S$$

Donde S es el conjunto de escenarios de indisponibilidad, p_s es la probabilidad del escenario s y d_s es la variable de corte de carga para el escenario s. $\xi_{i,t,s}$ es la variable aleatoria que representa el estado operativo del generador i en la etapa t, escenario s. El estado puede ser 0 si el equipo no está operando o 1 caso contrario.

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

2.4.2.2 Cálculo del corte de Benders

El problema de confiabilidad (2.36) se puede reescribir de la siguiente manera equivalente, sin representar explícitamente la variable de corte de carga:

$$EPNS_t(x^v) = \sum_{s \in S} p_s \cdot max\left(D_t - \sum_{i \in I}\left(\xi_{i,t,s} \cdot \bar{g}_i \cdot \sum_{\tau=1}^{t} x_{\tau,i}^v\right), 0\right) \quad (2.37)$$

Además, podemos definir Ω_t como el conjunto de escenarios en la etapa t donde el corte de carga es mayor que cero:

$$\Omega_t = \left\{s \in S \middle| D_t > \sum_{i \in I}\left(\xi_{i,t,s} \cdot \bar{g}_i \cdot \sum_{\tau=1}^{t} x_{\tau,i}^v\right)\right\}$$

De esta manera, el problema (2.37) se puede escribir como:

$$EPNS_t(x^v) = \sum_{s \in \Omega_t} p_s\left(D_t - \sum_{i \in I}\left(\xi_{i,t,s} \cdot \bar{g}_i \cdot \sum_{\tau=1}^{t} x_{\tau,i}^v\right)\right) \quad (2.38)$$

Para cada etapa t, tal que $EPNS_t(x^v) > 0$, un nuevo corte de Benders se calcula como:

$$EPNS_t(x^v) + \sum_{\tau=1}^{t} \left.\frac{\partial EPNS_t(x)}{\partial x_{\tau,i}}\right|_{x=x^v} \cdot \left(x_{\tau,i} - x_{\tau,i}^v\right) \leq \overline{EPNS} \quad (2.39)$$

Donde la derivada de la función de confiabilidad con respecto a una decisión de inversión se calcula como:

$$\left.\frac{\partial EPNS_t(x)}{\partial x_{\tau,i}}\right|_{x=x^v} = \sum_{s \in \Omega_t} p_s \cdot \xi_{i,t,s} \cdot \bar{g}_i \qquad \tau = 1, \ldots, t \quad (2.40)$$

Entonces los cortes de Benders (2.39) se tornan:

$$EPNS_t(x^v) + \sum_{s \in \Omega_t} p_s \cdot \sum_{i \in I}\left(\xi_{i,t,s} \cdot \bar{g}_i \cdot \sum_{\tau=1}^{t}\left(x_{\tau,i} - x_{\tau,i}^v\right)\right) \leq \overline{EPNS} \quad \forall t \in T \quad (2.41)$$

2.5 Formulación detallada del problema

La planificación de la expansión de generación y transmisión se formula como un problema de programación matemática de la siguiente manera:

2.5.1 Función objetivo

$$z = \text{Min} \quad \sum_{t \in T}\sum_{i \in P}\left(ci_{t,i} \cdot x_{t,i} + \alpha\right) \quad (2.42)$$

T conjunto de etapas en el horizonte del estudio
P conjunto de proyectos

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

$x_{t,i}$	decisión de inversión del proyecto i para la entrada en operación en la etapa t	
$ci_{t,i}$	costo de inversión del proyecto i para la entrada en operación en la etapa t	M$
α	costo de operación aproximado	M $

2.5.2 Fechas mínima y máxima de entrada en operación

$$x_{t,i} = 0 \qquad \forall t \notin [\underline{t}_i, \bar{t}_i], \quad \forall i \in P \qquad (2.43)$$

$\underline{t}_i, \bar{t}_i$ etapas mínima y máxima para la entrada en operación del proyecto i

2.5.3 Proyectos de decisión binaria, entera y continua

$$x_{t,i} \in \{0,1\} \qquad \forall i \in P^{bin} \qquad (2.44)$$

$$x_{t,i} \in \mathbb{Z}_+ \qquad \forall i \in P^{int} \qquad (2.45)$$

$$x_{t,i} \leq 1 \qquad \forall i \in P^{cnt} \qquad (2.46)$$

P^{bin}	conjunto de proyectos de decisión binaria
P^{int}	conjunto de proyectos de decisión entera
P^{cnt}	conjunto de proyectos de decisión continua

2.5.4 Proyectos obligatorios y opcionales

$$\sum_{t=\underline{t}_i}^{\bar{t}_i} x_{t,i} = 1 \qquad \forall i \in P^{ob} \qquad (2.47)$$

$$\sum_{t=\underline{t}_i}^{\bar{t}_i} x_{t,i} \leq 1 \qquad \forall i \in P^{op} \qquad (2.48)$$

$$x_{t,i} = 0 \qquad \forall i \in P, \forall t \notin [\underline{t}_i, \bar{t}_i] \qquad (2.49)$$

P^{ob}	conjunto de proyectos obligatorios
P^{op}	conjunto de proyectos opcionales

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

2.5.5 Proyectos mutuamente excluyentes

$$\sum_{i \in P_k^{ex}} \sum_{t=\underline{t}_i}^{\overline{t}_i} x_{t,i} \leq 1 \qquad \forall k \in R^{ex} \qquad (2.50)$$

R^{ex} conjunto de restricciones de exclusividad
P_k^{ex} conjunto de proyectos que pertenecen a la restricción de exclusividad k

2.5.6 Proyectos asociados (con retraso máximo)

$$\sum_{t=1}^{T} \left(x_{t,i} - \sum_{\tau=\underline{\tau}_k}^{\overline{\tau}_k} x_{\tau,j} \right) \leq 0$$

$$\sum_{t=1}^{T} \left(x_{t,j} - \sum_{\tau=\underline{\tau}_k}^{\overline{\tau}_k} x_{\tau,i} \right) \leq 0$$

$$\underline{\tau}_k = max(1, t - MXD_k)$$

$$\overline{\tau}_k = min(T, t + MXD_k) \qquad (2.51)$$

$$\forall i, j \in P_k^{as}, \forall k \in R^{as}$$

R^{as} conjunto de restricciones de asociación
P_k^{as} conjunto de proyectos que pertenecen a la restricción de la asociación k
MXD_k retraso máximo entre la entrada en operación de los proyectos que pertenecen a la restricción de asociación k

2.5.7 Capacidad instalada/Energía Firme/Potencia firme mínima y máxima

$$\sum_{t=\underline{\tau}_k}^{\overline{\tau}_k} \left(\sum_{i \in P_k} \omega_i \cdot x_{t,i} + \sum_{i \in E_k} \omega_i \right) \geq \underline{\omega}_k \qquad \forall k \in R \qquad (2.52)$$

$$\sum_{t=\underline{\tau}_k}^{\overline{\tau}_k} \left(\sum_{i \in P_k} \omega_i \cdot x_{t,i} + \sum_{i \in E_k} \omega_i \right) \geq \underline{\omega}_k \qquad \forall k \in R \qquad (2.53)$$

ω_i capacidad instalada o energía firme o potencia firme del agente i MW
$\underline{\omega}_k, \overline{\omega}_k$ capacidad instalada o energía firme o potencia firme mínima y máxima de la restricción k. Este es un valor absoluto que puede ser incremental o total. Si total, puede ser una meta informada como un porcentaje del valor total del sistema. MW
$\underline{\tau}_k, \overline{\tau}_k$ etapas mínima y máxima para satisfacer a la restricción k. Cuando la etapa mínima no es informada, entonces el valor de la restric-

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

ción es total, caso contrario, es incremental.

R conjunto de restricciones

P_k conjunto de proyectos que pertenecen a la restricción k

E_k conjunto de agentes existentes que pertenecen a la restricción k

2.5.8 Precedencia entre proyectos (con retraso mínimo)

$$\sum_{\tau=1}^{t} x_{\tau,i} - \sum_{\tau=1+MND_k}^{t+MND_k} x_{\tau,j} \geq 0 \qquad \forall i,j \in P_k^{pre}, \forall k \in R^{pre}, \forall t \in T \tag{2.54}$$

$$x_{t,j} = 0 \qquad \forall t \in \left[1, \underline{t}_j + MND_k - 1\right]$$

R^{pre} conjunto de restricciones de precedencia

P_k^{pre} conjunto de proyectos que pertenecen a restricciones de precedencia k, donde el proyecto i precede el proyecto j

MND_k retraso mínimo entre la entrada en operación de los proyectos que pertenecen a la restricción de precedencia k

2.5.9 Energía firme y potencia firme por sistema

$$\sum_{t\in T_y} \Delta_t \cdot \left(\sum_{i\in G_n} w_{t,i}^e + \sum_{i\in P_n^G} w_{t,i}^e \cdot \sum_{\tau=\underline{t}_i}^{t} x_{\tau,i} \right) \geq f_{y,n}^e \cdot \sum_{t\in T_y} d_{t,n} \qquad \forall n \in N, \forall y \in Y \tag{2.55}$$

$$\sum_{i\in G_n} w_{t,i}^p + \sum_{i\in P_n^G} w_{t,i}^p \cdot \sum_{\tau=\underline{t}_i}^{t} x_{\tau,i} \geq f_{y,n}^p \cdot \max_{t\in T_y}\left(\frac{d_{t,n}}{\Delta_t}\right) \qquad \forall n \in N, \forall y \in Y \tag{2.56}$$

Y	conjunto de años del estudio	
T_y	conjunto de etapas que pertenecen al año y	
N	conjunto de sistemas	
G_n	conjunto de plantas de generación existentes del sistema n	
P_n^G	conjunto de proyectos de generación del sistema n	
Δ_t	duración de la etapa t	horas
$d_{t,n}$	demanda del sistema n en la etapa t	MWh
$w_{t,i}^e$	energía firme de la planta i en la etapa t	MWprom
$f_{y,n}^e$	factor de energía firme del sistema n en el año y	p.u.
$w_{t,i}^p$	potencia firme de la planta i en la etapa t	MW
$f_{y,n}^p$	factor de potencia firme del sistema n en el año y	p.u.

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

2.5.10 Cortes de Benders de la función de costo de operación

$$\alpha \geq w_\mu + \sum_{t\in T}\sum_{i\in P} \lambda_{t,i,\mu} \cdot (x_{t,i} - x_{t,i,\mu}) \qquad \mu = 1, \dots, \nu \tag{2.57}$$

ν	número de iteraciones anteriores de descomposición de Benders	
w_μ	solución óptima del módulo de operación en la μ-ésima iteración	M$
$\lambda_{t,i,\mu}$	coeficiente del corte de Benders obtenido a partir de las variables duales de la solución óptima del módulo de operación en la μ -ésima iteración.	M$
$x_{t,i,\mu}$	decisión de inversión obtenida en la μ -ésima iteración.	

2.5.11 Cortes de Benders de las restricciones de seguridad

$$EPNS_{\mu,t} + \sum_{i\in P}\left(\gamma_{t,i,\mu} \cdot \sum_{\tau=1}^{t}(x_{\tau,i} - x_{\tau,i,\mu})\right) \leq \overline{EPNS} \qquad \mu = 1, \dots, \nu, \forall t \in T \tag{2.58}$$

ν	número de iteraciones anteriores de descomposición de Benders	
$EPNS_{\mu,t}$	solución óptima del módulo de confiabilidad para la μ-ésima iteración	p.u.
$\gamma_{t,i,\mu}$	coeficiente del corte de Benders obtenido a partir de las variables duales de la solución óptima del módulo de confiabilidad en la μ-ésima iteración.	p.u.
$x_{t,i,\mu}$	decisión de inversión obtenida en la μ-ésima iteración.	
$\overline{EPNS}$	valor máximo de la medida de riesgo	p.u.

2.5.12 Problema de operación

Para la decisión de expansión x^μ, obtenida del problema de inversión a cada iteración μ, hay un problema de operación de mínimo costo que se resuelve por el modelo SDDP. La solución óptima de este problema se utiliza para calcular un nuevo corte de Benders, representado por la inecuación (2.57).

Para obtener más información acerca de la formulación detallada de las restricciones del módulo de operación, consulte el manual de metodología del SDDP.

2.5.13 Problema de confiabilidad

Para la decisión de expansión x^μ, obtenida del problema de inversión a cada iteración μ, hay un problema de confiabilidad que se resuelve por el modelo CORAL. La solución

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

óptima de este problema se utiliza para calcular nuevos cortes de Benders, representados por las inecuaciones (2.58).

Para obtener más información acerca de la formulación detallada de las restricciones del módulo de confiabilidad, consulte el manual de metodología del CORAL.

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

3 OPTGEN 2 - ESTRATEGIA DE SOLUCIÓN DEL SEGUNDO ENFOQUE

3.1 Introducción

El aumento de la competitividad económica de las fuentes de energía eólica y solar, también llamadas fuentes de energía renovables variables (ERV), ha atraído una gran atención mundial. Estas fuentes de energía no sólo reducen las emisiones de gases de invernadero, como también reducen la vulnerabilidad de los países que importan combustibles fósiles (en particular, petróleo y gas natural).

Sin embargo, la rápida penetración de estas nuevas fuentes también ha planteado algunas preocupaciones tanto para los planificadores cuanto para los operadores por dos razones principales: (i) la mayoría de estas fuentes son no despachables, es decir, su generación no puede ser controlada por el operador del sistema; y (ii) su producción de energía presenta una gran variabilidad, es decir, la producción puede cambiar significativamente de una hora a otra.

Como se puede ver, la penetración de ERV causa impactos representativos sobre el perfil de la demanda neta. Además del cambio en el perfil, cabe resaltar el aumento de las rampas de la demanda neta y sus respectivas inclinaciones con la mayor penetración renovable. Estos impactos conducen a nuevos desafíos operativos, que se destacan:

- **Situaciones de exceso de oferta**: períodos en que la generación renovable es superior a la demanda a ser suministrada (esto ocurre especialmente en el medio de la noche en regiones con fuertes vientos o durante el día en regiones con una gran capacidad de energía solar);
- **Rápidas rampas de subida y bajada**: plantas despachables deben tener la capacidad de responder rápidamente al aumento y disminución de la generación renovable intermitente para mantener la confiabilidad y la estabilidad del sistema;
- **Incremento en la ciclaje de las térmicas**: posible aumento en el número de arranques y paradas de las plantas térmicas en el sistema debido a la intermitencia de la generación renovable.

Como consecuencia, la penetración de plantas renovables intermitentes en los sistemas eléctricos ha cambiado la forma como se maneja la planificación de la expansión. Este tipo de recurso tiene una gran variabilidad en pequeños intervalos de tiempo, por esta razón, para algunos sistemas, la representación horaria de la operación debe ser considerada dentro del modelo de planificación de la expansión. Además, las reservas de generación también deben ajustarse con el fin de capturar el efecto intermitente. Dado que muchos países utilizan centrales térmicas rápidas como parte de estas reservas, el *unit commitment* y las restricciones de rampa también se han tornado más relevantes.

Debido a su importancia, los problemas de planificación de expansión se discuten ampliamente en la literatura. Este tipo de problema es generalmente no convexo debido a

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

la necesidad de incorporar decisiones de inversión y operación enteras. Enfoques comunes para la resolución de estos problemas son: Programación no lineal (NLP - *Non-linear Programming*); Programación Lineal Entera Mixta (MILP - *Mixed-Integer Linear Programming*); técnicas de descomposición (tales como la descomposición de Benders) combinado con aproximaciones y suposiciones sobre el modelo para que sea computacionalmente tratable.

En esta estrategia de solución, se propone un MILP como modelo de planificación de la expansión, que puede representar pasos de tiempo horarios, manteniendo tiempos computacionales razonables, donde ambos los problemas de inversión y operación se resuelven simultáneamente, como se muestra en la figura a continuación.

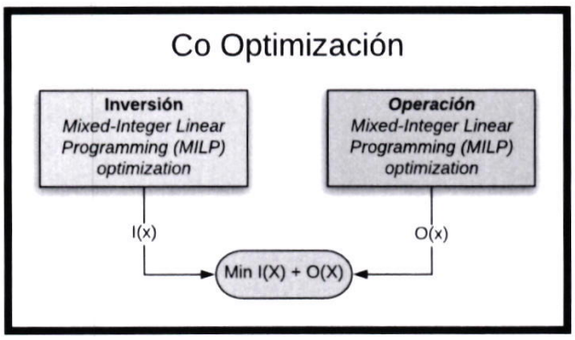


Figura 3.1 -Co-optimización de la inversión y operación

Sin embargo, debido a los grandes horizontes de planificación (décadas), la resolución horaria de todo el horizonte en un solo problema de optimización sería computacionalmente inviable para los sistemas reales. Por esta razón, se hace necesario aplicar una heurística de descomposición del horizonte en pequeños sub-horizontes, y utilizar la representación de días típicos y estaciones para reducir el tamaño del problema.

3.2 Metodología de solución

3.2.1 Heurística de descomposición del horizonte

El modelo considera etapas anuales de inversión, es decir, un problema de co-optimización de la inversión y operación se resuelve para cada año en un esquema de horizonte rodante. Un plan de expansión óptimo se calcula para un año, la decisión se fija, y un nuevo problema de optimización se define para el año siguiente, teniendo en cuenta las decisiones de inversión tomadas en el año anterior como fijadas y complementando el plan de expansión, cuando necesario, como se muestra en la figura a continuación.

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS



Figura 3.2 – Heurística de descomposición del horizonte

3.2.2 Días típicos y estaciones

Como hemos visto anteriormente, ya que los horizontes de planificación son largos, con el fin de resolver el problema de la expansión aplicándose la co-optimización de la inversión y operación, el horizonte se descompone en sub-horizontes anuales a través de la estrategia *forward* en el tiempo, es decir, las decisiones tomadas en un determinado año son fijas en los años subsecuentes.

Es importante recordar que la operación se resuelve con representación horaria, que puede resultar en un problema grande y computacionalmente intratable, dado el tamaño de los estudios de planificación que representan horizontes de largo plazo, y dado que el modelo propuesto resuelve un MILP, que tiene como objetivo minimizar los costos de inversión y el valor esperado de los costos operativos, sujeto a incertidumbres en la hidrología y generación de fuentes renovables intermitentes.

Como una forma de ejemplificar esta cuestión, teniendo en cuenta un sistema de energía real, la tabla a continuación resume el tamaño de los problemas de optimización para 1 mes y 5 bloques versus 744 horas:

Restricciones	Bloques	Horas
Restricciones de balance hídrico	114	+80,000
Restricciones de balance de demanda	30	+4,000
Generación máxima y restricciones de turbinamiento	1499	+290,000
Restricciones de volumen máximo y mínimo	228	+165,000
Total	**1461**	**+520,000**

Como se puede ver, el tamaño de los problemas de optimización aumenta significativamente. Además, para la evaluación del plan de expansión de sistemas reales, también es necesario la utilización de múltiples escenarios para incorporar las incertidumbres al cual un sistema real queda expuesto (hidrología, generación renovable etc.) y, consecuentemente, la adición de todas las restricciones por escenario en el problema de optimización. Por esta razón, es necesario crear una estrategia que reduce el tamaño del problema, pero sin comprometer la calidad de los resultados.

Para reducir el esfuerzo computacional requerido por estos problemas de optimización, es necesario introducir los conceptos de estaciones y días representativos (típico), que

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

además de permitir la solución de estos problemas en tiempos computacionales aceptables, captura los efectos de la generación intermitente en el sistema.

El primer paso de esta estrategia es agrupar los meses del año en estaciones, como se muestra en la figura a continuación.

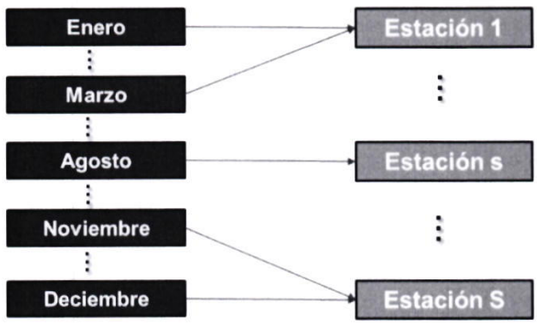


Figura 3.3 - Asociación de meses en las estaciones

Una vez definidas las estaciones, los días representativos de cada una de ellas, aquí referidos como días típicos, deben ser definidos. Este tipo de representación tiene como objetivo reducir el número de días analizados dentro de cada estación, ya que los perfiles de demanda diarios generalmente no suelen ser tan diferentes, especialmente dentro de las estaciones predefinidas. La siguiente figura ilustra este agrupamiento de días reales en los días típicos para un conjunto de estaciones en un año especifico. La asociación presentada en la figura se hizo de una manera genérica, con fines ilustrativos.

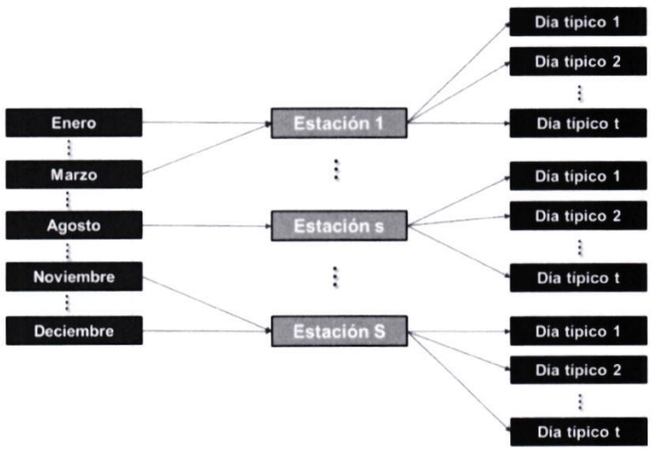


Figura 3.4 - Asignación de días típicos dentro de cada estación

Como ejemplo de aplicación, lo que es claramente observado, es la distinción entre días de semana y días de fin de semana. En este caso, para cada estación y año, los días típicos serían calculados de la siguiente manera:

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

- **Día típico 1:** el promedio de los cinco días de mayor demanda dentro de cada estación;
- **Día típico 2:** el promedio de los dos días de menor demanda dentro de cada estación;

De una manera práctica, la Figura 3.5 ilustra el proceso de asociación de los días en un mes de enero para el cálculo del día típico 1 (curva azul) y 2 (curva naranja).

Por último, es importante mencionar que la solución que aquí se presenta es totalmente flexible con respecto al número y criterios utilizados para el agrupamiento de meses en las estaciones y los días en los días típicos, es decir, el usuario puede personalizar la configuración de días típicos y estaciones de acuerdo con cada aplicación/estudio. Al final del día, las restricciones operativas del problema se deben cumplir en cada estación, día típico, hora y escenario considerado.

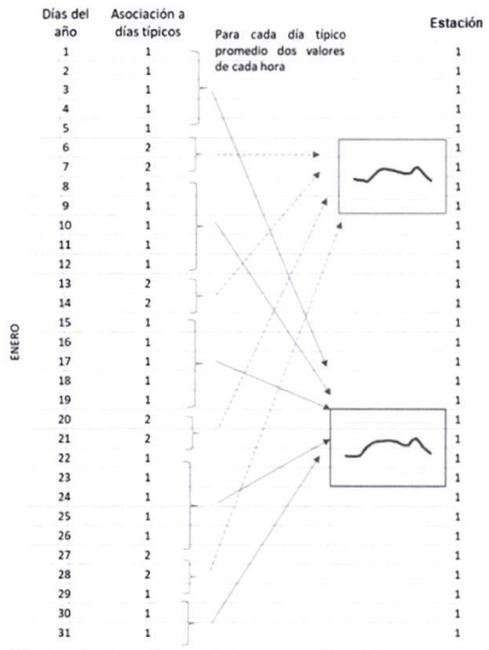


Figura 3.5 - Cálculo de días típicos 1 (curva azul) y 2 (curva naranja) para enero

3.3 Manejando incertidumbres

En el modelo SDDP, el proceso de la tomada de decisión de los costos de producción a largo plazo (generación de cada planta, interconexiones entre regiones, flujos de circuitos, etc.) consiste en un problema de optimización estocástica que busca el equilibrio entre el costo inmediato y el valor esperado del costo futuro (el valor esperado proviene de la incertidumbre sobre la hidrología, viento, consumo, disponibilidad de equipo, etc.).

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

Este problema está intrínsecamente relacionado a los dispositivos de almacenamiento que crean un acoplamiento temporal entre etapas. Por consiguiente, decisiones operativas de hoy, tales como los niveles de almacenamiento, pueden tener impactos en la operación a medio y largo plazo, afectando los costos futuros de operación. Para más detalles, consulte el Manual de Metodología del SDDP.

Tomando en cuenta la explicación mencionada y dado que este enfoque de la expansión realiza una co-optimización de la inversión y operación dentro del mismo problema, la política operativa no se calcula a través del algoritmo SDDP - como el enfoque "OptGen 1" realiza, es decir, el enfoque "OptGen 2" no hace el cálculo de una Función de Costo Futuro (FCF) para el sistema para cada etapa de la operación, una vez que su cálculo requeriría iteraciones de la operación, es decir, varias simulaciones de la operación para cada etapa hasta que la FCF sea suficientemente bien aproximada. La aplicación del SDDP para calcular la FCF es la forma más realista de simular la operación del sistema, sin embargo, ya que se pretende aplicar la estrategia de co-optimización, la operación de los embalses hidroeléctricos durante todo el año debería simplificarse. En este caso, se adopta la estrategia de operación de los embalses presentado en la figura a continuación.

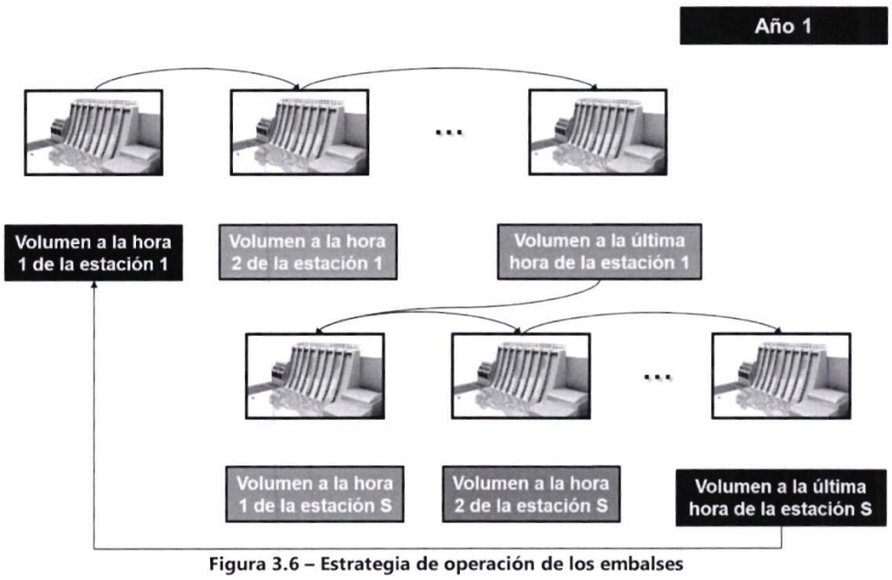


Figura 3.6 – Estrategia de operación de los embalses

Esta formulación asegura que el volumen inicial del embalse de cada planta hidroeléctrica en el comienzo de cada año sea igual al volumen final de ese año. Esta estrategia impide el modelo de vaciar por completo los embalses, optimizando su uso durante todo el año. El concepto detrás de esta estrategia es una operación multi-determinística, donde la operación de los embalses se optimiza para cada escenario separadamente, sin la incorporación de la incertidumbre en el proceso de toma de decisiones de la operación para cada escenario. Esa simplificación de la operación de grandes embalses tiene un

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

sesgo optimista, sin embargo, su aplicación práctica indica que esta aproximación presenta resultados satisfactorios para la toma de decisión y cálculo del plan de expansión.

Las secciones siguientes van a detallar todas las restricciones aplicadas al modelo de expansión que utiliza la co-optimización de la inversión y operación, estrategia de solución llamada "OptGen 2".

3.4 Formulación detallada del problema

El problema de planificación de la expansión de un sistema de energía se formula primariamente como un problema de programación matemática, expresado por la formulación a continuación. Suponemos que, por simplicidad, todas las plantas son proyectos candidatos para el problema de la expansión.

3.4.1 Restricciones de inversión

Toda la formulación de las restricciones de inversión para el OptGen 2 son análogas a la formulación detallada del OptGen 1 y se describen en la sección 2.5 de este Manual.

3.4.2 Restricciones de las centrales térmicas

3.4.2.1 Generación de energía mínima y máxima

$$\underline{g}_j \cdot \boldsymbol{y}_{j,t,d,h,s} \leq \boldsymbol{g}_{j,t,d,h,s} \leq \overline{g}_j \cdot \boldsymbol{y}_{j,t,d,h,s} \qquad \forall j,t,d,h,s \qquad (3.1)$$

$\boldsymbol{g}_{j,t,d,h,s}$	Decisión de generación de la central térmica j, estación t, día típico d, hora del día h y escenario s	MW
$\boldsymbol{y}_{j,t,d,h,s}$	Decisión de *commitment* de la central térmica j, estación t, día típico d, hora del día h y escenario s	
$\overline{g}_j$	Generación máxima de la central térmica j	MW
$\underline{g}_j$	Generación mínima de la central térmica j	MW

3.4.2.2 Rampa de subida y bajada de generación

$$\boldsymbol{g}_{j,t,d,h,s} - \boldsymbol{g}_{j,t,d,h-1,s} \leq \Delta_j^{UP} \qquad \forall j,t,d,h,s \qquad (3.2)$$

$$\boldsymbol{g}_{j,t,d,h-1,s} - \boldsymbol{g}_{j,t,d,h,s} \leq \Delta_j^{DN} \qquad \forall j,t,d,h,s \qquad (3.3)$$

Δ_j^{UP}	Rampa de subida máxima de la central térmica j	MW
Δ_j^{DN}	Rampa de bajada máxima de la central térmica j	MW

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPUBLICA DE PANAMA AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PUBLICOS

3.4.2.3 *Unit commitment*

$$st_{j,t,d,h,s} \geq y_{j,t,d,h,s} - y_{j,t,d,h-1,s} \qquad \forall j,t,d,h,s \qquad (3.4)$$

$$y_{j,t,d,h,s} \leq x_j \qquad \forall j,t,d,h,s \qquad (3.5)$$

$$y_{j,t,d,h,s} \in \{0,1\} \qquad \forall j,t,d,h,s \qquad (3.6)$$

$st_{j,t,d,h,s}$ Variable de decisión de partida de la central térmica j, estación t, día típico d, hora del día h y escenario s

x_j Decisión de inversión de la central térmica j

La restricción (3.5) representa la relación entre las decisiones de *commitment* y las decisiones de inversión, evitando que una central térmica sea ascendida sin la inversión previa. Esta relación hace incompatible la representación de decisiones de inversión continuas con la representación del *commitment* de las térmicas (pues requiere variables de decisiones binarias).

Los otros costos relativos a las centrales térmicas, como la inversión, costo de partida y consumo de combustible pueden ser vistos en la función objetivo (3.43) - (3.47).

3.4.3 Restricciones de usinas hidroeléctricas

3.4.3.1 *Balance hídrico*

Como el modelo no considera la Función de Costo Futuro (FCF), fuerza los niveles de agua en los embalses de todas las plantas hidroeléctricas a terminar al mismo nivel que comenzaron (volumen inicial = volumen final), lo que evita que el sistema vacíe el embalse al final del horizonte, para evitar costos con operación térmica. Esta estrategia obliga el modelo a optimizar la operación del embalse, de forma a utilizar todo el caudal que llega dentro del período analizado.

$$v_{i,t+1,s} = v_{i,t,s} + a_{i,t,s} - \left(u_{i,t,s} + s_{i,t,s}\right) + \sum_{m \in M_i} \left(u_{m,t,s} + s_{m,t,s}\right) \qquad \forall i,t,s \qquad (3.7)$$

$$v_{i,T,s} = v_{i,0,s} \qquad \forall i,s \qquad (3.8)$$

$v_{i,t,s}$	Volumen de la hidroeléctrica i, estación t y escenario s	hm^3
$u_{i,t,s}$	Turbinamiento de la hidroeléctrica i, estación t y escenario s	hm^3
$s_{i,t,s}$	Vertimiento de la hidroeléctrica i, estación t y escenario s	hm^3
$a_{i,t,s}$	Caudal incremental en la hidroeléctrica i, estación t y	hm^3

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

escenario s

M_i Conjunto de plantas aguas arriba de la hidroeléctrica i

3.4.3.2 *Producción de energía*

La ecuación (3.9) garantiza que la producción horaria de energía de las hidroeléctricas sea igual a la energía total turbinada en la estación. Esta ecuación asume que todas las hidroeléctricas tienen regulación total dentro de las estaciones, es decir, pueden transferir, libremente, agua de una hora para la otra.

$$\sum_{d,h} D_{t,d} \cdot \boldsymbol{g}_{i,t,d,h,s} = \rho_i \cdot \boldsymbol{u}_{i,t,s} \qquad \forall i,t,s \qquad (3.9)$$

$$\boldsymbol{g}_{i,t,d,h,s} \leq \overline{g}_i \cdot \boldsymbol{x}_i \qquad \forall i,t,d,h,s \qquad (3.10)$$

$\boldsymbol{g}_{i,t,d,h,s}$	Decisión de la generación de la hidroeléctrica i, estación t, día típico d, hora del día h y escenario s	MW
ρ_i	Coeficiente de producción promedio de la hidroeléctrica i	MWh/hm^3
$\overline{g}_i$	Generación máxima de la hidroeléctrica i	MW
$\boldsymbol{x}_i$	Decisión de inversión de la hidroeléctrica i	
$D_{t,d}$	Duración del día típico d en la estación t	horas

3.4.3.3 *Volumen mínimo y máximo*

$$\boldsymbol{v}_{i,t,s} \leq \overline{v}_i \cdot \boldsymbol{x}_i \qquad \forall i,t,s \qquad (3.11)$$

$$\boldsymbol{v}_{i,t,s} + \boldsymbol{\delta}^{v}_{i,t,s} = \underline{v}_i \cdot \boldsymbol{x}_i \qquad \forall i,t,s \qquad (3.12)$$

$\overline{v}_i$	Volumen máximo de la hidroeléctrica i	hm^3
$\underline{v}_i$	Volumen mínimo de la hidroeléctrica i	hm^3
$\boldsymbol{\delta}^{v}_{i,t,s}$	Decisión de violación del volumen mínimo de la hidroeléctrica i, estación t y escenario s	hm^3

3.4.3.4 *Turbinamiento mínimo y máximo*

$$\boldsymbol{u}_{i,t,s} \leq \overline{u}_i \cdot \boldsymbol{x}_i \qquad \forall i,t,s \qquad (3.13)$$

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

$$\boldsymbol{u}_{i,t,s} + \boldsymbol{\delta}^{u}_{i,t,s} = \underline{u}_i \cdot \boldsymbol{x}_i \qquad \forall i, t, s \qquad (3.14)$$

$\overline{u}_i$	Turbinamiento máximo de la hidroeléctrica i	hm^3
$\underline{u}_i$	Turbinamiento mínimo de la hidroeléctrica i	hm^3
$\boldsymbol{\delta}^{u}_{i,t,s}$	Decisión de violación del turbinamiento mínimo de la hidroeléctrica i, estación t y escenario s	hm^3

3.4.3.5 Defluencia total mínima

$$\boldsymbol{u}_{i,t,s} + \boldsymbol{s}_{i,t,s} + \boldsymbol{\delta}^{q}_{i,t,s} = \underline{q}_i \cdot \boldsymbol{x}_i \qquad \forall i, t, s \qquad (3.15)$$

$\underline{q}_i$	Defluencia total mínima de la hidroeléctrica i	hm^3
$\boldsymbol{\delta}^{q}_{i,t,s}$	Decisión de violación de la defluencia total mínima de la hidroeléctrica i, estación t y escenario s	hm^3

Los otros costos relativos a las centrales hidroeléctricas, como las penalidades, O&M y de inversión pueden ser vistos en la función objetivo (3.43) - (3.47).

3.4.4 Restricciones de renovables

La decisión de generación de las plantas renovables debe ser menor que los escenarios de generación renovable.

$$\boldsymbol{g}_{l,t,d,h,s} \leq \varphi_{l,t,d,h,s} \cdot \boldsymbol{x}_l \qquad \forall l, t, d, h, s \qquad (3.16)$$

$\boldsymbol{g}_{l,t,d,h,s}$	Decisión de generación de la planta renovable l, estación t, día típico d, hora del día h y escenario s	MW
$\varphi_{l,t,d,h,s}$	Escenario de generación renovable de la planta l, estación t, día típico d, hora del día h y escenario s	MW
$\boldsymbol{x}_l$	Decisión de inversión de la planta renovable l	

3.4.5 Restricciones de baterías

Los costos relativos a la operación de las baterías se consideran en la función objetivo (3.43) - (3.47).

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

3.4.5.1 *Balance de energía de batería*

El balance de energía de las baterías se realiza en etapas horarias, como se ve en la ecuación (3.17). Como las centrales hidroeléctricas, las baterías también tienen restricciones de regulación (3.18), donde el volumen inicial es igual al volumen final.

$$\boldsymbol{v}_{b,t,d,h+1,s} = \boldsymbol{v}_{b,t,d,h,s} + \eta_b^+ \cdot \boldsymbol{q}^+_{b,t,d,h,s} - \boldsymbol{q}^-_{b,t,d,h,s} \qquad \forall b,t,d,h,s \qquad (3.17)$$

$$\boldsymbol{v}_{b,t,d,24,s} = \boldsymbol{v}_{b,t,d,0,s} \qquad \forall b,t,d,s \qquad (3.18)$$

$\boldsymbol{v}_{b,t,d,h,s}$	Volumen de la batería b, estación t, día típico d, hora del día h y escenario s	MW
$\boldsymbol{q}^+_{b,t,d,h,s}$	Carga de la batería b, estación t, día típico d, hora del día h y escenario s	MW
$\boldsymbol{q}^-_{b,t,d,h,s}$	Descarga de la batería b, estación t, día típico d, hora del día h y escenario s	MW
η_b^+	Eficiencia de carga de la batería b	

3.4.5.2 *Volumen, cargamento y descargamiento máximos*

$$\boldsymbol{v}_{b,t,d,h,s} \leq \overline{v}_b \cdot \boldsymbol{x}_b \qquad \forall b,t,d,h,s \qquad (3.19)$$

$$\boldsymbol{q}^+_{b,t,d,h,s} \leq \overline{q}^+_b \cdot \boldsymbol{x}_b \qquad \forall b,t,d,h,s \qquad (3.20)$$

$$\boldsymbol{q}^-_{b,t,d,h,s} \leq \overline{q}^-_b \cdot \boldsymbol{x}_b \qquad \forall b,t,d,h,s \qquad (3.21)$$

$\overline{v}_b$	Volumen máximo de la batería b	MW
$\overline{q}^+_b$	Capacidad máxima de carga de la batería b	MW
$\overline{q}^-_b$	Capacidad máxima de descarga de la batería b	MW
$\boldsymbol{x}_b$	Decisión de inversión de la batería b	

3.4.6 Restricciones de líneas de transmisión

Los costos de inversión de las líneas de transmisión se consideran en la función objetivo (3.43)- (3.47).

3.4.6.1 *Flujo máximo*

Las variables de flujo para la representación de la red son $f^+_{k,t,d,h,s}$ y $f^-_{k,t,d,h,s}$ donde estas dos variables (positivas) representan el flujo en ambas direcciones de cada línea, donde + significa orientación positiva y - significa orientación negativa.

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

$$f^{+}_{k,t,d,h,s} \leq \overline{f^{+}_{k}} \cdot x_k \qquad \forall k,t,d,h,s \qquad (3.22)$$

$$f^{-}_{k,t,d,h,s} \leq \overline{f^{-}_{k}} \cdot x_k \qquad \forall k,t,d,h,s \qquad (3.23)$$

$f^{+}_{k,t,d,h,s}$	Flujo De→Para en la línea de transmisión k, estación t, día típico d, hora del día h y escenario s	MW
$f^{-}_{k,t,d,h,s}$	Flujo Para→De en la línea de transmisión k, estación t, día típico d, hora del día h y escenario s	MW
$\overline{f^{+}_{k}}$	Capacidad máxima de flujo en el sentido De→Para en la línea de transmisión k	MW
$\overline{f^{-}_{k}}$	Capacidad máxima de flujo en el sentido Para→De en la línea de transmisión k	MW
x_k	Decisión de inversión de la línea de transmisión k	

3.4.6.2 Segunda ley de Kirchhoff

El modelo considera dos tipos de líneas de transmisión: Enlace CC y Circuitos. La segunda ley de Kirchhoff sólo se representa para los circuitos.

$$f^{+}_{k,t,d,h,s} - f^{-}_{k,t,d,h,s} - \gamma_k \left(\theta_{b^{+}_{k},t,d,h,s} - \theta_{b^{-}_{k},t,d,h,s}\right) \geq -M(1 - x_k) \qquad \forall k \in K^p, t, d, h, s \qquad (3.24)$$

$$f^{+}_{k,t,d,h,s} - f^{-}_{k,t,d,h,s} - \gamma_k \left(\theta_{b^{+}_{k},t,d,h,s} - \theta_{b^{-}_{k},t,d,h,s}\right) \leq M(1 - x_k)$$

γ_k	Susceptancia de la línea de transmisión k
$\theta_{b^{+}_{k},t,d,h,s}$	Ángulo nodal de la barra b^{+}_{k} (barra De de la línea de transmisión k)
$\theta_{b^{-}_{k},t,d,h,s}$	Ángulo nodal de la barra b^{-}_{k} (barra Para de la línea de transmisión k)
M	Constante disyuntiva
K^p	Conjunto de proyectos de circuitos

3.4.6.3 Restricciones de importación / exportación de área

Las restricciones de importación / exportación pueden limitar la cantidad máxima de energía que entra o sale de un área eléctrica específica.

Para las restricciones de importación:

$$\sum_{k \in K^{+}_{a}} f^{+}_{k,t,d,h,s} + \sum_{k \in K^{-}_{a}} f^{-}_{k,t,d,h,s} \leq \overline{Imp}_a \qquad \forall a,t,d,h,s \qquad (3.25)$$

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

$$\sum_{k \in K_a^+} f^+_{k,t,d,h,s} + \sum_{k \in K_a^-} f^-_{k,t,d,h,s} \geq \underline{Imp}_a \qquad \forall a,t,d,h,s \qquad (3.26)$$

Para las restricciones de exportación:

$$\sum_{k \in K_a^-} f^+_{k,t,d,h,s} + \sum_{k \in K_a^+} f^-_{k,t,d,h,s} \leq \overline{Exp}_a \qquad \forall a,t,d,h,s \qquad (3.27)$$

$$\sum_{k \in K_a^-} f^+_{k,t,d,h,s} + \sum_{k \in K_a^+} f^-_{k,t,d,h,s} \geq \overline{Exp}_a \qquad \forall a,t,d,h,s \qquad (3.28)$$

K_a^+	Conjunto de líneas de transmisión que llegan en el área a (barra Para está en el área a y barra De en un área diferente)	
K_a^-	Conjunto de líneas de transmisión que llegan en el área a (barra De está en el área a y barra Para en un área diferente)	
$\overline{Imp}_a$	Cantidad máxima de importación del área a	MW
$\underline{Imp}_a$	Cantidad mínima de importación del área a	MW
$\overline{Exp}_a$	Cantidad máxima de exportación del área a	MW
$\underline{Exp}_a$	Cantidad mínima de exportación del área a	MW

3.4.7 Restricciones de generación

La restricción de generación es una restricción operativa que garantiza que un determinado grupo de generadores (centrales térmicas e hidroeléctricas) siempre produzcan energía arriba o abajo de un límite.

$$\sum_{j \in J_c^G} g_{j,t,d,h,s} + \sum_{i \in I_c^G} g_{i,t,d,h,s} + \delta^g_{c,t,d,h,s} \geq \underline{g}_c \qquad \forall c,t,d,h,s \qquad (3.29)$$

$$\sum_{j \in J_c^G} g_{j,t,d,h,s} + \sum_{i \in I_c^G} g_{i,t,d,h,s} + \delta^G_{c,t,d,h,s} \leq \overline{g}_c \qquad \forall c,t,d,h,s \qquad (3.30)$$

$\delta^G_{c,t,d,h,s}$	Decisión de violación de la restricción de generación c, estación t, día típico d, hora del día h y escenario s	MW
J_c^G	Conjunto de centrales térmicas que pertenecen a la restricción de generación c	
I_c^G	Conjunto de centrales hidroeléctricas que pertenecen a la restricción de generación c	
$\underline{g}_c$	Valor mínimo de la restricción de generación c	MW
$\overline{g}_c$	Valor máximo de la restricción de generación c	MW

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

3.4.8 Restricciones de balance de reserva

3.4.8.1 Requisito de reserva individual

$$\boldsymbol{g}_{j,t,d,h,s} + \boldsymbol{r}_{j,t,d,h,s} \leq \overline{g}_j \cdot \boldsymbol{y}_{j,t,d,h,s} \qquad \forall j,t,d,h,s \qquad (3.31)$$

$$\boldsymbol{r}_{j,t,d,h,s} \leq \Delta_j^{UP} \qquad \forall j,t,d,h,s \qquad (3.32)$$

$$\boldsymbol{g}_{i,t,d,h,s} + \boldsymbol{r}_{i,t,d,h,s} \leq \overline{g}_i \cdot \boldsymbol{x}_i \qquad \forall i,t,d,h,s \qquad (3.33)$$

$$\eta_b^- \cdot \boldsymbol{q}_{b,t,d,h,s}^- + \boldsymbol{r}_{b,t,d,h,s} \leq \eta_b^- \cdot \overline{q}_b^- \cdot \boldsymbol{x}_b \qquad \forall b,t,d,h,s \qquad (3.34)$$

$$\boldsymbol{r}_{b,t,d,h,s} \leq \eta_b^- \cdot \boldsymbol{v}_{b,t,d,h,s} \qquad \forall b,t,d,h,s \qquad (3.35)$$

$\boldsymbol{r}_{j,t,d,h,s}$	Reserva asignada para la central térmica j, estación t, día típico d, hora del día h y escenario s	MW
$\boldsymbol{r}_{i,t,d,,s}$	Reserva asignada para la hidroeléctrica i, estación t, día típico d, hora del día h y escenario s	MW
$\boldsymbol{r}_{b,t,d,h,s}$	Reserva asignada para la batería b, estación t, día típico d, hora del día h y escenario s	MW

La reserva individual se define como un margen de operación de cada central, expresado en MW, para cada estación y hora, para ajustar la operación en tiempo real a las variaciones relacionadas con la operación planificada. En general, la reserva individual se utiliza para estabilizar la frecuencia del sistema después de una perturbación. Este tipo de reserva no es una variable de decisión, sino un valor fijo que se reduce de la capacidad máxima de cada planta.

3.4.8.2 Requisito de reserva conjunta

$$\sum_{j \in J_c^R} \boldsymbol{r}_{j,t,d,h,s} + \sum_{i \in I_c^R} \boldsymbol{r}_{i,t,d,h,s} + \sum_{b \in B_c^R} \boldsymbol{r}_{b,t,d,h,s} + \boldsymbol{\delta}_{c,t,d,h,s}^R \geq R_{c,t,d,h} \qquad \forall r,t,d,h,s \qquad (3.36)$$

J_c^R	Conjunto de térmicas que pertenecen a la restricción c	
I_c^R	Conjunto de hidros que pertenecen a la restricción c	
B_c^R	Conjunto de baterías que pertenecen a la restricción c	
$\boldsymbol{\delta}_{c,t,d,h,s}^R$	Decisión de violación de la restricción de reserva c, estación t, día típico d, hora del día h y escenario s	MW
$R_{c,t,d,h}$	Requisito de reserva c, estación t, día típico d y hora del día h	MW

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

Los requisitos de reserva conjunta se utilizan para representar diferentes tipos de reservas que pueden existir en diferentes sistemas de energía, como reservas primarias, secundarias, terciarias y otras. Estas reservas son satisfechas por la suma de los agentes involucrados en la restricción, que pueden combinar unidades hidroeléctricas, térmicas, baterías y enlaces CC.

A diferencia de la reserva individual, las reservas de los agentes involucrados en requisitos conjuntos son variables de decisión. Por lo tanto, los agentes seleccionados competirán para proporcionar reserva en un mercado de reserva (cada restricción de reserva conjunta representa un mercado o área de reserva).

3.4.8.3 Reserva probabilística dinámica (RPD)

$$\hat{g}_{l,t,h} = \frac{1}{D_t \times S} \sum_{s=1}^{S} \sum_{d=1}^{D_t} \varphi_{l,t,d,h,s} \qquad \forall t, h, l \qquad (3.37)$$

$$\boldsymbol{\delta}_{c,s,t,d,h} = \sum_{r \in I_c^R} \left(\varphi_{l,t,d,h,s} - \hat{g}_{l,t,h} \right) \cdot \boldsymbol{x_r} \qquad \forall t, d, h, s, c \qquad (3.38)$$

$$\boldsymbol{\Delta}_{c,s,t,d,h} = \left| \boldsymbol{\delta}_{c,s,t,d,h} - \boldsymbol{\delta}_{c,s,t,d,h-1} \right| \qquad \forall t, d, h, s, c \qquad (3.39)$$

$$\boldsymbol{\mathcal{R}}_{c,t,h} = (1 - \lambda_c) E[\boldsymbol{\Delta}_{c,s,t,d,h}] + \lambda_c \, CVaR_{\alpha_c}[\boldsymbol{\Delta}_{c,s,t,d,h}] \qquad \forall t, h, c \qquad (3.40)$$

t	Número de etapas	
D_t	Número de días en la etapa t	
S	Número de escenarios s	
I_c^R	Conjunto de renovables que pertenecen a la restricción c	
$\hat{g}_{l,t,h}$	Generación renovable predecible de la renovable l, em la etapa t y hora del día h	MW
$\boldsymbol{\Delta}_{c,s,t,d,h}$	Amos de RPD de la restricción c, estación t, día típico d, hora del día h y escenario s	MW
$\boldsymbol{\delta}_{c,s,t,d,h}$	Generación imprevisible total de la restricción c, estación t, día típico d, hora del día h y escenario s	MW
λ_c	Parámetro de aversión al riesgo de la restricción c	
α_c	Parámetro de confiabilidad de la restricción c	
$E[]$	Operador de valor esperado	
$CVaR_{\alpha_c}$	Operador CVaR, calcula el promedio de los valores α_c% más grandes de la RPD, para cada estación t y hora del día h	
$\boldsymbol{\mathcal{R}}_{c,t,h}$	Requisito de reserva c **en la** estación t, día típico d, hora del día h	MW

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

La Reserva Probabilística Dinámica es una metodología para calcular el requerimiento de reserva necesario para proteger el sistema frente a la intermitencia de fuentes renovables no despachables, como plantas eólicas y solares. El requisito debe basarse en la capacidad de previsión, por ejemplo, aunque las plantas solares tienen una gran variabilidad en el amanecer y el atardecer, debido al hecho de que la planta comienza a generar de repente por la mañana y luego deja de generar de repente a primera hora de la tarde. Esta variabilidad no trae al sistema una necesidad de reserva ya que es predecible (sabemos las horas exactas de salida y poner del sol como sabemos de los eclipses y otros eventos similares). Para estos casos no es necesaria una reserva, sino un plan operativo que tenga en cuenta estos fenómenos. Por lo tanto, lo que se denomina requisito de reserva es la necesidad de proteger el sistema contra eventos inesperados, es decir, eventos impredecibles.

Dada la definición anterior, la RPD no debe basarse en la variabilidad, sino en los posibles errores de pronóstico que se pueden tener en la planificación operativa de un sistema que cuenta con recursos renovables no convencionales. En otras palabras, RPD es una metodología que analiza escenarios de generación y estima la imprevisibilidad de estos escenarios. Entonces, esta imprevisibilidad se traduce en estadísticas, y este valor obtenido debe ser considerado en la operación como un requisito de reserva.

El requisito de RPD debe ser dinámico, es decir, es necesario calcular un valor diferente para cada hora, ya que la variabilidad de las fuentes renovables es diferente para cada hora del día. En el caso de las plantas solares, no hay variabilidad e incertidumbre durante la noche, pero sí una gran variabilidad a lo largo del día (debido a las nubes y otros efectos). Además, el requisito debe ser probabilístico para considerar incertidumbres relacionadas con las energías renovables. Finalmente, la RPD consiste en un perfil de 24 horas para cada etapa que se repite todos los días de la etapa.

3.4.9 Restricciones de balance de demanda

$$\sum_{j\in J_n} \boldsymbol{g}_{j,t,d,h,s} + \sum_{i\in I_n} \boldsymbol{g}_{i,t,d,h,s} + \sum_{l\in L_n} \boldsymbol{g}_{l,t,d,h,s} + \sum_{b\in B_n} \left(\eta_b^- \cdot \boldsymbol{q}^-_{b,t,d,h,s} - \boldsymbol{q}^+_{b,t,d,h,s}\right) + \sum_{k\in K_n^+} \left(f^+_{k,t,d,h,s} - f^-_{k,t,d,h,s}\right) - \sum_{k\in K_n^-} \left(f^+_{k,t,d,h,s} - f^-_{k,t,d,h,s}\right) - \boldsymbol{DE}_{n,t,d,h,s} + \boldsymbol{d}_{n,t,d,h,s} = DI_{n,t,d,h,s} \qquad \forall n,t,d,h,s \quad (3.41)$$

J_n Conjunto de centrales térmicas que pertenecen a la barra

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

	n	
I_n	Conjunto de hidroeléctricas que pertenecen a la barra n	
L_n	Conjunto de plantas renovables que pertenecen a la barra n	
B_n	Conjunto de baterías que pertenecen a la barra n	
η_b^-	Eficiencia de descarga de la batería b	
K_n^+	Conjunto de líneas de transmisión que llegan a la barra n	
K_n^-	Conjunto de líneas de transmisión que parten de la barra n	
$\boldsymbol{DE}_{n,t,d,h,s}$	Demanda elástica asociada a la barra n, estación t, día típico d, hora del día h y escenario s	MW
$\boldsymbol{d}_{n,t,d,h,s}$	Decisión del déficit en la barra n, estación t, día típico d, hora del día h y escenario s	MW
$DI_{n,t,d,h,s}$	Demanda inelástica asociada a la barra n, estación t, día típico d, hora del día h y escenario s	MW

El costo de déficit y el beneficio de demanda elástica también aparecen en la función objetivo – ecuaciones (3.43) - (3.47).

3.4.10 Función objetivo

Vamos a definir $\beta_{t,d,s}$ como:

$$\beta_{t,d,s} = \frac{p_s \cdot D_{t,d}}{(1+rt)^{t-1}} \tag{3.42}$$

p_s	Probabilidad del escenario s	
$D_{t,d}$	Duración del día típico d en la estación t	horas
rt	Tasa de descuento de la estación	

A continuación, la función objetivo del problema es la minimización los siguientes costos:

3.4.10.1 Costo de generación

$$\sum_{t,d,s} \beta_{t,d,s} \left(\sum_{j,h} \left(co_j \cdot \boldsymbol{g}_{j,t,d,h,s} + cs_j \cdot \boldsymbol{st}_{j,t,d,h,s} \right) + \sum_{i,h} co_i \cdot \boldsymbol{g}_{i,t,d,h,s} \right) \tag{3.43}$$

co_j	Costo de operación de la central térmica j	$M\$/MWh$
sc_j	Costo de partida de la central térmica j	$M\$$

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

co_i	Costo de O&M de la hidroeléctrica i	$M\$/_{MWh}$

3.4.10.2 Costo de violación

$$\sum_{i,t,s} \frac{p_s}{(1+rt)^{t-1}} \left(c\delta_i^v \cdot \boldsymbol{\delta}_{i,t,s}^{\boldsymbol{v}} + c\delta_i^u \cdot \boldsymbol{\delta}_{i,t,s}^{\boldsymbol{u}} + c\delta_i^q \cdot \boldsymbol{\delta}_{i,t,s}^{\boldsymbol{q}}\right) + \sum_{t,d,s} \beta_{t,d,s} \left(\sum_{c,h} c\delta_c^G \cdot \boldsymbol{\delta}_{c,t,d,h,s}^{\boldsymbol{G}} + \sum_{c,h} c\delta_c^R \cdot \boldsymbol{\delta}_{c,t,d,h,s}^{\boldsymbol{R}}\right) \quad (3.44)$$

$c\delta_i^v$	Penalidad de violación del volumen mínimo de la hidroeléctrica i	$M\$/_{hm^3}$
$c\delta_i^u$	Penalidad de violación del turbinamiento mínimo de la hidroeléctrica i	$M\$/_{hm^3}$
$c\delta_i^q$	Penalidad de violación de la defluencia mínima de la hidroeléctrica i	$M\$/_{hm^3}$
$c\delta_c^G$	Penalidad de violación de la restricción de generación c	$M\$/_{MWh}$
$c\delta_c^R$	Penalidad de violación de restricción de reserva c	$M\$/_{MWh}$

3.4.10.3 Costo de déficit

$$\sum_{t,d,s} \beta_{t,d,s} \cdot \sum_{n,h} cd \cdot \boldsymbol{d}_{n,t,d,h,s} \quad (3.45)$$

cd	Costo de déficit	$M\$/_{MWh}$

3.4.10.4 Ganancia de demanda elástica

$$\sum_{t,d,s} \beta_{t,d,s} \cdot \sum_{n,h} P_n^E \cdot \boldsymbol{DE}_{n,t,d,h,s} \quad (3.46)$$

P_n^E	Precio de la demanda elástica en la barra n	$M\$/_{MWh}$

3.4.10.5 Costos de inversión

$$\sum_{j \in J_x} ci_j \cdot \boldsymbol{x_j} + \sum_{i \in I_x} ci_i \cdot \boldsymbol{x_i} + \sum_{l \in L_x} ci_l \cdot \boldsymbol{x_l} + \sum_{b \in B_x} ci_b \cdot \boldsymbol{x_b} + \sum_{k \in K_x} ci_k \cdot \boldsymbol{x_k} \quad (3.47)$$

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

ci_j	Costo de inversión del proyecto de térmica j	$M\$$
ci_i	Costo de inversión del proyecto de hidroeléctrica i	$M\$$
ci_l	Costo de inversión del proyecto de renovable l	$M\$$
ci_b	Costo de inversión del proyecto de batería b	$M\$$
ci_k	Costo de inversión del proyecto de línea de transmisión k	$M\$$
J_x	Conjunto de proyectos de centrales térmicas	
I_x	Conjunto de proyectos de centrales hidroeléctricas	
L_x	Conjunto de proyectos de plantas renovables	
B_x	Conjunto de proyectos de baterías	
K_x	El conjunto de proyectos de líneas de transmisión	

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

4 CONSIDERACIONES FINALES Y COMPARACIÓN ENTRE ESTRATÉGIAS DE SOLUCIÓN

La estrategia de solución "OptGen 1", explicada en el Capítulo 2, propone un esquema de descomposición de dos etapas, como se describe a continuación:

- **Problema de la primera etapa (subproblema de inversión)**: formulado como un problema de programación entera (MIP) donde el objetivo es proponer alternativas para el plan de expansión del sistema;
- **Problema de la segunda etapa (subproblema de operación)**: el objetivo de este problema es evaluar el desempeño de las alternativas de expansión propuestas en la primera etapa, produciendo los resultados que se incorporarán al problema de la primera etapa para mejorar la solución de expansión. La segunda etapa se resuelve por la herramienta de simulación probabilística de despacho de PSR, el modelo SDDP.

En resumen, la tarea de planificación de la expansión se realiza a través de una herramienta computacional que determina el plan de expansión de mínimo costo para un sistema de electricidad que considera proyectos candidatos hidroeléctricos, térmicos y renovables y se integra a una herramienta de simulación de despacho que representa todos los detalles de la producción de energía. El plan de mínimo costo se logra optimizando el *trade-off* entre los costos de inversión para construir nuevos proyectos y el valor esperado de los costos operativos obtenidos a partir del modelo de despacho hidrotérmico estocástico (SDDP), que permite una representación detallada de la operación del sistema **bajo incertidumbre**. En este enfoque, para cada plan de expansión propuesto en cada iteración del OptGen, el SDDP calcula una política operativa que minimiza el valor esperado de los costos operativos. Esto se hace a través de la metodología de Programación Dinámica Dual Estocástica, donde se calcula una Función de Costo Futuro (FCF) para cada etapa operativa, considerando la incertidumbre en hidrología, eólica, solar, consumo, disponibilidad de los equipos, etc.).

Las grandes ventajas de esta estrategia de solución son:

- Los problemas de cuales proyectos (*sizing*) y cuándo serán construidos (*timing*) se resuelven simultáneamente. Como consecuencia, este enfoque es útil cuando el *timing* de las decisiones es importante. Más que eso, en algunos sistemas, si se decide por la construcción de algunos proyectos grandes, entonces toda la expansión futura puede ser afectada (algunos proyectos pueden ser retrasados o evitados). Como se puede ver, en algunos casos, no sólo el cronograma de entrada de los proyectos es importante, pero considerar varios años en la misma evaluación también es importante para obtener el plan de expansión óptimo;
- Para cada plan de expansión propuesto, la política operativa es calculada y la simulación final de la operación se realiza **bajo incertidumbre**. Como se puede ver, la operación de los embalses de las hidroeléctricas, y otras variables de es-

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

tado que presentan acoplamiento temporal de las decisiones, se realiza de manera detallada y realista. De esta forma, como la política operativa cambia de acuerdo con el plan de expansión propuesto, esta estrategia de solución es muy útil para sistemas predominantemente hidroeléctricos, es decir, captura adecuadamente el efecto del plan de expansión en la operación del sistema y realimenta el modelo de inversión con resultados tales que los beneficios esperados asociados a cada proyecto candidato puedan ser evaluados de forma detallada bajo incertidumbre;

- Como los subproblemas de inversión y operación se resuelven en separado, en general, un número representativo de escenarios de las variables aleatorias (hidrología, viento, sol, etc.) puede ser representado, capturando así la estocasticidad del problema. En resumen, no hay límite para el número de escenarios a ser considerado en los subproblemas operativos y esa definición no afecta el tiempo computacional del subproblema de inversión. Es importante recordar que en cada iteración del OptGen, se ejecuta una operación completa del SDDP, por lo tanto, cuanto mayor sea el tiempo de ejecución del subproblema de operación, mayor será el tiempo gastado en cada iteración del OptGen (ya que el tiempo del subproblema de inversión es generalmente constante).

Además, dado que (i) una ejecución completa del SDDP es necesaria para cada iteración del OptGen, (ii) los horizontes de los estudios de planificación son grandes y (iii) los problemas de *sizing* y *timing* se resuelven simultáneamente a través de esta estrategia de solución; entonces una agregación de horas en bloques no cronológicos se aplica en las etapas mensuales / semanales, una representación conocida como **Curva de Duración de Carga**.

Por último, es importante recordar que la ejecución del OptGen involucra (i) la tarea de planificación de expansión y (ii) la simulación del plan de expansión. Una vez que la descomposición de Benders exige que el problema de operación sea convexo, durante el paso (i) las restricciones de integralidad de este problema se relajan, es decir, las decisiones binarias asociadas a decisiones de *unit commitment*, vertimiento no controlable y curvas cóncavas de consumo de energía térmica se tratan como continuas. Después de encontrar el plan de expansión óptimo, en la ejecución final del SDDP realizada en el paso (ii), todas las variables binarias son representadas.

Al contrario del enfoque clásico de descomposición de Benders del OptGen, la estrategia "OptGen 2" considera restricciones operativas explícitas dentro del modelo de inversión. Como resultado, este enfoque puede representar no convexidades en las restricciones operativas (como decisiones de *unit commitment*). Por otro lado, debido al aumento de la complejidad del problema, son necesarias algunas simplificaciones, como por ejemplo, considerar problemas de duración anual en lugar del horizonte completo y días representativos (típicos) en lugar de días reales en un año.

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

Este enfoque de planificación de expansión también introduce el concepto de "estaciones". Las estaciones son un agrupamiento de etapas y pueden durar de una semana hasta un año entero.

Días típicos son días dentro de una estación que se consideran representativos de los datos de entrada. Así, en lugar de representar todos los días de una estación, el usuario selecciona un cierto número de días típicos para representar la estación y hace un mapeo de los días reales en estos días típicos. Por ejemplo, es común diferenciar los días de la semana de los sábados y domingos, pero el número de días típicos y sus definiciones son flexibles y escogidos por el usuario.

Las grandes ventajas de esta estrategia de solución son:

- La co-optimización de inversión y operación dentro del mismo MILP permite la representación de *unit commitment* y otras variables binarias operativas;
- La representación cronológica horaria en la operación permite capturar la variabilidad de producción de fuentes renovables intermitentes y las rampas de generación.

Además de las grandes ventajas de esta estrategia de solución, también es importante recordar sus limitaciones. Como se explica en el Capítulo 3, la simulación operativa se realiza de forma multi-determinística, donde la operación de los embalses se optimiza para cada escenario individualmente, sin la incorporación de la incertidumbre hidrológica en el proceso de toma de decisión de la operación del sistema (como ocurre cuando se aplica la metodología SDDP, donde la FCF se calcula para cada etapa de tiempo). Es plausible explicar que esta simplificación de la operación de grandes centrales hidroeléctricas con grandes embalses tiene un sesgo optimista, sin embargo, su aplicación indica que es una aproximación que presenta resultados satisfactorios para toma de decisión de inversión y cálculo del plan de expansión.

Además, también es importante notar que, como los problemas de inversión y operación son co-optimizados en esta estrategia de solución, entonces cuanto más escenarios son con-templados dentro del problema, mayor el esfuerzo computacional requerido para solucionar el MILP. Como consecuencia, para sistemas de gran escala, el tiempo computacional puede limitar el número de escenarios que pueden ser contemplados en un estudio de planificación. Por otro lado, como en la estrategia de solución "OptGen 1" los problemas de inversión y operación se desacoplan (a través de un esquema de descomposición), el tiempo computacional demandado en el módulo de inversión no se ve afectado por el número de escenarios contemplados en el módulo operativo.

Después de esta revisión de ambas estrategias de solución, la siguiente tabla resume las principales diferencias entre los dos enfoques:

Estrategia "OptGen 1"	Estrategia "OptGen 2"

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

Método de descomposición de Benders para la estimación de costos de operación	Co-optimización de inversión y operación dentro de un único MILP
Permitir al usuario contemplar varias etapas de inversión en el mismo problema	Contempla problemas de decisiones anuales de inversión
La demanda se representa por bloques a través de Curva de Duración de Carga	Considera la representación horaria de la demanda
No representa decisiones binarias y restricciones que requieren cronología (como rampas de generación) al evaluar el plan de expansión	Representa *unit commitment* y rampas de generación al evaluar el plan de expansión
Para cada plan de expansión, se calcula la política operativa óptima para obtener el despacho del sistema bajo incertidumbre, representando, por lo tanto, las trayectorias de los embalses de forma realista en cada escenario.	La operación se calcula en separado para cada escenario. De esta forma, el uso del agua es optimizado de manera determinista en cada escenario dentro de cada año y el almacenamiento inicial y final de los embalses son iguales cada año.

Finalmente, vale enfatizar que una ejecución de OptGen involucra (i) la tarea de planeamiento de expansión, es decir, la determinación del plan de expansión óptimo y (ii) la simulación del plan de expansión, que es la simulación completa de la operación del sistema para todo el horizonte de estudio. Como consecuencia, las diferentes estrategias de solución tendrán impactos sólo en la tarea (i). Después de encontrar el plan de expansión óptimo, la tarea (ii) se ejecutará de la misma manera, independientemente del enfoque seleccionado para la tarea (i).

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

520

SDDP

Manual de Metodología

VERSIÓN 17.3

PSR

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ
AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

521

Tabla de Contenido

1 Introducción 1
2 Optimización Estocástica de Sistemas Hidrotérmicos 2
2.1 Modelación de los componentes básicos del sistema 2
2.2 Problema de despacho hidrotérmico 4
2.3 Formulación del problema 5
2.4 Enfoque de solución basada en el espacio de estados 7
2.5 Representación alternativa de la correlación serial 12
2.6 Limitaciones del esquema PDE 13
2.7 El esquema de PD Dual DP 14
2.8 Representación de la correlación serial en la PDDE 19
3 Despacho de una Etapa: Formulación Básica 22
3.1 Planteamiento del problema 22
3.2 Función objetivo 22
3.3 Restricciones operativas básicas 23
3.4 Función de costo futuro 26
4 Restricciones Operativas Adicionales – Hidroeléctrica 28
4.1 Vertimiento no controlable 28
4.2 Restricciones de seguridad en los embalses – volúmenes de alerta 28
4.3 Restricciones de seguridad en los embalses – volúmenes mínimos operativos 29
4.4 Restricciones de seguridad en los embalses – volúmenes máximos operativos 29
4.5 Restricciones de seguridad en los embalses – volúmenes de espera 30
4.6 Restricciones en el desfogue total 30
4.7 Restricciones de regulación en centrales de pasada 30
4.8 Riego 31
4.9 Modelo de volumen muerto 32
4.10 Canal de desfogue 33
4.11 Generación en función de la afluencia 36
4.12 Curva de aversión a riesgo 37
4.13 Energía de alerta para un conjunto de embalses 38
4.14 Energía mínima de seguridad para un conjunto de embalses 39

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

522

4.15 Energía de espera para un conjunto de embalses 39
5 Restricciones Operativas Adicionales – Plantas Térmicas 41
5.1 Centrales térmicas con costos lineales por parte 41
5.2 Centrales térmicas *must-run* 42
5.3 Restricciones de generación mínima para grupos de centrales térmicas 42
5.4 Restricciones de generación 43
5.5 Centrales térmicas multi-combustible 43
5.6 Centrales térmicas tipo unit commitment 44
5.7 Plantas térmicas con contrato de combustible 45
5.8 Límites en el consumo de combustible 47
5.9 Límites en la tasa de consumo de combustible 48
6 Restricciones Operativas Adicionales – Reserva de Generación 49
6.1 Reserva rodante 49
6.2 Restricciones de reserva de generación 49
7 Fuentes de Energia Renovable 51
8 Red de Transporte de Energía 52
8.1 Modelo de interconexión 52
8.2 Modelo de flujo de potencia linealizado 54
8.3 Representación de pérdidas 59
9 Disponibilidad y Transporte de Gas Natural 63
9.1 Producción de gas 63
9.2 Transporte de gas 64
9.3 Balance térmico en la simulación de la red de gas 65
10 Plantas Térmicas con Costo de Emisión de CO2 66
11 Modelado personalizado 67
11.1 Restricciones genéricas 67
11.2 Restricciones genéricas por interpolación 67
12 Clasificación de las Restricciones 69
13 Diccionario de Variables 70
14 Bibliografía 76
A. Programación Dinámica Dual Estocástica 77

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

523

A.1 Formulación del problema 77
A.2 Pasos del algoritmo SDDP 77
A.2.1 Selección del conjunto inicial de estados 77
A.2.1.1 Estados iniciales de almacenamiento 78
A.2.1.2 Estados iniciales de afluencias 78
A.2.2 Cálculo de la función aproximada de costo futuro 78
A.2.2.1 Generación de N escenarios de afluencias condicionadas 78
A.2.2.2 Solución del problema operativo 78
A.2.2.3 Cálculo de las derivadas 79
A.2.2.4 Cálculo de la aproximación de la función de costo futuro 80
A.2.2.5 Actualización de la función de costo futuro de la etapa anterior 81
A.2.3 Cálculo del límite inferior 81
A.2.4 Cálculo del límite superior 81
A.2.4.1 Estados iniciales de almacenamiento 81
A.2.4.2 Estados iniciales de afluencias 82
A.2.4.3 Simulación operativa 82
A.2.4.4 Actualización del estado inicial de almacenamiento 82
A.2.4.5 Obtención del límite superior 82
A.2.5 Verificación de la optimalidad 83
B. Modelo Estocástico de Caudales 84
B.1 Objetivo 84
B.2 Modelación en una variable para secuencias de caudales afluentes a un único embalse 84
B.2.1 El Modelo ARP(1) 84
B.2.1.1 Introducción 84
B.2.1.2 Relación entre el parámetro autoregresivo y la correlación de caudales 85
B.2.1.3 El vector de ruidos transformados 86
B.2.2 Modelo de ajuste 88
B.2.3 Verificación del modelo 89
B.2.3.1 Independencia de los ruidos 89
B.2.3.2 Ruidos normalizados 89
B.2.3.3 Puntos fuera de la curva 90

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

524

B.3 Modelo multivariado para múltiples embalses 90
B.4 Generación sintética de caudales 90
B.1 Representación de variables climáticas exógenas 92
B.1.1.1 Eligiendo el factor de ponderación 92
B.1.2 Modelo de ajuste 92

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

1 INTRODUCCIÓN

Este informe presenta los lineamientos conceptuales del algoritmo de programación dinámica estocástica dual, utilizado en el modelo SDDP.

Se describen las variables de cada ecuación en tablas con cuatro columnas:

Nombre	Descripción	Unidad	Tipo
ej. $v_{t+1}(i)$	ej. volumen de la central i en el inicio de la etapa t	*hm3*	V (variable de decisión) o D (dato de entrada)

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

2 OPTIMIZACIÓN ESTOCÁSTICA DE SISTEMAS HIDROTÉRMICOS

2.1 Modelación de los componentes básicos del sistema

2.1.1 Plantas térmicas

En sistemas puramente térmicos el costo operativo de cada central depende básicamente de su costo de combustible. Por lo tanto, se representa una planta térmica por su costo operativo unitario $\{c_j,\ j = 1,\ldots,J\}$ ($/MWh) y su capacidad de generación:

$$g_t(j) \leq \overline{g}(j) \qquad \text{para } j = 1,\ldots,J \qquad (2.1)$$

donde:

j	indexa las plantas térmicas		
J	número de plantas		
$g_t(j)$	energía producida por la planta j en la etapa t	MWh	V
$\overline{g}(j)$	capacidad de generación de la planta j	MWh	D

2.1.2 Plantas hidroeléctricas

La Figura 2.1 muestra el diagrama esquemático de una planta hidroeléctrica.

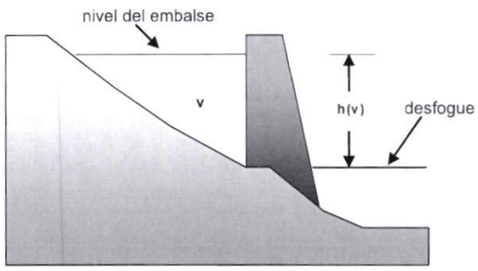


Figura 2.1 – Planta hidroeléctrica con embalse

La operación de la planta se representa a través de las siguientes ecuaciones:

2.1.2.1 Balance hídrico

Representa el enlace en etapas consecutivas, como se ilustra en la Figura 2.2: el almacenamiento al final de la etapa t (inicio de la etapa $t + 1$) es igual al almacenamiento inicial menos el desfogue total (turbinamiento, vertimiento y riego) más el volumen afluente (caudales laterales más el desfogue de las plantas aguas arriba):

$$v_{t+1}(i) = v_t(i) - u_t(i) - s_t(i) + a_t(i) - r_t(i) + \delta r_t(i) + \sum_{m \in U_i}[u_t(m) + s_t(m)] \quad (2.2)$$
$$\text{para } i = 1,\ldots,I$$

donde:

i	indexa las plantas hidroeléctricas

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

I	número de plantas		
$v_{t+1}(i)$	volumen almacenado en la planta i al final de la etapa t	m^3	V
$v_t(i)$	volumen almacenado en la planta i en el inicio de la etapa t	m^3	D
$a_t(i)$	caudal lateral afluente a la planta i en la etapa t	m^3	D
$r_t(i)$	riego en la planta i en la etapa t	m^3	D
$\delta r_t(i)$	violación del riego de la planta i en la etapa t	m^3	D
$u_t(i)$	volumen turbinado en la etapa t	m^3	V
$s_t(i)$	volumen vertido en la etapa t	m^3	V
$m \in U_i$	conjunto de plantas inmediatamente aguas arriba de la planta i		

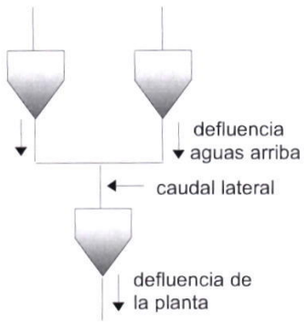


Figura 2.2 – Balance hídrico

2.1.2.2 Límites en el almacenamiento y en el desfogue

$$v_t(i) \leq \overline{v}(i) \qquad \text{para } i = 1, \ldots, I \qquad (2.3)$$

$$u_t(i) \leq \overline{u}(i) \qquad \text{para } i = 1, \ldots, I \qquad (2.4)$$

donde:

$\overline{v}(i)$	Capacidad de almacenamiento de la planta i	m^3	D
$\overline{u}(i)$	Capacidad de turbinamiento de la planta i	m^3	D

2.1.2.3 Producción de energía

Las plantas hidroeléctricas convierten la energía potencial del agua almacenada en energía cinética, la cual se usa para mover las turbinas acopladas a generadores. La energía producida por el turbinamiento de $u(i)$ m^3 se calcula por:

$$g_t(i) = \rho(v_t(i)) \times u_t(i) \qquad (2.5)$$

donde:

$g_t(i)$	energía generada en la central hidroeléctrica i, en la etapa t	MWh	V
$\rho(v_t(i))$	coeficiente de producción de la central hidroeléctrica i	MWh/m^3	D
$u_t(i)$	turbinamiento de la central hidroeléctrica i, en la etapa t	m^3	V

El coeficiente de producción $\rho(v_t(i))$ a su vez se calcula por:

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

528

$$\rho(v_t(i)) = \eta(i) \times \phi \times \gamma \times h(vt(i)) \quad (2.6)$$

donde:

$\eta(i)$	eficiencia del conjunto de turbinas/generadores de la central hidroeléctrica i		D
ϕ	masa especifica del agua	kg/m^3	D
γ	factor de gravedad	m/s^2	D
$h(vt(i))$	caída neta - la diferencia entre la cota del embalse y aguas debajo de la hidroeléctrica i (Figura 2.1)	m	D

2.1.3 Demanda

La demanda de energía eléctrica se representa a través de una restricción en que la suma de la energía producida (en las centrales térmicas e hidroeléctricas) debe ser igual a la demanda (mensual o semanal), es decir:

$$\sum_{j=1}^{J} g_t(j) + \sum_{i=1}^{I} \rho(v_t(i)) \times u_t(i) = d_t$$

d_t	Demanda (mensual o semanal) de energía eléctrica	MWh	D

2.2 Problema de despacho hidrotérmico

2.2.1 Características del problema

El objetivo del despacho hidrotérmico es determinar la secuencia de desfogues de las plantas hidroeléctricas que minimice el valor esperado del costo operativo total (dado por el costo de combustible más las penalizaciones por racionamiento) a lo largo del período de estudio. Como muestra la Figura 2.3 este problema se puede representar como un árbol de decisiones.

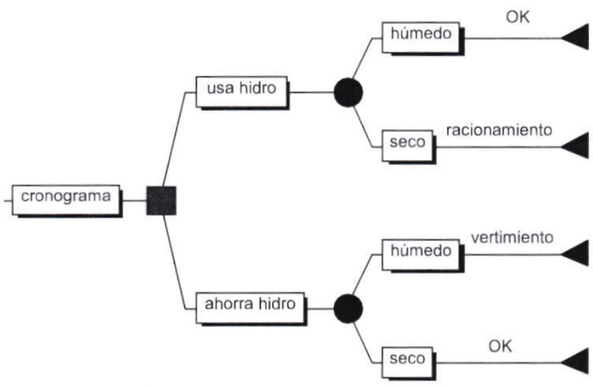


Figura 2.3 – Proceso de decisión para el despacho hidrotérmico

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

Como muestra la figura, el operador tiene las opciones de usar la energía hidroeléctrica hoy, y con esto reducir los costos de la energía térmica complementar, o de almacenarla para usarla en la próxima etapa. Si la decisión hoy es utilizar la energía de base hidroeléctrica y en el futuro los caudales son altos – lo que permite llenar los embalses – la operación se dije eficiente. Sin embargo, si ocurre una sequía en el futuro, los embalses no se recuperarán, y será necesario utilizar generación térmica más cara, o hasta mismo interrumpir el suministro de la demanda.

Por otro lado, si la decisión de hoy es almacenar el agua para uso futuro a través del uso de más generación térmica, y los caudales futuros son altos será necesario verter el agua, lo que significa un desperdicio de energía. Sin embargo, se ocurre una sequía en el futuro, el almacenamiento se usará para evitar la generación más cara o un racionamiento de energía.

2.3 Formulación del problema

La Figura 2.4. muestra la formulación del despacho hidrotérmico estocástico para el caso de una planta y un árbol de caudales con tres etapas.

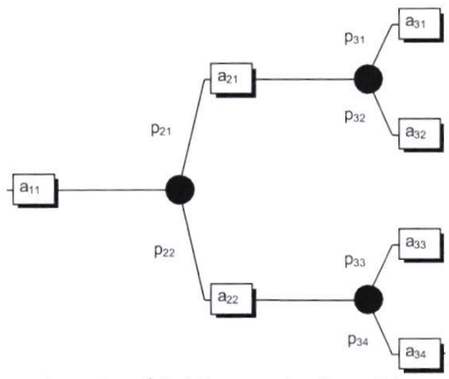


Figura 2.4 – Árbol de escenarios de caudales

donde:

a_{ts}	caudal en la etapa t, escenario s	m^3	D
p_{ts}	probabilidad condicionada del escenario s de caudal en la etapa t	p.u.	D

El problema de despacho estocástico se formula como:

$$\text{Min} \quad c_1(u_{11}) + p_{21}[c_2(u_{21}) + p_{31}c_3(u_{31}) + p_{32}c_3(u_{32})] + p_{22}[c_2(u_{22}) + p_{33}c_3(u_{33}) + p_{34}c_3(u_{34})] \qquad (2.7)$$

sujeto a

(a) restricciones de balance hídrico

$$v_{21} = v_{11} - u_{11} - s_{11} + a_{11}$$
$$v_{31} = v_{21} - u_{21} - s_{21} + a_{21}$$

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

$$v_{41} = v_{31} - u_{31} - s_{31} + a_{31}$$
$$v_{42} = v_{31} - u_{32} - s_{32} + a_{32}$$
$$v_{32} = v_{21} - u_{22} - s_{22} + a_{22}$$
$$v_{43} = v_{32} - u_{33} - s_{33} + a_{33}$$
$$v_{44} = v_{32} - u_{34} - s_{34} + a_{34}$$

(b) restricciones de almacenamiento y desfogue

$$v_{t+1,s} \leq \overline{v}; \qquad u_{t,s} \leq \overline{u} \qquad \text{para todas las etapas } t\text{; todos los escenarios } s$$

donde:

$u_{t,s}$	decisión operativa de la planta hidroeléctrica (volumen turbinado) en la etapa t, escenario s	m^3	V
$c_t(u_{t,s})$	costo de la generación térmica necesaria para complementar la decisión hidroeléctrica	$	V
$v_{t+1,s}$	nivel de almacenamiento del embalse al final de la etapa t, escenario s	m^3	V
$s_{t,s}$	volumen vertido en la etapa t, escenario s	m^3	V

La función de complementación térmica $c_t(u_{t,s})$ se representa implícitamente a través de la solución del siguiente problema de programación lineal (PL):

$$c_t(u_{t,s}) = \text{Min} \quad \sum_{j=1}^{J} c_t(j) \times g_t(j) \qquad (2.8)$$

Sujeto a

(c) restricciones del suministro de la demanda

$$\sum_{j=1}^{J} g_t(j) = d_t - \rho \times u_{ts} \qquad \text{para } t = 1, \ldots, T$$

(d) restricciones de capacidad de generación térmica

$$g_t(j) \leq \overline{g}(j) \qquad \text{para } j = 1, \ldots, J, \text{ para } t = 1, \ldots, T$$

donde:

j	indexa las plantas térmicas		
J	número de plantas		
$c_t(j)$	costo operativo de la planta j	$/MWh	D
$g_t(j)$	producción de energía de la planta j en la etapa t	MWh	V
$\overline{g}(j)$	capacidad de producción de la planta j	MWh	D
d_t	demanda en la etapa t	MWh	D
ρ	coeficiente de producción de la planta hidroeléctrica (en este ejemplo es una constante)	MWh/m³	D

En teoría, se puede resolver el problema (2.8) con algoritmos convencionales de programación lineal (LP). Sin embargo, la dimensión del problema para sistemas reales es demasiado grande

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

pues se modelan docenas de plantas hidroeléctricas y el horizonte de planificación es de varios años. La razón es que el número de ramas en el árbol de decisiones aumenta exponencialmente con el número de etapas del estudio. Esta limitación de las formulaciones basadas en los árboles de decisión ha motivado el desarrollo de esquemas de solución basados en el *espacio de estados*, que se describen a continuación.

2.4 Enfoque de solución basada en el espacio de estados

2.4.1 Costos inmediatos y futuros

Como muestra la Figura 2.5, el problema de despacho se descompone en varios subproblemas de una etapa, donde el objetivo es minimizar la suma de los costos operativos *inmediatos y futuros*.

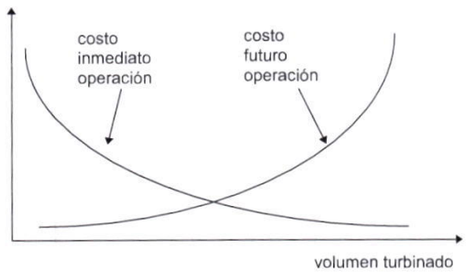


Figura 2.5 – Costos inmediatos y futuros x volumen turbinado

La función de costo inmediato (FCI) corresponde a la función de complementación térmica $c_t(u_t)$ discutida en la sección anterior. Se observa en la Figura que el monto (y costo) de esta complementación térmica disminuye con el aumento del volumen turbinado. A su vez, la función de costo futuro (FCF) refleja el valor esperado del costo de la generación térmica de la etapa $t + 1$ hasta el final del periodo de estudio. Se observa que la FCF aumenta con el aumento del volumen turbinado, pues menos energía hidroeléctrica estará disponible en el futuro para desplazar la generación térmica.

2.4.2 Despacho hidrotérmico de una etapa

Dado el almacenamiento inicial v_t y la función de costo futuro $\alpha_{t+1}(v_{t+1})$, el problema de despacho de una etapa se formula como:

$$z_t = \text{Min} \quad c_t(u_t) + \alpha_{t+1}(v_{t+1}) \tag{2.9}$$

sujeto a

$$v_{t+1} = v_t - u_t - s_t + a_t$$
$$v_{t+1} \leq \overline{v}$$
$$u_t \leq \overline{u}$$

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

Diferente del problema de optimización estocástico (2.8), que es muy grande, el problema de despacho de una solo etapa (2.9) se puede resolver con facilidad a través de técnicas estándar de programación lineal (LP).

2.4.3 Función de costo futuro

2.4.3.1 Enumeración de todos los estados futuros

El cálculo de la función de costo futuro es el tema clave de este esquema de espacio de estados. En teoría, $\alpha_{t+1}(v_{t+1})$ se podría calcular a través de una *simulación* de la operación del sistema en el futuro para diferentes valores iniciales de almacenamiento, como se ilustra en la Figura 2.6 a continuación.

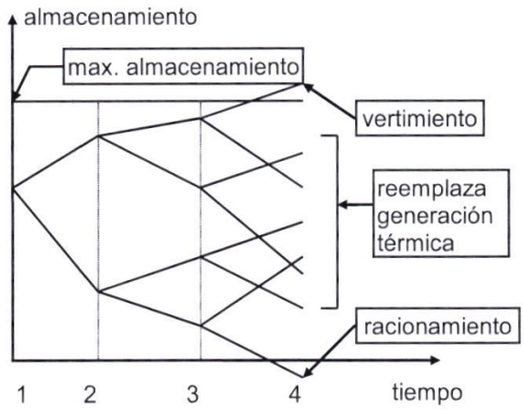


Figura 2.6 – Cálculo de la FCF a través de simulaciones operativas

Sin embargo, este esquema de "fuerza bruta" tiene las mismas desventajas computacionales que la formulación del problema a través de un árbol de escenarios. Un esquema más eficiente de realizar este cálculo es la recursión de *programación dinámica estocástica* (PDE), que se describe a continuación:

2.4.3.2 Recursión de PDE

a) Para cada etapa t (típicamente una semana o mes) se definen un conjunto de *estados del sistema* indexados por $m = 1, \ldots, M$; por ejemplo, niveles de almacenamiento en 100%, 90%, etc. hasta 0%. La Figura 2.7 ilustra la definición de los estados del sistema para uno solo embalse. Observe que se supone conocido el estado inicial (el nivel de almacenamiento en el inicio de la primera etapa).

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

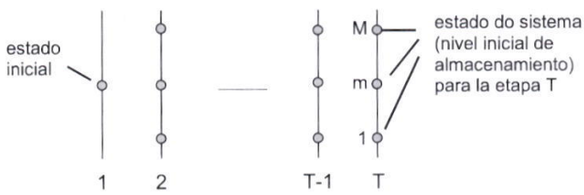


Figura 2.7 – Definición de los estados del sistema

b) Empezando de la *última* etapa, T, resuelva el problema de despacho de una etapa (2.9) suponiendo que el almacenamiento inicial es el primer valor del conjunto definido en el paso (a) – por ejemplo, 100%. Dado que se está en la última etapa, la función de costo futuro es igual a cero. Para tomar en cuenta la incertidumbre hidrológica, resuelva el problema de despacho para K *escenarios* de caudales, que representan los distintos valores posibles de afluencias en la etapa. La Figura 2.8 ilustra el procedimiento.

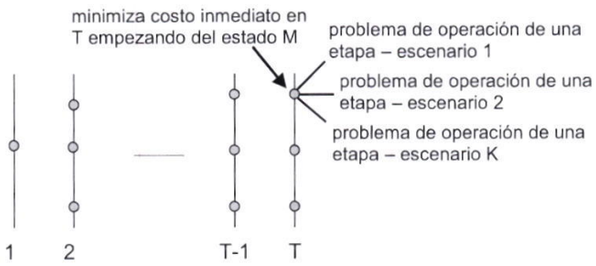


Figura 2.8 – Cálculo de la estrategia óptima – última etapa

c) Calcule el valor esperado del costo operativo asociado al nivel de almacenamiento 100% como el promedio de los costos de los K subproblemas de una etapa. Con esto se obtiene el primer punto de la función de costo futuro para la etapa $T-1$, i.e. $\alpha_T(v_T)$. Repita el procedimiento de cálculo del valor esperado del costo operativo para cada uno de los estados de almacenamiento inicial en la etapa T. Interpole los costos entre los estados calculados y produzca la FCF $\alpha_T(v_T)$ para la etapa $T-1$ (ver Figura 2.9)

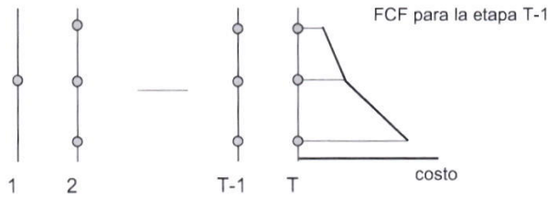


Figura 2.9 – Cálculo de la FCF para la etapa T-1

d) Repita el procedimiento para cada uno de los estados seleccionados de la etapa $T-1$, como se muestra en la Figura 2.10. Observe que el objetivo ahora es minimizar la suma del costo operativo inmediato de la etapa $T-1$más el valor esperado del costo futuro, dado por la FCF calculada en el paso anterior.

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPUBLICA DE PANAMA AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PUBLICOS

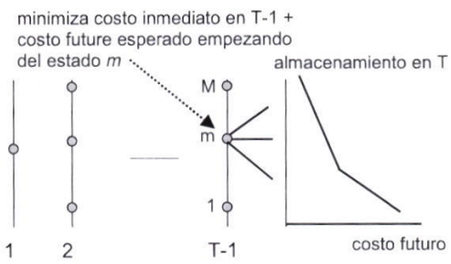


Figura 2.10 – Cálculo de los Costos Operacionales para la Etapa T-1 y FCF calculada en la etapa T

e) Repita el procedimiento del paso (d) para las demás etapas $T-2$, $T-3$ etc. hasta la primera etapa.

2.4.3.3 Implementación del esquema SDP

Inicialice la FCF de la última etapa $\alpha_{T+1}(v_T) \leftarrow 0$

Repita para t = T, T-1, …, 1

Repita para cada valor de almacenamiento $v_t = v_t^1, \ldots, v_t^m, \ldots, v_t^M$

Repita para cada escenario de caudales $a_t = a_t^1, \ldots, a_t^k, \ldots, a_t^K$

Resuelva el problema de despacho (2.9) para v_t^m y caudal a_t^k:

$$\alpha_t^k(v_t^m) = \text{Min} \quad c_t(u_t) + \alpha_{t+1}(v_{t+1}) \qquad (2.10)$$

sujeto a

$$v_{t+1} = v_t^m - u_t - s_t + a_t^k$$
$$v_{t+1} \leq \overline{v}$$
$$u_t \leq \overline{u}$$

Fin del "loop"

Calcular los costos operativos considerando todos los escenarios de caudales:

$$\alpha_t(v_t^m) = \sum_{k=1}^{K} p_k \times \alpha_t^k(v_t^m)$$

Fin del "loop"

Crear una función de costo futuro $\alpha_t(v_t)$ para la etapa anterior por interpolación de los valores discretos $\{\alpha_t(v_t^m), m = 1, \ldots, M\}$

Fin del "loop"

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

2.4.4 Representación de la dependencia temporal de los caudales

La mayor parte de los caudales presenta una correlación serial, esto es, si el caudal del mes pasado fue más "seco" que el promedio, existe una tendencia de que el caudal del mes corriente también o sea. Esto se debe al efecto de los acuíferos subterráneos, que funcionan como "capacitores" (la tasa de vaciado del acuífero depende del volumen total absorbido en el pasado). Esta correlación se puede representar por una cadena de Markov, donde p_{kl} es la probabilidad de transición del caudal a_t^k en la etapa t para el caudal a_{t+1}^l en la etapa $t+1$:

$t+1\rightarrow$ $t\downarrow$	a_{t+1}^1	...	a_{t+1}^l	...	a_{t+1}^L
a_t^1	p_{11}	...	p_{1l}	...	p_{1L}
...	...	...	...	...	...
a_t^k	p_{k1}	...	p_{kl}	...	p_{kL}
...	...	...		...	
a_t^K	p_{K1}	...	p_{Kl}	...	p_{KL}

La función de costo futuro en el esquema PDE tiene ahora dos variables de estado: el almacenamiento en el inicio de la etapa t y el caudal a lo largo de la misma etapa. La implementación de la PDE con dos variables de estado se presenta a continuación:

Inicialice la función de costo futuro de la última etapa $\alpha_{T+1}(v_T, a_T) \leftarrow 0$

Repita para t = T, T-1, ..., 1

Repita para cada nivel de almacenamiento $v_t = v_t^1, \ldots, v_t^m, \ldots, v_t^M$

Repita para cada escenario de caudales $a_t = a_t^1, \ldots, a_t^k, \ldots, a_t^K$

Resuelva el problema de despacho para el volumen inicial v_t^m y afluencia a_t^k donde el objetivo es minimizar la suma del costo inmediato más el valor esperado del costo futuro, calculado para todas las transiciones de a_t^k to $\{a_{t+1}^l\}$ en la próxima etapa (Figura 2.11):

$$\alpha_t(v_t^m, a_t^k) = \text{Min } c_t(u_t) + \sum_{l=1}^{L} p_{kl} \times \alpha_{t+1}\left(v_{t+1}^k, a_{t+1}^l\right) \quad (2.11)$$

subeto a

$$v_{t+1}^k = v_t^m - u_t - s_t + a_t^k$$
$$v_{t+1}^k \leq \overline{v}$$
$$u_t \leq \overline{u}$$

Fin del "loop"

Fin del "loop"

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

Construya la función de costo futuro $\alpha_t(v_t, a_t)$ para la etapa anterior interpolando los valores calculados $\{\alpha_t(v_t^m, a_t^k), m = 1, \ldots, M; k = 1, \ldots, K\}$

Fin del "loop"

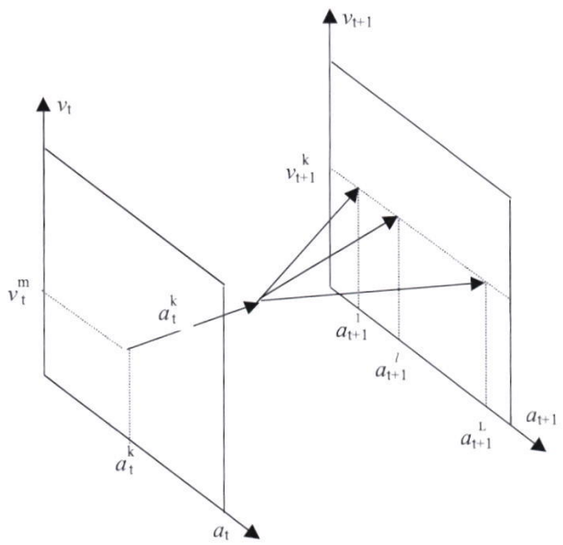


Figura 2.11 – PDE con a_t como variable de estado

2.5 Representación alternativa de la correlación serial

Una manera alternativa – y equivalente en términos matemáticos – de representar las correlaciones seriales es usar como variable de estado el caudal de la etapa *anterior*, a_{t-1} (Figura 2.12). El procedimiento pasa a ser:

Inicialice la función de costo futuro de la última etapa $a_{T+1}(v_t, a_{T-1}) \leftarrow 0$

Repita para t = T, T-1, …, 1

Repita para cada nivel de almacenamiento $v_t = v_t^1, \ldots, v_t^m, \ldots, v_t^M$

Repita para cada escenario de caudales anteriores $a_{t-1} = a_{t-1}^1, \ldots, a_{t-1}^k, \ldots, a_{t-1}^K$

Repita para cada caudal condicionado en a_{t-1}^k: $a_t = a_t^1, \ldots, a_t^l, \ldots, a_t^L$

Resuelva el despacho para los valores para v_t^m y a_t^l:

$$\alpha_t^l(v_t^m, a_{t-1}^k) = \text{Min } c_t(u_t) + \alpha_{t+1}(v_{t+1}^l, a_t^l) \qquad (2.12)$$

sujeto a

$$v_{t+1}^l = v_t^m - u_t - s_t + a_t^l$$

$$v_{t+1}^l \leq \overline{v}$$

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

$$u_t \leq \overline{u}$$

Fin del "loop"

Calcule el valor esperado del costo

$$\alpha_t(v_t^m, a_{t-1}^k) = \sum_{l=1}^{L} p_{kl}\, \alpha_t^l(v_t^m, a_{t-1}^k)$$

Fin del "loop"

Fin del "loop"

Construya la función de costo futuro $\alpha_t(v_t, a_{t-1})$ para la etapa anterior interpolando los valores calculados $\{\alpha_t(v_t^m, a_{t-1}^k), m = 1, \ldots, M;\ k = 1, \ldots, K\}$.

Fin del "loop"

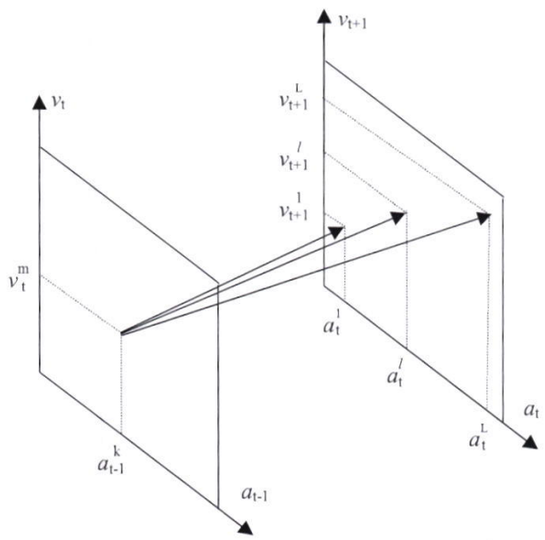


Figura 2.12 – PDE con at-1 como variable de estado

2.6 Limitaciones del esquema PDE

El esquema PDE ha sido usado por varios años en los países con sistemas hidroeléctricos. Sin embargo, la recursión de PDE requiere la enumeración de todas las *combinaciones* de los valores del almacenamiento inicial y de los caudales anteriores. Como consecuencia, el esfuerzo computacional aumenta exponencialmente con el número de embalses. Este crecimiento (conocido como la "maldición de la dimensionalidad" de la programación dinámica) se ilustra en el Tabla 2.1, que muestra el número de combinaciones con el número de embalses, suponiendo que los niveles de los embalses y de los caudales se representan por 20 valores cada.

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

538

Tabla 2.1 – Maldición de la dimensionalidad

# embalses	# estados
1	$20^2 = 400$
2	$20^4 = 160$ mil
3	$20^6 = 64$ millones
4	$20^8 \approx 25$ mil millones
5	$20^{10} \approx 10$ billones

Esta limitación computacional llevó al desarrollo de esquemas aproximados de solución tales como la agregación de los embalses y la programación dinámica con aproximaciones sucesivas, donde la política operativa de cada embalse se calcula en separado, suponiendo conocidas las políticas para los demás embalses.

El enfoque utilizado en el modelo SDDP se basa en una técnica de representación analítica de la función de costo futuro, conocida como programación dinámica dual estocástica (PDDE). El esquema PDDE no requiere la discretización previa del espacio de estados, lo que alivia el esfuerzo computacional de la recursión de PD estocástica. La PDDE se aplicó a docenas de países en las Américas, Europa, Eurasia y Asia-Pacífico.

2.7 El esquema de PD Dual DP

2.7.1 El algoritmo PDDE

2.7.1.1 Aproximación lineal por partes de la función de costo futuro

El esquema PDDE se basa en el hecho que la FCF se puede representar como una función lineal por partes, esto es, no es necesario crear una tabla con interpolaciones. Además, se muestra que la inclinación de la FCF alrededor de un dado estado se obtiene analíticamente de los multiplicadores Simplex asociados a la solución óptima del problema de despacho de una etapa (2.9). La Figura 2.13 ilustra el cálculo por PDDE del costo operativo promedio y de la inclinación de la FCF para la última etapa, estado inicial = 100% (paso (c) del procedimiento tradicional de PDE).

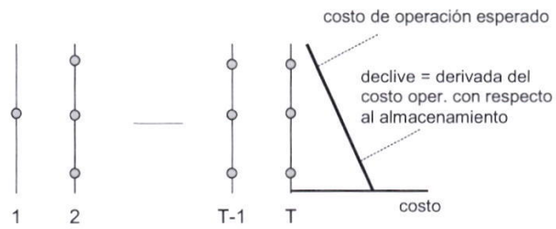


Figura 2.13 – PDDE – Cálculo del primer segmento lineal de la FCF

Se muestra a continuación el problema de despacho de la última etapa (observe que la FCF para esta etapa, $\alpha_{T+1}(v_{T+1})$, se inicializa como igual a cero):

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS 539

$$z_T = \text{Min} \quad c_T(u_T) \qquad \text{multiplicadores}$$
$$\text{Sujeto a} \qquad (2.13)$$
$$v_{T+1} = v_T - u_T - s_T + a_T \qquad \pi_h$$
$$v_{T+1} \leq \overline{v} \qquad \pi_v$$
$$u_T \leq \overline{u} \qquad \pi_u$$

De la teoría de la programación lineal, se sabe que los multiplicadores asociados a cada restricción del problema a (2.13) en su solución óptima representan la derivada del costo óptimo z_T con respecto a una perturbación en el lado derecho de la restricción. En particular, el multiplicador asociado a la ecuación de balance hídrico, π_h, representa la derivada de z_T con respecto a una variación en el almacenamiento inicial v_T:

$$\pi_h = \partial z_T / \partial v_T \qquad (2.14)$$

Se observa en la Figura 2.13 que la expresión (2.14) corresponde a la inclinación de la FCF para la etapa $T-1$. El segmento lineal se puede interpretar como una expansión en series (hasta el primer término) de la FCF alrededor del almacenamiento inicial v_T.

La Figura 2.14 muestra el cálculo del costo operativo y de las inclinaciones de la FCF para cada estado en la etapa T. Se observa que la FCF $\alpha_T(v_T)$ de la etapa $T-1$ es una superficie lineal por partes, donde para cada punto se selecciona el segmento con el costo más alto ("convex hull").

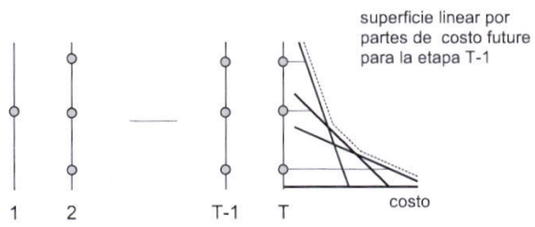


Figura 2.14 – Construcción de una FCF lineal por partes para la etapa T-1

El despacho hidrotérmico para la etapa anterior $T-1$ se representa como el siguiente problema de programación lineal:

$$\alpha_{T-1}(v_{T-1}) = Min\ c_{T-1}(u_{T-1}) + \alpha_T$$
$$\text{sujeto a} \qquad (2.15)$$
$$v_T = v_{T-1} - u_{T-1} - s_{T-1} + a_{T-1}$$
$$v_T \leq \overline{v}$$
$$u_{T-1} \leq \overline{u}$$
$$\alpha_T \geq \varphi_T^n \times v_T + \delta_T^n \qquad n = 1, \ldots, N$$

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

La FCF se representa por la variable escalar α_T y por N restricciones lineales $\{\alpha_T \geq \varphi_T^n \times v_T + \delta_T^n\}$, donde N es el número de segmentos lineales. Como muestra la Figura 2.15, las desigualdades $\{\alpha_T \geq \ldots\}$ representan la característica lineal por partes de esta función (para cualquier v_T, el segmento "activo" será el del más alto valor $\varphi_T^n \times v_T + \delta_T^n$).

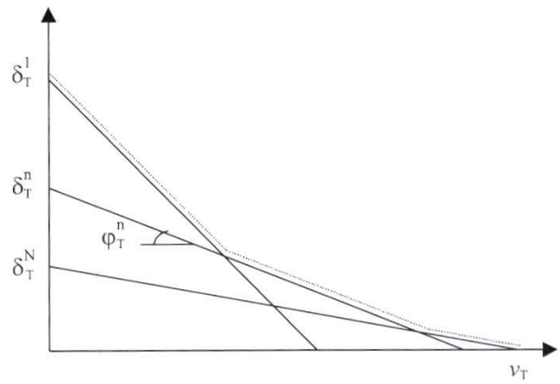


Figura 2.15 – FCF lineal por partes

2.7.2 Esquema de recursión "backward"

El procedimiento recursivo para cálculo de la FCF lineal por partes es muy semejante al de la PDE tradicional:

Inicialice el número de segmentos lineales N = número de almacenamientos iniciales M

Inicialice la FCF para la última etapa: $\{\varphi_{T+1}^n \text{ and } \delta_{T+1}^n\} = 0$ para $n = 1, \ldots, N$

Repita para $t = T, T-1, \ldots, 1$

Repita para cada nivel de almacenamiento $v_t = \{v_t^m, m = 1, \ldots, M\}$

Repita para cada escenario de caudales $a_t = a_t^1, \ldots, a_t^k, \ldots, a_t^K$

Resuelva el problema de despacho para el volumen v_t^m caudal a_t^k:

$$\alpha_t^k(v_t^m) = \text{Min} \quad c_t(u_t) + \alpha_{t+1} \qquad \text{multiplicador} \quad (2.16)$$

sujeto a

$$v_{t+1} = v_t^m - u_t - s_t + a_t^k \qquad \pi_{ht}^k$$

$$v_{t+1} \leq \overline{v}$$

$$u_t \leq \overline{u}$$

$$\alpha_{t+1} \geq \varphi_{t+1}^n \times v_{t+1} + \delta_{t+1}^n \quad \text{para } n = 1, \ldots, N$$

Fin del "loop"

Calcule el coeficiente y el término constante para el segmento lineal m^{th} de la FCF de la etapa anterior:

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

$$\varphi_t^m = \sum_{k=1}^{K} p_k \times \pi_{ht}^k \quad \text{and} \quad \delta_t^m = \sum_{k=1}^{K} p_k \times \alpha_t^k(v_t^m) - \varphi_t^m \times v_t^m$$

Fin del "loop"

Fin del "loop"

2.7.2.1 *Cálculo del límite inferior*

A la primera vista, no existen diferencias significativas entre el procedimiento de PDDE y el esquema tradicional de PD. Sin embargo, se observa que bajo el esquema tradicional se construí la FCF a través de la interpolación de los valores discretizados $\{\alpha_t(v_t^m)\}$. Esto significa que el número de puntos necesario para representar un sistema de I plantas hidroeléctricas es por lo menos igual a 2^I combinaciones de dos puntos extremos para cada embalse (lleno/vacío).

En la PDDE, los segmentos lineales se usan para extrapolar los valores de la FCF, esto es, no es necesario calcular todas las combinaciones de puntos para obtener FCF completa, aunque aproximada. Además, si se usa un conjunto menor de almacenamientos iniciales, se generan menos segmentos lineales. Como muestra la Figura 2.15, la FCF resultante, que se basa en el máximo valor sobre todos los segmentos, será un límite inferior a la función "real".

En consecuencia, la FCF para la primera etapa es un límite inferior $\underline{z}$ para la solución óptima del despacho hidrotérmico:

$$\underline{z} = \alpha_1(v_1) \tag{2.17}$$

2.7.3 Cálculo del límite superior

Si encontramos una manera de calcular un límite superior $\overline{z}$ para el valor de la solución óptima, esto haría posible una estrategia de aumentar incrementalmente la precisión de la solución del problema (esto es, empezar con un conjunto pequeño de almacenamientos iniciales; calcular los límites superior e inferior; y aumentar el número de puntos si fuera necesario).

2.7.3.1 *Esquema de simulación*

Este límite superior se estima a través de una simulación Monte Carlo de la operación del sistema, usando el conjunto de las FCFs producida por el esquema de recursión "backward", vea la sección 2.7.2. El resultado de la simulación es un límite superior porque la única FCF que resultaría en el menor costo operativo promedio es la FCF óptima; una simulación operativa con cualquier otra FCF resultaría, por definición, en costos operativos más altos que el óptimo.

El esquema de simulación se implementa en los siguientes pasos:

Defina un conjunto de escenarios de caudales $a_t = \{a_t^1, \ldots, a_t^m, \ldots, a_t^M\}$ para $t = 1, \ldots, T$

Repita para cada escenario $a_t = a_t^1, \ldots, a_t^m, \ldots, a_t^M$

Inicialice el almacenamiento para la etapa 1 como 1 las $v_t^m = v_1$

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

Repita para $t = 1, \ldots, T$

Resuelva el despacho para el almacenamiento v_t^m y caudal a_t^m

$$\text{Min} \quad c_t(u_t) + \alpha_{t+1} \tag{2.18}$$

sujeto a

$$v_{t+1}^m = v_t^m - u_t^m - s_t + a_t^m$$

$$v_{t+1}^m \leq \overline{v}$$

$$u_t^m \leq \overline{u}$$

$$\alpha_{t+1} \geq \varphi_{t+1}^n \times v_{t+1}^m + \delta_{t+1}^n \qquad \text{para } n = 1, \ldots, N$$

Fin del "loop"

Calcule el costo operativo total z^m para el escenario m como la suma de todos los costos inmediatos a lo largo del periodo de estudio:

$$z^m = \sum_{t=1}^{T} c_t(u_t^m)$$

Fin del "loop"

2.7.3.2 Intervalo de confianza

El valor esperado del costo operativo se estima por el promedio de los costos considerando todos los senarios de caudales:

$$\hat{z} = \frac{1}{M} \sum_{t=1}^{T} z^m \tag{2.19}$$

Cuando se usa una simulación Monte-Carlo, se puede calcular la incertidumbre alrededor del valor "verdadero" (de población) de $\overline{z}$. El intervalo de confianza a 95% es:

$$\overline{z} \in [\hat{z} - 1.96 \times \hat{\sigma};\ \hat{z} + 1.96 \times \hat{\sigma}] \tag{2.20}$$

donde $\hat{\sigma}$ es la desviación estándar del estimador dada por:

$$\hat{\sigma} = \frac{1}{M-1} \sqrt{\sum_{m=1}^{M} (z^m - \overline{z})^2} \tag{2.21}$$

2.7.4 Verificación de la optimalidad

Se obtiene la solución óptima cuando el límite inferior $\underline{z}$ calculado en (2.17) está en el intervalo de confianza (2.20). Se observa que, debido a la variación muestral, el límite inferior puede exceder el promedio estimado $\hat{z}$.

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

2.7.5 Nueva iteración

Si el límite inferior está fuera del intervalo de confianza, la recursión "backward" se ejecuta de nuevo, a partir de un conjunto adicional de valores de almacenamiento. Los candidatos naturales para los nuevos valores son los volúmenes $\{v_t^m, m = 1,\ldots,M\}$ producidos en el paso de simulación.

Observe que se retiene los segmentos lineales calculados en la iteración anterior, pues la FCF lineal por partes se calcula como el máximo sobre todos los segmentos. En otras palabras, es posible perfeccionar gradualmente la representación de la FCF.

2.8 Representación de la correlación serial en la PDDE

La representación de la correlación serial en la PDDE se basa en un proceso de Markov (modelo lineal autoregresivo) y no una cadena de Markov:

$$\frac{(a_t-\mu_t)}{\sigma_t} = \phi_1 \times \frac{(a_{t-1}-\mu_{t-1})}{\sigma_{t-1}} + \phi_2 \times \xi_t \qquad (2.22)$$

donde:

μ_t	caudal promedio
σ_t	desviación estándar
ϕ_1 y ϕ_2	parámetros del modelo
ξ_t	variable aleatoria independiente

Se usa la formulación de la sección 2.5, donde las variables de estado son el almacenamiento en el inicio de la etapa t, v_t, y el caudal de la etapa anterior, a_{t-1}. Esto se ilustra en las ecuaciones abajo, que muestran el problema de despacho para la etapa t, con almacenamiento inicial v_t^m y caudal anterior a_{t-1}^m:

$$\begin{aligned} \alpha_t^l(v_t^m, a_{t-1}^m) = \quad & \text{Min} \quad c_t(u_t) + \alpha_{t+1} && \text{multiplicador} \quad (2.23)\\ & \text{sujeto a} \\ & v_{t+1} = v_t^m - u_t - s_t + a_t^l && \pi_{ht}^l \\ & v_{t+1} \le \overline{v} \\ & v_{t+1} \le \overline{v} \end{aligned}$$

El caudal para la etapa t, a_t^l, resulta de la aplicación del proceso de Markov (2.22):

$$a_t^l = \sigma_t \times [\phi_1 \times \frac{(a_{t-1}-\mu_{t-1})}{\sigma_{t-1}} + \phi_2 \times \xi_t^l] + \mu_t \qquad (2.24)$$

donde ξ_t^l se muestrea de la distribución de probabilidad correspondiente. La aproximación de la FCF para la etapa anterior tendrá dos coeficientes, basados en las derivadas de $\alpha_t^l(v_t^m, a_{t-1}^m)$ con respecto a v_t^m and a_{t-1}^m en la solución óptima. El primer coeficiente se calcula como en el caso independiente:

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPUBLICA DE PANAMA AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PUBLICOS

$$\partial\alpha_t^l/\partial v_t = \pi_{ht}^l \quad (2.25)$$

El segundo se calcula a través de la regla de la cadena:

$$\partial\alpha_t^l/\partial a_{t-1} = \partial\alpha_t^l/\partial a_t \times \partial a_t/\partial a_{t-1} \quad (2.26)$$

El término $\partial\alpha_t^l/\partial a_t$ también corresponde al multiplicador π_{ht}^l, porque tanto v_t^m como a_t^l están en la misma ecuación de balance hídrico. A su vez, el término $\partial a_t/\partial a_{t-1}$ se calcula a partir de los parámetros del modelo de caudales de (2.24):

$$\partial a_t/\partial a_{t-1} = \sigma_t\phi_1/\sigma_{t-1} \quad (2.27)$$

El esquema recursivo se implementa como:

1) Generación de M secuencias de caudales a lo largo del periodo de estudio

Inicialice $\{a_0^m\}, m = 1, \ldots, M$

Repita para $t = 1, \ldots, T$

Repita para $m = 1, \ldots, M$

Muestre una variable aleatoria ξ_t^m

Calcule el caudal para la etapa t condicionado al caudal anterior a_{t-1}^m:

$$a_t^m = \sigma_t \times [\phi_1 \times \frac{(a_{t-1}^m - \mu_{t-1})}{\sigma_{t-1}} + \phi_2 \times \xi_t^m] + \mu_t$$

Fin del "loop"

Fin del "loop"

2) Recursión Backward

Repita para $t = T, T-1, \ldots, 1$

Repita para $m = 1, \ldots, M$

Recupere el vector de estado [almacenamiento, caudal anterior] $\{v_t^m, a_{t-1}^m\}$

Repita para $l = 1, \ldots, L$

Muestre una variable aleatoria ξ_t^l

Calcule el caudal para la etapa t condicionado al caudal anterior a_{t-1}^m:

$$a_t^l = \sigma_t \times [\phi_1 \times \frac{(a_{t-1}^m - \mu_{t-1})}{\sigma_{t-1}} + \phi_2 \times \xi_t^l] + \mu_t$$

Resuelva el problema de despacho para v_t^m y a_t^k:

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

$$\alpha_t^l(v_t^m, a_{t-1}^m) = Min \quad c_t(u_t) + \alpha_{t+1} \tag{2.28}$$

sujeto a

$$v_{t+1}^l = v_t^m - u_t - s_t + a_t^l$$

$$v_{t+1}^l \leq \overline{v}$$

$$u_t \leq \overline{u}$$

$$\alpha_{t+1} \geq \varphi_{t+1}^n \times v_{t+1} + \gamma_{t+1}^n \times a_t^l + \delta_{t+1}^n$$

para $n = 1, \ldots, N$

Calcule los coeficientes de la aproximación de la FCF para la etapa anterior, como se ilustra en (2.25) - (2.27)

Fin del "loop"

Fin del "loop"

Fin del "loop"

Observe que a_t^l es un valor conocido cuando se resuelve el problema de despacho (2.28). Consecuentemente, el término $\gamma_{t+1}^n \times a_t^l$ se suma al término constante δ_{t+1}^n. En otras palabras, dado que las derivadas se calculan analíticamente el esfuerzo computacional del esquema de la PDDE no cambia con el aumento de las dimensiones del espacio de estados.

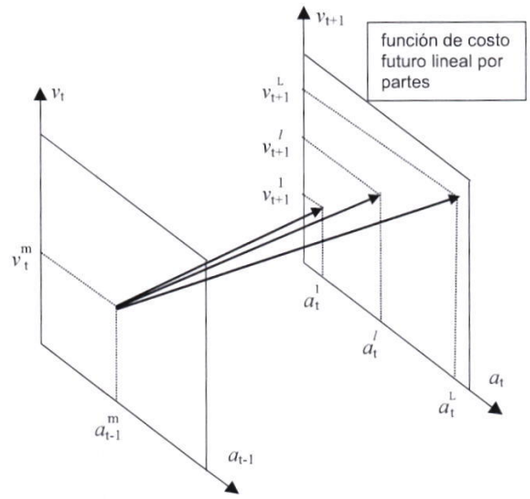


Figura 2.16 – Correlación serial en la PDDE

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

3 DESPACHO DE UNA ETAPA: FORMULACIÓN BÁSICA

3.1 Planteamiento del problema

Se presenta ahora en más detalle el cálculo de la decisión operativa óptima para cada etapa de los estudios de mediano y largo plazo. El problema de despacho hidrotérmico para la etapa t se plantea como:

$$Min\ FCI + FCF \tag{3.1}$$

sujeto a las restricciones operativas básicas de la etapa.

3.2 Función objetivo

Como fue discutido anteriormente, el objetivo del despacho hidrotérmico es minimizar la suma de los costos operativos inmediato y futuro. El costo inmediato FCI está dado por los costos térmicos $c(j) \times g_{tk}(j)$ en la etapa t, más las penalizaciones por las violaciones de restricciones operativas:

$$FCI = \sum_{k=1}^{K} \sum_{j=1}^{J} c(j) \times g_{tk}(j) + c_{\delta} \times \delta_{gt} \tag{3.2}$$

donde

k	índice de los escalones de demanda en la etapa		
K	número de escalones		
j	índice de las centrales térmicas		
J	conjunto de centrales térmicas		
$c(j)$	costo variable de operación de la central j	\$/MWh	D
$g_{tk}(j)$	energía producida en la planta j en el tiempo t y escalón k	MWh	V
c_{δ}	representa (de manera genérica) el costo por la violación de una restricción operativa	\$/unidad violación	D
δ_{gt}	monto de la violación en la etapa t	unidad violación	V

A su vez, como se ilustró en la sección 2.4.3, el costo futuro FCF se representa por la siguiente función:

$$FCF = \alpha_{t+1}(v_{t+1}, a_t) \tag{3.3}$$

donde:

v_{t+1}	almacenamiento al final de la etapa t	hm^3	V
a_t	Caudales afluente a los embalses durante la etapa t	hm^3	D

Observe que la FCF depende de los caudales debido a una dependencia temporal, esto es, un caudal húmedo en la etapa t indica que en promedio los caudales de la etapa $t + 1$ también serán húmedos[1].

[1] Esta dependencia se representa en los parámetros del modelo estocástico de caudales.

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

3.3 Restricciones operativas básicas

A continuación se describen las restricciones operativas básicas del problema de despacho. Estas restricciones son:

- ecuaciones de balance hídrico
- ecuaciones de suministro de la demanda
- límites operativos (límites de almacenamiento en los embalses, restricciones de turbinamiento mínimo y máximo y límites en la generación térmica)

3.3.1 Balance hídrico

Como se ilustró en la sección 2, la ecuación de balance hídrico relaciona el volumen de los embalses con el caudal afluente y el caudal defluente:

$$v_{t+1}(i) = v_t(i) + a_t(i) - \varepsilon(v_t(i)) - \sum_{k=1}^{K}[u_{tk}(i) + s_{tk}(i) + \phi_{tk}(i)] + \sum_{k=1}^{K}\left(\sum_{m\in I_U(i)} u_{tk}(m) + \sum_{m\in I_S(i)} s_{tk}(m) + \sum_{m\in I_F(i)} \phi_{tk}(m)\right) \quad \text{para } i = 1, \ldots, I \tag{3.4}$$

donde:

i	índice de las centrales hidroeléctricas		
I	conjunto de centrales hidroeléctricas		
$I_U(i)$	conjunto de centrales que turbinan para la central i		
$I_S(i)$	conjunto de centrales que vierten para la central i		
$I_F(i)$	conjunto de centrales que filtran para la central i		
$v_{t+1}(i)$	almacenamiento final de la central i en la etapa t	hm^3	V
$v_t(i)$	almacenamiento inicial de la central i en la etapa t	hm^3	D
$a_t(i)$	caudal lateral afluente a la central i en la etapa t	hm^3	D
$\varepsilon(v_t(i))$	volumen evaporado en la central i en la etapa t	hm^3	D
$u_{tk}(i)$	volumen turbinado por la central i durante la etapa t, escalón k	hm^3	V
$s_{tk}(i)$	volumen vertido por la central i durante la etapa t, escalón k	hm^3	V
$\phi_{tk}(i)$	volumen filtrado por la central i durante la etapa t, escalón k	hm^3	V

3.3.2 Límites de almacenamiento

$$\underline{v}_t(i) \le v_t(i) \le \overline{v}_t(i) \quad \text{for } i = 1, \ldots, I \tag{3.5}$$

donde:

$\underline{v}_t(i)$	volumen mínimo de almacenamiento de la central i en la etapa t	hm^3	D
$\overline{v}_t(i)$	volumen máximo de almacenamiento de la central i en la etapa t	hm^3	D

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPUBLICA DE PANAMA AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PUBLICOS

3.3.3 Turbinamiento mínimo

Dado que puede ser físicamente imposible atender una restricción de turbinamiento mínimo, es decir, el problema de una etapa puede resultar inviable se modela variables de holgura en las restricciones de turbinamiento mínimo como se ilustra a continuación:

$$u_{tk}(i) + \delta u_{tk}(i) \geq \underline{u}_{tk}(i) \quad \text{for } i = 1, \ldots, I;\ k = 1, \ldots, K \qquad (3.6)$$

donde:

$\underline{u}_{tk}(i)$	volumen turbinado mínimo para la central i en la etapa t, escalón k	hm^3	D
$\delta u_{tk}(i)$	violación del turbinamiento mínimo en la etapa t, escalón k	hm^3	V

En la función objetivo se debe incluir la variable de holgura con un coeficiente de penalización alto[2]

3.3.4 Turbinamiento máximo

La máxima energía generada por una central hidroeléctrica está limitada por el mínimo valor entre la capacidad de la turbina y la capacidad del generador, como se muestra en la Figura 3.1.

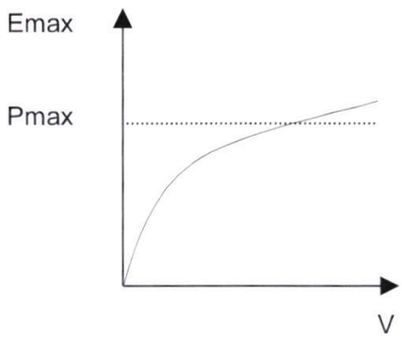


Figura 3.1 – Producción de energía

La restricción de turbinamiento máximo se formula de la siguiente manera:

$$u_{tk}(i) \leq Min\ (\overline{u}_{tk}(i), \overline{g}_{tk}(i) / \rho(v_t(i)))\ \text{ para } i = 1, \ldots, I;\ k = 1, \ldots, K \qquad (3.7)$$

donde:

$\overline{u}_{tk}(i)$	máximo volumen turbinable para la central i, etapa t. Representa la capacidad de la turbina	hm^3	D
$\overline{g}_{tk}(i)$	potencia máxima de la central i en la etapa t. Representa la capacidad del generador	MW	D
$\rho(v_t(i))$	coeficiente de producción de la central i en la etapa t calculado en función del volumen del embalse	MWh/hm^3	D

[2] La penalización debe reflejar el "trade-off" entre el costo operativo y el prejuicio de las violaciones de la restricción

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

3.3.5 Producción de energía hidroeléctrica

$$g_{tk}(i) = \rho(vt(i)) \times u_{tk}(i) \qquad \text{para } i = 1, \ldots, I;\ k = 1, \ldots, K \qquad (3.8)$$

donde:

$g_{tk}(i)$	energía producida por i en el escalón k, etapa t	MWh	V
$\rho(vt(i))$	coeficiente de producción de la central i en la etapa t	MWh/hm^3	D

3.3.6 Límites en la generación térmica

$$\underline{g}_{tk}(j) \leq g_{tk}(j) \leq \overline{g}_{tk}(j) \qquad \text{para } j = 1, \ldots, J;\ k = 1, \ldots, K \qquad 3.9)$$

donde:

$g_{tk}(j)$	energía producida por la central térmica j en el escalón k	MWh	V
$\underline{g}_{tk}(j)$	límite de generación mínima de la central j en el escalón k	MWh	D
$\overline{g}_{tk}(j)$	límite de generación máxima de la central t en el escalón k	MWh	D

Cabe observar que los límites de generación en cada escalón de demanda se calculan de la siguiente manera:

$$\overline{g}_{tk}(j) = \overline{g}_{t}(j) \times h(k) \qquad \text{para } j = 1, \ldots, J;\ k = 1, \ldots, K \qquad (3.10a)$$

$$\underline{g}_{tk}(j) = \underline{g}_{t}(j) \times h(k) \qquad \text{para } j = 1, \ldots, J;\ k = 1, \ldots, K \qquad (3.11b)$$

donde:

$h(k)$	duración del escalón k	hora	D

3.3.7 Máxima descarga de la batería

$$ds_k(b) \leq \bar{p}(b) \qquad \text{para } b = 1, \ldots, B; k = 1, \ldots, K \qquad (3.12)$$

donde:

b	índice de las baterías		
B	conjunto de las baterías		
$ds_k(b)$	descarga de la batería b en el escalón k	MWh	V
$\bar{p}(b)$	potencia máxima de la batería b	MWh	D

3.3.8 Máxima carga de la batería

$$cr_k(b) \leq \bar{p}(b) \qquad \text{para } b = 1, \ldots, B; k = 1, \ldots, K \quad (3.13)$$

donde:

$cr_k(b)$	carga de la batería b en el escalón k	MWh	V

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPUBLICA DE PANAMA AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PUBLICOS

3.3.9 Balance de energía de batería

$$vb_{t+1}(b) = vb_t(b) + \left(\sum_{k=1}^{K} \beta_c cr_k(b) - ds_k(b)\right) \text{ para } b = 1, \ldots, B \quad (3.14)$$

donde:

$vb_{t+1}(b)$	carga almacenada en la batería b al final de la etapa t	MWh	V
$vb_t(b)$	carga almacenada inicial en la batería b	MWh	D
β_c	eficiencia de carga de la batería b	p.u.	D

3.3.10 Almacenamiento máximo de la batería

$$vb_{t+1}(b) \leq \overline{vb}(b) \qquad \text{para } b = 1, \ldots, B \quad (3.15)$$

donde:

$\overline{vb}(b)$	almacenamiento máximo de la batería b	MWh	D

3.3.11 Almacenamiento mínimo de batería

$$vb_{t+1}(b) \geq \underline{vb}(b) \qquad \text{para } b = 1, \ldots, B \quad (3.16)$$

donde:

$\underline{vb}(b)$	almacenamiento mínimo de la batería b	MWh	D

3.3.12 Suministro de la demanda

$$\sum_{i=1}^{I} g_{tk}(i) + \sum_{j=1}^{J} g_{tk}(j) + \sum_{b=1}^{B}\left(\beta_d(b) \times ds_k(b) - cr_k(b)\right) = d_{tk} \text{ para } k = 1, \ldots, K \quad (3.17)$$

donde:

β_d	eficiencia de descarga de la batería b	p.u.	D
d_{tk}	demanda de energía en la etapa t, escalón k	MWh	D

3.4 Función de costo futuro

Como se ilustró en la sección 2.7, la función de costo futuro se representa como un conjunto de restricciones lineales, donde cada una representa una linealización de la función.

$$\alpha_{t+1}(v_{t+1}, a_t) = \alpha$$

sujeto a

$$\alpha \geq w_t(p) + \sum_{i=1}^{I} \lambda_{tv}(i,p) \times v_{t+1}(i) + \sum_{i=1}^{I} \lambda_{ta}(i,p) \times a_t(i) \quad (3.18)$$

para $p = 1, \ldots, P$

donde:

p	índice de los cortes o linealizaciones

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

P	número de cortes o linealizaciones de la función de costo futuro		
α	variable escalar que representa el valor esperado del costo futuro	$k\$$	
$w_t(p)$	término constante del p-ésimo corte	$k\$$	D
$\lambda_{tv}(i,p)$	coeficiente del volumen final del embalse i en el p-ésimo corte	$k\$/hm^3$	D
$\lambda_{ta}(i,p)$	coeficiente de la afluencia lateral a la central hidroeléctrica i en el p-ésimo corte	$k\$/hm^3$	D

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

552

4 RESTRICCIONES OPERATIVAS ADICIONALES – HIDROELÉCTRICA

Además de las restricciones básicas el programa SDDP permite modelar una serie de aspectos adicionales. Cabe observar que la representación de estos aspectos es opcional y depende de las características del sistema en estudio.

4.1 Vertimiento no controlable

Para los representar los embalses que no pueden verter si no están llenos, se utilizan restricciones de programación entera mixta, como se ilustra a continuación:

$$x_t(i) \leq v_{t+1}(i) / \overline{v}_t(i) \qquad \text{para } i = 1, \ldots, I \qquad (4.1a)$$

$$s_t(i) \leq M \times x_t(i) \qquad \text{para } i = 1, \ldots, I \qquad (4.1b)$$

donde:

i	índice de las centrales hidroeléctricas		
I	número de centrales hidroeléctricas		
$x_t(i)$	variable de decisión de la planta i en la etapa t	$0-1$	V
$s_t(i)$	volumen vertido de la planta i en la etapa t	hm^3	V
M	una constante de grande valor (representa "infinito")	hm^3	D
$v_{t+1}(i)$	almacenamiento final de la planta i en la etapa t	hm^3	V
$\overline{v}_t(i)$	almacenamiento máximo de la planta i en la etapa t	hm^3	D

4.2 Restricciones de seguridad en los embalses – volúmenes de alerta

El objetivo de restricciones de volumen de alerta es penalizar el almacenamiento cuando si encuentra en situaciones debajo de un nivel de seguridad. Este tipo de restricciones se utiliza, por ejemplo, en el sistema de Colombia.

$$v_t(i) + \delta a_t(i) \geq \underline{va}_t(i) \qquad \text{para } i = 1, \ldots, I \qquad (4.2)$$

donde:

$\underline{va}_t(i)$	volumen de alerta de la central i en la etapa t	hm^3	D
$\delta a_t(i)$	violación del volumen de alerta de la central i en la etapa t	hm^3	V

Esta variable de holgura entra en la función objetivo con un coeficiente de penalidad ($\$/hm^3$) que debe ser informado por el usuario o puede ser calculado automáticamente por el modelo como siendo:

1.1 × [Costo de la térmica más cara ($\$/MWh$)] × [Suma de los coeficientes de producción del embalse y de las centrales aguas abajo del embalse]

Por la expresión anterior se concluye que el costo para usar el volumen de alerta es más alto que el costo de utilizar la térmica más cara del sistema. Consecuentemente, el volumen de alerta solo se utilizará cuando todas las plantas térmicas del sistema están generando su capacidad.

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación GO6AFF191FB3870
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

4.3 Restricciones de seguridad en los embalses – volúmenes mínimos operativos

La curva de volumen mínimo operativo representa una reserva operativa "estratégica", más importante que el volumen de alerta.

$$v_t(i) + \delta m_t(i) \geq \underline{vm}_t(i) \qquad \text{para } i = 1, \ldots, I \qquad (4.3)$$

donde:

$\underline{vm}_t(i)$	volumen mínimo operativo de la central i, etapa t	hm^3	D
$\delta m_t(i)$	violación del volumen mínimo operativo de la central i en la etapa t	hm^3	V

Esta variable de holgura entra en la función objetivo con un coeficiente de penalidad ($\$/hm^3$) que debe ser informado por el usuario o puede ser calculado automáticamente por el modelo como siendo:

1.1 × [Costo de Racionamiento ($\$/MWh$)] × [Suma de los coeficientes de producción del embalse y de las centrales aguas abajo del embalse]

En otras palabras esta restricción no será atendida únicamente si es físicamente imposible, por ejemplo, si el menor valor de la curva aumenta de una etapa para otra y el caudal no es suficiente para llenar el embalse hasta el nuevo nivel.

4.4 Restricciones de seguridad en los embalses – volúmenes máximos operativos

La curva de volumen máximo operativo representa el máximo nivel aceptable para la operación del embalse.

$$v_t(i) + \delta m_t(i) \geq \overline{vm}_t(i) \qquad \text{para } i = 1, \ldots, I \qquad (4.4)$$

donde:

$\overline{vm}_t(i)$	volumen máximo operativo de la central i, etapa t	hm^3	D
$\delta m_t(i)$	violación del volumen máximo operativo de la central i en la etapa t	hm^3	V

Esta variable de holgura entra en la función objetivo con un coeficiente de penalidad ($\$/hm^3$) que debe ser informado por el usuario o puede ser calculado automáticamente por el modelo como siendo:

1.1 × [Costo de Racionamiento ($\$/MWh$)] × [Suma de los coeficientes de producción del embalse y de las centrales aguas abajo del embalse]

En otras palabras esta restricción no será atendida únicamente si es físicamente imposible.

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

4.5 Restricciones de seguridad en los embalses – volúmenes de espera

La curva de volúmenes de espera representa restricciones en el volumen almacenado en el embalse para control de inundaciones. Estas restricciones son modeladas de la siguiente manera:

$$v_t(i) \leq Min\,(\overline{v}_t(i), \underline{ve}_t(i)) \quad \text{para } i = 1, \ldots, I \qquad (4.5)$$

donde:

$\underline{ve}_t(i)$	volumen de espera de la central i, etapa t	hm^3	D

4.6 Restricciones en el desfogue total

Las restricciones en el desfogue total de una central hidroeléctrica representan restricciones de navegación en el caso del desfogue total mínimo y en el caso del desfogue total máximo sirven para evitar daños aguas abajo en el caso de crecidas.

$$\underline{\Delta}_t(i) \leq u_{tk}(i) + s_{tk}(i) + \delta_{1t}(i) - \delta_{2t}(i) \leq \overline{\Delta}_t(i) \qquad (4.6)$$
$$\text{para } i = 1, \ldots, I;\ k = 1, \ldots, K$$

donde:

$\underline{\Delta}_t(i)$	desfogue total mínimo de la central i en la etapa t	hm^3	D
$\overline{\Delta}_t(i)$	desfogue total máximo de la central i en la etapa t	hm^3	D
$\delta_{1t}(i)$	violación del desfogue mínimo de la central i en la etapa t	hm^3	V
$\delta_{2t}(i)$	violación del desfogue máximo de la central i en la etapa t	hm^3	V

Las variables que representan las violaciones de las restricciones de desfogue entran en la función objetivo con un coeficiente de penalidad ($\$/hm^3$). Los valores de penalidad por violación del desfogue total (mínimo o máximo) deben ser informados por el usuario.

4.7 Restricciones de regulación en centrales de pasada

La mayoría de las centrales de pasada tienen pequeños embalses que permiten por lo menos una regulación diaria, es decir, el volumen afluente que llega en la hora fuera de la punta puede ser almacenados para ser turbinado en la hora de punta. En el caso de embalses muy pequeños es posible limitar esta transferencia a través de la siguiente restricción:

$$u_{tk}(i) + s_{tk}(i) \geq \phi(i) \times \left[a_t(i) \times h(k) + \sum_{m \in I_U(i)} u_{tk}(m) + \sum_{m \in I_S(i)} s_{tk}(m)\right] \qquad (4.7)$$
$$\text{para } i = 1, \ldots, I;\ k = 1, \ldots, K$$

donde:

$\phi(i)$	factor de regulación de la central de pasada i	p.u.	D

Si el factor de regulación $\phi(i) = 1$ significa que 100% del volumen lateral afluente en el escalón k (suma de la afluencia incremental y de los desfogues de las centrales aguas arriba) debe ser

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

usado en el mismo escalón, es decir, no existe transferencia de energía entre los escalones, se trata de una central de pasada *pura*. Caso el factor de regulación $\phi(i) = 0$ significa que se puede transferir 100% del volumen afluente para producción de energía en cualquier otro escalón. Valores intermediarios para $\phi(i)$, entre 0 y 1, reflejan una capacidad parcial de regulación de los caudales entre los escalones.

4.8 Riego

Cuando se representan riegos, se modifica la ecuación de balance hídrico de las centrales con riego para considerar una constante $r(i)$ (que corresponde a los valores especificados para el riego) y una variable de decisión $\delta r(i)$ para representar la violación del riego especificado, como ilustrado a continuación:

$$v_{t+1}(i) = v_t(i) + a_t(i) - \varepsilon(v_t(i)) - \sum_{k=1}^{K}[u_{tk}(i) + s_{tk}(i) + \phi_{tk}(i)] \qquad (4.8)$$
$$-r_t(i) + \delta r_t(i) + \sum_{k=1}^{K}\left(\sum_{m\in I_U(i)} u_{tk}(m) + \sum_{m\in I_S(i)} s_{tk}(m) + \sum_{m\in I_F(i)} \phi_{tk}(m)\right)$$
$$\text{para } i = 1, \ldots, I$$

donde:

$r_t(i)$	volumen retirado de la central i (riego) en la etapa t	hm^3	V
$\delta r_t(i)$	violación del riego de la central i en la etapa t	hm^3	V

La variable de holgura que representa la violación del riego $\delta r(i)$ tendrá sus límites establecidos por el propio valor del riego como:

$$\delta r_t(i) \leq r_t(i) \qquad \text{para } i = 1, \ldots, I \qquad (4.9)$$

La función objetivo penaliza estas variables de holgura (violación de riego) de acuerdo con el tipo del modelo de riego establecido por el usuario:

1. Riego es prioritario a la producción de energía:

$$\mu_r(i) = 1.1 \times costo\ de\ déficit \times [\sum_{m\in J(i)} \rho(v_t(m)) \times \delta r_t(m)]$$

donde:

$J(i)$	conjunto de plantas aguas abajo de la planta i	D

2. La producción de energía es prioritaria al riego:

$$\mu_r(i) = 1.1 \times costo\ operativo\ de\ la\ térmica\ más\ cara \times [\sum_{m\in J(i)} \rho(v_t(m)) \times \delta r_t(m)]$$

3. Valor de penalidad informado por el usuario:

$$\mu_r(i) = C_{ri} \times \delta r_t(m)$$

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

donde:

C_{ri}	costo fijo proporcionado por el usuario	$k\$/hm^3$	D

4.9 Modelo de volumen muerto

El proceso de llenado de un embalse hasta que el volumen embalsado alcance el nivel mínimo (conocido como "volumen muerto") tiene efecto sobre la operación tanto de plantes que están aguas arriaba como también de plantas ubicadas aguas debajo de la central en proceso de llenado del volumen muerto. Para representar el llenado del volumen muerto se utiliza curva creciente para el almacenamiento mínimo (sección 4.3) como ilustrado por la Figura 4.1 a continuación.

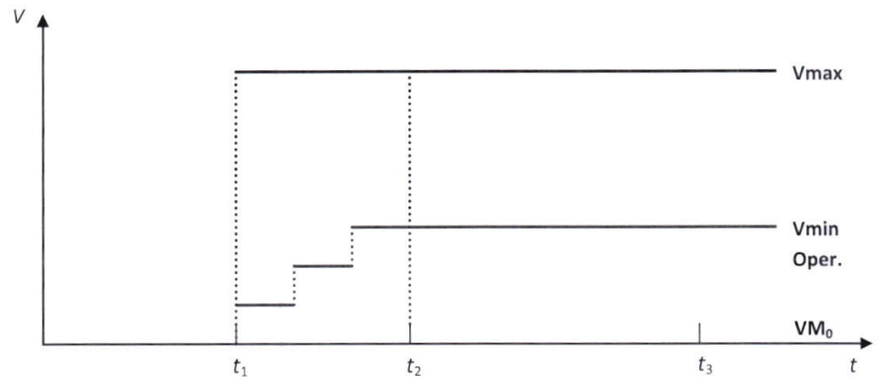


Figura 4.1 – Modelaje del llenado del volumen muerto de una central hidroeléctrica

donde:

t	etapa del estudio		D
t_1	la etapa inicial del período definido para completar el volumen muerto		D
t_2	el número de etapas para completar el volumen muerto		D
t_3	la etapa final del período definido para completar el volumen muerto, $t_2 = t_1 + N$		D
N	la etapa de entrada en operación		D
VM_0	condición del embalse en la primera etapa del período definido para completar el volumen muerto	p.u.	D
V_{max}	volumen máximo del embalse de los datos de configuración hidroeléctrica	hm^3	D
V_{min}	volumen mínimo del embalse de los datos de configuración hidroeléctrica	hm^3	D
Q_{max}	Turbinamiento máximo de los datos de configuración hidroeléctrica	m^3/s	D

En este modelo se observan las siguientes variaciones en el tiempo:

- Antes de t_1 la planta es futura, o sea, no produce energía;

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

- El volumen mínimo, para aquellas plantas que tienen período definido para completar el volumen muerto, no puede ser una restricción dura porque esto puede provocar inviabilidad a partir del período ($t_1 \leq t$) definido para completar el volumen muerto. El volumen mínimo será definido igual a cero y su volumen mínimo real será representado como un volumen mínimo operativo penalizado en la función objetivo;
- El proceso para completar el volumen muerto ($t_1 \leq t \leq t_2$) será realizado a través de una función lineal y creciente por bloques representada por el volumen mínimo operativo y penalizada como 1.1 × costo de déficit. En este período la planta deja de ser futura solamente para efecto de completar el volumen muerto pero no entra efectivamente en operación;
- A partir de $t \geq t_2$, la planta comienza a contribuir para la energía almacenada y energía almacenable máxima, a pesar de no estar en operación. La contribución para el cálculo de las energías debe ser solamente la debida al volumen del embalse. La productibilidad de esta planta no debe ser acumulada para uso en el cálculo de la energía almacenada. El volumen mínimo operativo será utilizado para calcular el volumen útil de la planta;
- De t_3 en adelante, la planta entra efectivamente en operación.

La Tabla 4.1 presenta un sumario de cómo se representan las variables durante el período de llenado del volumen muerto.

Tabla 4.1 – Parámetros para el proceso de llenado del volumen muerto

Variable/Período	$t < t_1$	$t_1 \leq t < t_2$ ($k = 1 \ldots N-1$)	$t_2 \leq t < t_3$	$t_3 \leq t$
Factor de producción	Constante	Constante	Constante	Constante
Volumen mínimo	VM0	VM0	VM0	VM0
Volumen máximo	0	Vmax	Vmax	Vmax
Volumen mínimo operativo	0	VM0 + (Vmin-VM0) × (k+1)/N	Vmin	Vmin
Turbinamiento Máximo	0	0	0	Qmax
Energía Almacenada y Almacenable Máxima	0	0	Contabiliza solamente la contribución de la propia planta.	Contabiliza toda la cascada.

4.10 Canal de desfogue

La altura del canal de desfogue varía en función del desfogue total y esta dependencia influencia el cálculo del factor de producción, dado por:

$$\rho = \Delta h \times g \times \eta \qquad (4.10)$$

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación GO6AFF191FB3870
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

donde la diferencia de alturas está definida como:

$$\Delta h = h(v) - h(u+s) \tag{4.11}$$

donde:

v	volumen almacenado en el embalse
u	volumen turbinado
s	volumen vertido
$h(v)$	cota del embalse
$h(u+s)$	cota del canal de desfogue

Suponga que $h(v)$ es constante o calculado a priori en función del volumen del embalse. Suponga también que se informa una tabla (h_i, d_i) que contiene la información de la cota del canal de desfogue función del desfogue total de la central. Por lo tanto, se puede considerar h_i la cota del canal de desfogue como representado en la Figura 4.2.

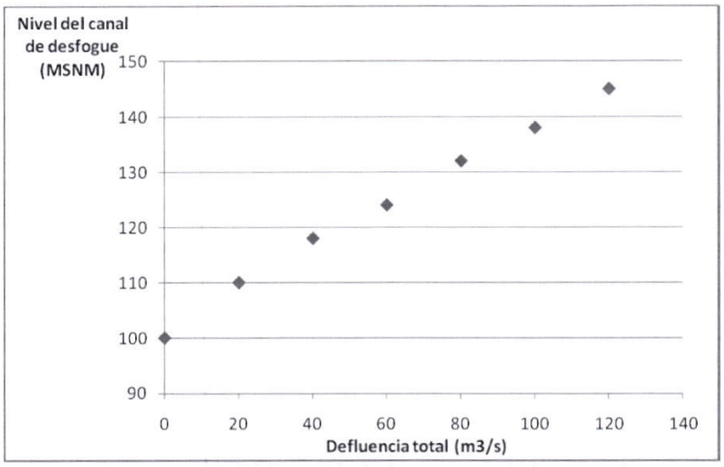


Figura 4.2 – Nivel del canal de desfogue versus desfogue total

A partir de estos cinco intervalos es posible definir los siguientes valores para Δh:

$$\Delta h_i = h(v) - h_i \qquad \text{para } d_i \leq d \leq d_{i+1} \tag{4.12}$$

Por lo tanto tendremos un factor de producción para cada intervalo:

$$\rho_i(d) = \Delta h_i \times g \times \eta \quad \text{para } d_i \leq d \leq d_{i+1} \tag{4.13}$$

Finalmente la generación hidroeléctrica para cada segmento estará dada por:

$$E_i = \rho_i(d) \times u \qquad \text{para } d_i \leq d \leq d_{i+1} \tag{4.14}$$

La construcción de la curva a continuación se hace a partir de la siguiente tabla:

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPUBLICA DE PANAMA AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PUBLICOS

Tabla 4.2 – Cota del canal de desfogue versus desfogue total

Desfogue total (m3/s)	Cota del canal de desfogue (MSNM)	Factor de producción (MW/m3/s)	Turbinamiento (m3/s)	Generación (MW)
0	100	1.962	0	0.00
20	110	1.766	20	35.32
40	118	1.609	40	64.35
60	124	1.491	60	89.47
80	132	1.334	80	106.73
100	138	1.216	80	97.32
120	145	1.079	80	86.33

Para desfogues totales mayores que el turbinamiento máximo, la generación total va disminuir en función de la altura del canal de desfogue que aumenta con el vertimiento y por lo tanto disminuye el factor de producción.

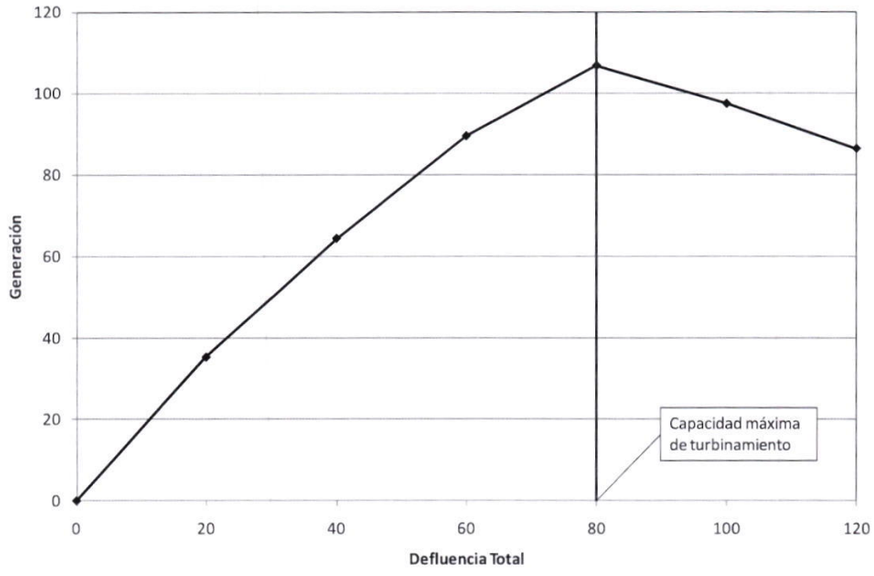


Figura 4.3 – Potencia generada × desfogue

Asociado a cada uno de los segmentos i se define una recta dada por:

$$a_i\,(u+s)\;+\;bi \qquad (4.15)$$

donde:

$$a_i = (g_{i+1} - g_i)/(d_{i+1} - d_i) \qquad \text{y} \qquad b_i = g_{i+1} - a_i\, d_{i+1}$$

y por lo tanto la variación de la generación hidroeléctrica en función de la altura del canal de desfogue puede ser representada a través del siguiente conjunto de restricciones:

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPUBLICA DE PANAMA AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PUBLICOS

$$E_h \leq a_i\,(u + s) + bi \qquad (4.16a)$$

$$u \leq \overline{u} \qquad (4.16b)$$

4.11 Generación en función de la afluencia

Para plantas filo de agua, el turbinamiento es igual a la afluencia total. La utilización de caudales promedio (mensuales o semanales) puede súper-estimar la generación de estas plantas. Una alternativa para modelar la generación de plantas filo de agua de manera más adecuada es definir una tabla que relaciona el caudal turbinable dado el caudal total. Por ejemplo:

Tabla 4.3 – Turbinamiento versus caudal afluente

Caudal total (m^3/s)	Caudal turbinable (m^3/s)
$a_t \leq 10$	10
$10 < a_t \leq 20$	19
$20 < a_t \leq 30$	28
$30 < a_t \leq 40$	36
$40 < a_t \leq 50$	38

Una manera de corregir esta sobre-estimativa seria ajustar el factor de producción de la central por un factor que represente que la producción de energía depende del caudal afluente total. Suponga el siguiente ajuste para una central con factor de producción de 1.2 $MW/m^3/s$:

Tabla 4.4 – Factor de Producción

Caudal total (m3/s)	Caudal turbinable (m3/s)	Ajuste de factor de producción	Factor de producción resultante
$a_t \leq 10$	10	1.00	1.20
$10 < a_t \leq 20$	19	0.95	1.14
$20 < a_t \leq 30$	28	0.93	1.12
$30 < a_t \leq 40$	36	0.90	1.08
$40 < a_t \leq 50$	38	0.76	0.91

La generación hidroeléctrica, representada por la variable E_h para cada intervalo es dada por el producto del factor de producción resultante multiplicado por el caudal total, limitada por la capacidad de turbinamiento de la planta.

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

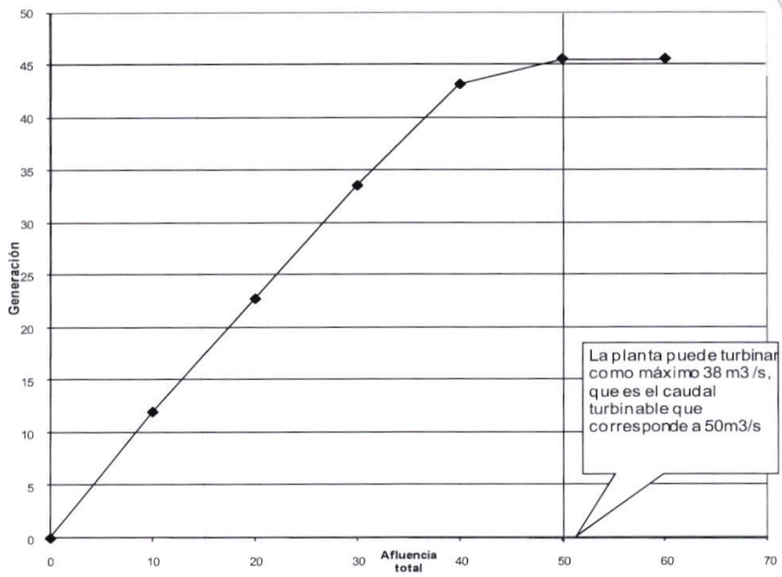


Figura 4.4 – Factor de producción × caudal afluente de plantas filo de agua

Asociado a cada uno de los segmentos i se define una recta dada por:

$$\phi_i\,(u+s)\;+\;\theta_i \tag{4.17}$$

Donde utilizando los puntos extremos (a_i, g_i) y (a_{i+1}, g_{i+1}), se obtiene:

$$\phi_i\;=(g_{i+1}-g_i)/(a_{i+1}-a_i) \qquad \text{y} \qquad \theta_i\;=\;g_{i+1}-\phi_i\,a_{i+1}$$

y por lo tanto la variación de la generación hidroeléctrica en función de la afluencia total puede ser representada a través del siguiente conjunto de restricciones:

$$E_h \le \phi_i\,(u+s)\;+\;\theta_i \quad \text{para } i\;=\;1,\ldots,\textit{Número de segmentos} \tag{4.18a}$$

$$u\;\le\;\overline{u} \tag{4.18b}$$

4.12 Curva de aversión a riesgo

La Curva de Aversión a Riesgo (CAR) se representa en el modelo SDDP por sistema a través de la siguiente restricción:

$$\sum_{i\in N_r}\sum_{j\in J_i}(\rho(v_t(j))\times(v_{t+1}(j)-\underline{v}_t(j))\times f_{vutil}(j)\;+\;\delta_t\;\ge \tag{4.19}$$
$$f_{ea}\;\times\sum_{i\in N_r}\sum_{j\in J_i}(\overline{\rho}(j)\times(\overline{v}_t(j)-\underline{v}_t(j))\times f_{vutil}(j)$$

donde:

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPUBLICA DE PANAMA AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PUBLICOS

i, j	índices para los embalses		
N_r	número de embalses del sistema		
J_i	conjunto de plantas hidroeléctricas aguas abajo de la planta i		
$\rho(v_t(j)$	coeficiente de producción para cálculo de la energía almacenada de la CAR, de la planta j en la etapa t, calculado en función del volumen del embalse	MWh/hm^3	V
$\overline{\rho}(j)$	coeficiente de producción promedio para cálculo de la energía almacenable máxima, de la planta j	MWh/hm^3	D
$v_{t+1}(j)$	almacenamiento final de j en la etapa t	hm^3	V
$\underline{v}_t(j)$	almacenamiento mínimo de j en la etapa t	hm^3	D
$\overline{v}_t(j)$	almacenamiento máximo de j en la etapa t	hm^3	D
$f_{vutil}(j)$	factor de participación del volumen de la planta j en el sistema	$p.u$	D
δ_t	variable de holgura asociada a la restricción de la curva de aversión a riesgo en la etapa t	MWh	V
f_{ea}	factor de la curva de aversión a riesgo	$p.u$	D

La variable de holgura entra en la función objetivo con un coeficiente de penalidad expresado en $/MWh. Ella indica cual es el recurso más caro que se desea utilizar para evitar la violación del nivel de almacenaje establecido por la Curva de Aversión a Riesgo. El usuario puede seleccionar el tipo de penalización que desea asociar a la violación de la Curva de Aversión a Riesgo. Las siguientes dos posibilidades están disponibles en el programa.

- Penalidad de referencia: corresponde a un valor constante, informado por el usuario o calculado automáticamente por el modelo. Es la opción padrón (*1.1 × Costo de la térmica más cara*) determina que esta restricción no será atendida únicamente con la finalidad de evitar un racionamiento en el sistema.
- Penalidad reducida: corresponde a un valor de penalidad calculado automáticamente en función del valor del agua para cada etapa y escenario hidrológico.

En la recursión backward existen dos opciones adicionales para corrección del factor de penalización. En la primera se determina la penalización reducida para el primer escenario condicionado (abertura) de cada serie y se asume que este valor es una buena aproximación para las aberturas restantes. En la segunda opción, el programa determina una penalización reducida individualizada para cada escenario condicionado.

4.13 Energía de alerta para un conjunto de embalses

La siguiente restricción determina una cantidad mínima de energía de alerta a ser atendida por un conjunto de embalses.

$$\sum_{i \in U_r} \rho(v_t(i)) \times v_t(i) + \delta a_t(r) \geq \underline{ea}_t(r) \qquad (4.20)$$

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPUBLICA DE PANAMA AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PUBLICOS

para $r = 1, \ldots, R_a$

donde

R_a	conjunto de restricciones de energía de alerta		
U_r	conjunto de embalses para la restricción de energía de alerta r		
$\delta a_t(r)$	violación da energía de alerta r en la etapa t	MWh	V
$\underline{ea}_t(r)$	energía de alerta r en la etapa t	MWh	D

La variable de holgura que representa la violación de las restricciones de energía de alerta es considerada en la función objetivo, multiplicada por un coeficiente de penalidad ($\$/MWh$), informado por el usuario o calculado automáticamente por el modelo como:

$$\mu_r(i) = 1.1 \times costo\ de\ la\ térmica\ más\ cara$$

4.14 Energía mínima de seguridad para un conjunto de embalses

La siguiente restricción determina una cantidad mínima de energía de seguridad a ser atendida por un conjunto de embalses.

$$\sum_{i \in U_r} \rho(v_t(i)) \times v_t(i) + \delta m_t(r) \geq \underline{em}_t(r) \qquad (4.21)$$

para $r = 1, \ldots, R_s$

donde

R_s	conjunto de restricciones de energía de seguridad		
U_r	conjunto de embalses para la restricción de energía de seguridad r		
$\delta m_t(r)$	violación de la energía de seguridad r en la etapa t	MWh	V
$\underline{ea}_t(r)$	energía de seguridad r en la etapa t	MWh	D

La variable de holgura que representa la violación de las restricciones de energía de seguridad es considerada en la función objetivo, multiplicada por un coeficiente de penalidad ($\$/MWh$), informado por el usuario o calculado automáticamente por el modelo como:

$$\mu_r(i) = 1.1 \times costo\ de\ déficit$$

4.15 Energía de espera para un conjunto de embalses

La siguiente restricción determina una cantidad máxima de energía de espera a ser atendida por un conjunto de embalses.

$$\sum_{i \in U_r} \rho(v_t(i)) \times v_t(i) \leq \overline{ee}_t(r) \qquad (4.22)$$

para $r = 1, \ldots, R_e$

donde

R_e	conjunto de restricciones de energía de espera		

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

564

U_r	conjunto de embalses para la restricción de energía de espera r	
$\overline{ee}_t(r)$	energía de espera r en la etapa t	MWh

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

565

5 RESTRICCIONES OPERATIVAS ADICIONALES – PLANTAS TÉRMICAS

5.1 Centrales térmicas con costos lineales por parte

El factor de consumo de centrales térmicas (en unidades de combustible/MWh) se representa variable hasta un máximo de tres valores de acuerdo al despacho de la central, como se muestra en la Figura 5.1 a continuación.

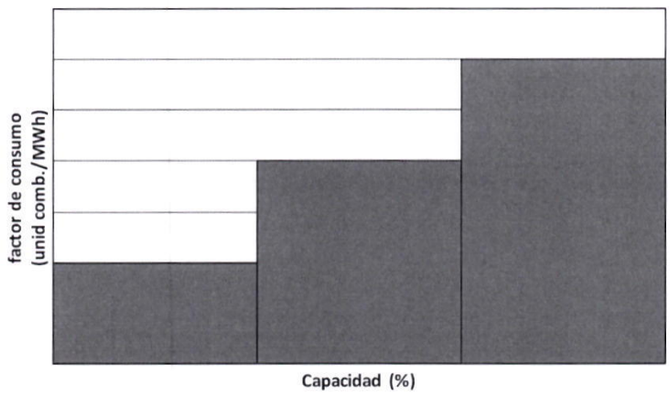


Figura 5.1 – Factor de consumo en función de la producción de la central térmica

En este caso el costo operativo de la central térmica resulta en una función lineal por partes, como ilustrado en la Figura 5.2.

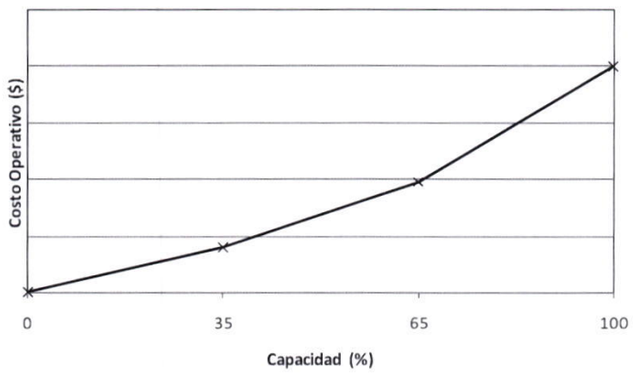


Figura 5.2 – Costo operativo térmico por una función lineal por partes

Se observa que los costos operativos unitarios son no decrecientes. Internamente, este tipo de central se representa con tres variables de generación térmica, cada una con un costo unitario de $c(j,h)$ \$/MWh,para$h = 1,2,3$. Estas variables tienen los siguientes límites operativos:

$$0 \leq g_{tk}(j,h) \leq \sigma(j,h) \times \overline{g}_{tk}(j) \text{ para } j = 1,\dots,J;\ h = 1,2,3;\ k = 1,\dots,K \quad (5.1)$$

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

donde:

$c(j,h)$	costo unitario de la térmica j en el tramo h		D
$g_{tk}(j,h)$	generación de la central térmica j en el tramo h	MWh	V
$\sigma(j,h)$	factor de participación del tramo h en la capacidad total	$p.u$	D

La generación total de la central en la etapa t, escalón k, es, por lo tanto, calculada como la suma de las variables generación de cada tramo:

$$g_{tk}(j) = \sum_{h=1}^{3} g_{tk}(j,h) \qquad \text{para } j = 1,\dots,J;\ k = 1,\dots,K \qquad (5.2)$$

De forma similar, en la función objetivo del problema de despacho el costo de producción de la térmica se calculará por:

$$\sum_{h=1}^{3} c(j,h) \times g_{tk}(j,h) \qquad \text{para } j = 1,\dots,J;\ k = 1,\dots,K \qquad (5.3)$$

Cabe observar que si para la central térmica j se representan restricciones de generación mínima mayores que cero, las restricciones de límite operativo se escriben de la siguiente forma:

$$Min\left\{\underline{g}_{tk}(j) - \sum_{i<h} \sigma(j,i) \times \overline{g}_{tk}(j);\ \sigma(j,h) \times \overline{g}_{tk}(j)\right\} \leq$$
$$g_{tk}(j,h) \leq \sigma(j,h) \times \overline{g}_{tk}(j) \qquad (5.4)$$
$$\text{para } j = 1,\dots,J;\ h = 1,2,3,\ k = 1,\dots,K$$

5.2 Centrales térmicas *must-run*

Estas centrales se caracterizan por tener que generar, de forma forzada, su capacidad máxima. En este caso las restricciones de límite de generación térmica para centrales para este tipo de central se substituyen por las siguientes restricciones:

$$g_{tk}(j) = \overline{g}_{tk}(j) \qquad \text{para } j = 1,\dots,J;\ k = 1,\dots,K \qquad (5.5)$$

5.3 Restricciones de generación mínima para grupos de centrales térmicas

Las restricciones de generación mínima son necesarias por ejemplo para aporte de reactivos. Cuando son individuales se representan como los límites inferiores de las variables de generación térmica3.9). Para grupos de centrales térmicas se representa la siguiente restricción:

$$\sum_{j \in J_r} g_{tk}(j) \geq \underline{G}_{tk}(r) \qquad \text{para } r = 1,\dots,R;\ k = 1,\dots,K \qquad (5.6)$$

donde:

r	índice de los grupos de centrales térmicas

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

R	número de grupos de centrales térmicas		
J_r	conjunto de térmicas que pertenecen al grupo r		
$\underline{G}_{tk}(r)$	generación mínima para el grupo r en la etapa t, escalón k	MWh	D

Observe que en la implementación de esta restricción existe la limitación de que cada unidad térmica sólo puede participar en una restricción de generación mínima.

5.4 Restricciones de generación

Estas restricciones son una generalización de las anteriores. Pueden combinar unidades hidroeléctricas y térmicas y pueden limitar su generación total inferior o superiormente. Además, cada generador hidroeléctrico o térmico puede participar en más de una restricción.

La expresión general es:

$$\underline{G}_{tk}(r) \leq \sum_{i \in I_r} g_{tk}(i) + \sum_{j \in J_r} g_{tk}(j) \leq \overline{G}_{tk}(r) \quad \text{para } r = 1, \ldots, R;\ k = 1, \ldots, K \qquad (5.7)$$

donde:

r	índice de las restricciones de generación		
R	número de restricciones de generación		
I_r	conjunto de hidroeléctricas que pertenecen a la restricción r		
J_r	conjunto de térmicas que pertenecen a la restricción r		
$\underline{G}_{tk}(r)$	Límite inferior de la restricción r en la etapa t, escalón k	MWh	D
$\overline{G}_{tk}(r)$	Límite superior de la restricción r en la etapa t, escalón k	MWh	D

5.5 Centrales térmicas multi-combustible

Una central térmica multi-combustible se representa como un grupo de centrales térmicas que comparten datos que son iguales, por ejemplo, generación mínima, factores de indisponibilidad y otros que son particulares al combustibles que está en uso, datos de consumo, costo operativo, generación máxima. De esta manera la variable de generación $g_{tk}(j)$ se substituye por un conjunto de variables $g_{tk}(j)$, cada una de ellas representando la parte de generación de la térmica j correspondiente a cada uno de los combustibles alternativos. Para representar la capacidad variable por los combustibles se define una variable $p_{tk}(i)$ que asume valores entre 0 y 1. La generación total de este grupo de plantas térmicas debe satisfacer la siguiente restricción:

$$g_{tk}(i) - \overline{g}_{tk}(j) \times p_{tk}(i) \leq 0 \quad \text{para } i \in M(j);\ j \in J \qquad (5.8a)$$

$$0 \leq \sum_{i \in M(j)} p_{tk}(i) \leq 1 \quad \text{para } j \in J \qquad (5.8b)$$

donde:

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

$M(j)$	conjunto de variables de generación térmica que representan la generación de cada combustibles en la central multi-combustible j		
$p_{tk}(i)$	parte de la capacidad utilizada para producción por el combustible i en la central térmica j		
J	Conjunto de térmicas multi-combustible		

De forma similar al caso en que los costos operativos se representan por una función lineal por partes, las generaciones variables asociadas a térmicas multi-combustibles son consideradas en las restricciones de una central térmica. Por ejemplo, caso la central j es multi-combustible y *must-run*, se modifica la ecuación (5.8a) para:

$$g_{tk}(i) - \overline{g}_{tk}(j) \times p_{tk}(i) \leq 0 \qquad \text{para } i \in M(j) \qquad (5.9)$$

Similarmente, la función objetivo de problema de despacho se modifica para:

$$\sum_{i \in M(j)} c(i) g_{tk}(i) \qquad \text{para } k = 1, \ldots, K \qquad (5.10)$$

donde:

$c(i)$	costo operativo de la térmica j considerando el combustible representado por la variable de generación $g_{tk}(i)$	$\$/MWh$	D

Se destaca que es posible combinar centrales térmicas multi-combustible con otros atributos de una central térmica, por ejemplo, costos operativos representados por una linear por partes y must-run.

5.6 Centrales térmicas tipo unit commitment

Las centrales térmicas tipo *commitment* representan aquellas para las cuales está asociado un costo de arranque. La decisión de despachar una central térmica de este tipo puede ser realizada para cada etapa o cada escalón de demanda dentro de la etapa. En ambos casos estas centrales se modelan usando variables de decisión entera (0/1). De esta forma la representación de este tipo de centrales requiere la utilización de algoritmos de programación entera mixta, lo que introduce una complicación de tipo computacional en el modelo. Si el número de estas centrales no es muy elevado este aspecto no es muy importante.

Si la decisión de despachar se realiza una vez en la etapa, los límites de generación se representan con las siguientes restricciones.

$$g_{tk}(j) - \overline{g}_{tk}(j) \times x_t(j) \leq 0 \qquad \text{para } j \in C;\ k = 1, \ldots, K \qquad (5.11a)$$

$$g_{tk}(j) - \underline{g}_{tk}(j) \times x_t(j) \geq 0 \qquad \text{para } j \in C;\ k = 1, \ldots, K \qquad (5.11b)$$

$$x_t(j) \in \{0,1\} \qquad \text{para } j \in C \qquad (5.11c)$$

donde:

C	conjunto de las centrales térmicas tipo *commitment*	$\$/MWh$	D

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

569

$x_t(j)$	decisión de despachar la central térmica j (variable entera 0/1) en la etapa t	$p.u$	V

Se incluye en la función objetivo la variable de decisión multiplicada por el costo de arranque correspondiente:

$$\sum_{j \in C} c_a(j) \times x_t(j) \tag{5.12}$$

donde:

$c_a(j)$	costo de arranque de la central térmica j	$k\$$	D

Si la decisión de despachar la central térmica se realiza a cada escalón, entonces las restricciones resultan:

$$g_{tk}(j) - \overline{g}_{tk}(j) \times x_{tk}(j) \leq 0 \quad \text{para } j \in C;\ k = 1, \ldots, K \tag{5.13a}$$

$$g_{tk}(j) - \underline{g}_{tk}(j) \times x_{tk}(j) \geq 0 \quad \text{para } j \in C;\ k = 1, \ldots, K \tag{5.13b}$$

$$x_{tk}(j) \in \{0,1\} \quad \text{para } j \in C;\ k = 1, \ldots, K \tag{5.13c}$$

y el término que debe ser incluido en la función objetivo es:

$$\sum_{j \in C} \sum_{j \in C} c_a(j) \times x_{tk}(j) \tag{5.14}$$

donde:

$x_{tk}(j)$	decisión de despachar la central térmica en el escalón k	$p.u$	V

5.7 Plantas térmicas con contrato de combustible

En un contrato Take or Pay (ToP), el generador "pre-compra" una dada cantidad de combustible, el cual puede ser utilizado durante todo el periodo de duración del contrato. En cada etapa, el generador decide el montante de combustible que será retirado de su "cuenta" de contrato. Este combustible puede ser utilizado para producir energía y/o ser almacenado en un reservorio físico de combustible para utilización futura. Al final del contrato, cualquier cantidad remaneciente de combustible en la "cuenta" es generalmente perdida. En algunos contratos ToP especiales, una fracción remaneciente puede ser transferida para el contrato siguiente. Finalmente, el generador puede también comprar combustible adicional del mercado spot, a precios mayores.

Los parámetros de un contrato de combustible ToP son la duración (número de etapas), los volúmenes mínimo y máximo y una tasa de disponibilidad. Como mencionado, el volumen mínimo de combustible es un valor pre-pago (valor ToP). De esta manera, cada contrato de suministro de combustible puede ser modelado por dos reservorios, uno representando el componente ToP, y el otro la posibilidad de comprar combustible adicional hasta su capacidad máxima. Un tercero reservorio es utilizado para representar el almacenamiento físico de combustible, cuando el mismo está disponible.

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación GO6AFF191FB3870
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

Los niveles de almacenaje de los reservorios de combustible formarán parte de las variables de estado del SDDP y serán incorporadas en el procedimiento de la etapa backward del algoritmo del SDDP, donde aproximaciones linearles de la función de costo futuro (FCF) son construidas.

Por simplicidad de notación, iremos ilustrar el modelo de contrato de combustible para el caso con solamente un contrato de combustible ToP, un reservorio físico de combustible y una única planta térmica. Los siguientes términos serán adicionados a la función objetivo.

$$\alpha_t(w_t, y_t, z_t) =$$

$$Min\{Cc \times (\sum_{k=1}^{K} fy_{tk}(j) + \sum_{k=1}^{K} fy_{tk}(r))\} - \alpha_{t+1}(w_{t+1}, y_{t+1}, z_{t+1}) \quad (5.15)$$

Observe que el montante fijo del contrato correspondiente a la parte ToP no es adicionado a la función objetivo porque él no afecta el proceso de optimización. Su contribución es adicionada separadamente en los informes de salida.

Las ecuaciones de balance para el contrato de combustible (ToP y compra adicional) se presentan a continuación:

$$w_{t+1} = w_t + aw_t - \sum_{k=1}^{K} fw_{tk}(j) - \sum_{k=1}^{K} fw_{tk}(r) - sw_t \quad (5.16)$$

$$0 \leq w_{t+1} \leq \overline{w} \quad (5.17)$$

$$y_{t+1} = y_t + ay_t - \sum_{k=1}^{K} fy_{tk}(j) - \sum_{k=1}^{K} fy_{tk}(r) - sy_t \quad (5.18)$$

$$0 \leq y_{t+1} \leq \overline{y} \quad (5.19)$$

El contrato tiene un límite de disponibilidad, por bloque.

$$0 \leq fw_{tk}(j) + fw_{tk}(r) + fy_{tk}(j) + fy_{tk}(r) \leq \overline{f}c_k \quad (5.20)$$

El reservorio físico de combustible es por su vez representado por el balance del reservorio y sus límites de inyección y de retirada.

$$z_{t+1} = z_t + \sum_{k=1}^{K} fw_{tk}(r) + \sum_{k=1}^{K} fy_{tk}(r) - \sum_{k=1}^{K} fz_{tk}(j) \quad (5.21)$$

$$\underline{y} \leq y_{t+1} \leq \overline{y} \quad (5.22)$$

$$0 \leq fw_{tk}(r) + fy_{tk}(r) \leq \overline{If}r_k \quad (5.23)$$

$$0 \leq fz_{tk}(j) \leq \overline{Rf}r_k \quad (5.24)$$

Finalmente, se representa el balance de combustible por planta térmica.

$$fw_{tk}(j) + fy_{tk}(j) + fz_{tk}(j) - \varphi(j) \times g_{tk}(j) = 0 \quad (5.25)$$

donde:

r	índice para el reservorio físico de combustible		
w_{t+1}	almacenaje final del reservorio del contrato, parcela ToP, al final de la etapa t	UC	V
$\overline{w}$	límite de almacenaje del reservorio ToP de combustible	UC	D
y_{t+1}	almacenaje final del reservorio adicional del contrato, al final de la etapa t	UC	V

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPUBLICA DE PANAMA AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PUBLICOS

$\overline{y}$	límite de almacenaje del reservorio adicional de combustible	UC	D
z_{t+1}	almacenaje final del reservorio de combustible al final de la etapa t	UC	V
$\underline{z}$	límite mínimo de almacenaje del reservorio físico de combustible	UC	D
$\overline{z}$	límite máximo de almacenaje del reservorio físico de combustible	UC	D
Cc	costo del contrato de combustible	\$/UC	D
$fw_{tk}(j)$	montante del contrato de combustible ToP consumido por la planta térmica j en la etapa t y en el bloque k	UC	V
$fw_{tk}(r)$	montante del contrato de combustible ToP almacenado en el reservorio físico del combustible r en la etapa t y en el bloque k	UC	V
$fy_{tk}(j)$	montante adicional del contrato de combustible consumido por la planta térmica j en la etapa t y en el bloque k	UC	V
$fy_{tk}(r)$	montante adicional del contrato de combustible almacenado en el reservorio físico de combustible r en la etapa t y en el bloque k	UC	V
aw_t	afluencia del contrato de combustible ToP. Este valor corresponde al montante total del ToP, siendo solamente diferente de cero al inicio y renovación del contrato.	UC	D
sw_t	vertimiento del contrato de combustible ToP	UC	V
ay_t	afluencia adicional del contrato de combustible. Este valor corresponde al montante adicional de contrato, siendo solamente diferente de cero al inicio y renovación del contrato.	UC	D
sy_t	vertimiento adicional del contrato de combustible	UC	V
$\overline{f}c_k$	disponibilidad del contrato de combustible en el bloque k	UC	D
$fz_{tk}(j)$	montante de almacenaje del reservorio físico de combustible consumido por la planta térmica j en la etapa t y en el bloque k	UC	V
$\overline{If}r_k$	inyección máxima en el reservorio físico de combustible en el bloque k	UC	D
$\overline{Rf}r_k$	retirada máxima del reservorio de combustible en el bloque k	UC	D

5.8 Límites en el consumo de combustible

La restricción representa límites en la disponibilidad de un combustible en la etapa:

$$\sum_{k=1}^{K}\left(\sum_{j\in\Phi_T(l)}\varphi(j)\times g_{tk}(j)+\sum_{j\in\Phi_{TC}(l)}\left(fw_{tk}(j)+fy_{tk}(j)\right)+\sum_{r\in\Phi_R(l)}\left(fw_{tk}(r)+fy_{tk}(r)\right)\right)\leq\overline{\Phi}_t(l) \qquad \text{para } l=1,\ldots,F \qquad (5.26)$$

donde:

l	índice de los combustibles
F	número de combustibles
$\Phi_T(l)$	conjunto de térmicas que utilizan el combustible l y no poseen contratos
$\Phi_{TC}(l)$	conjunto de térmicas que utilizan el combustible l y poseen contratos
$\Phi_R(l)$	conjunto de reservatorios que almacenan el combustible l
$\varphi(j)$	factor de consumo de la central j UC / MWh D

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

572

$\overline{\Phi}_t(l)$	disponibilidad del combustible de la central l en la etapa t	UC	D

5.9 Límites en la tasa de consumo de combustible

La restricción representa límites en la tasa de consumo de un combustible en la etapa, debido, por ejemplo, a la dimensión de un gaseoducto.

$$\sum_{j\in\Phi_T(l)} \varphi(j) \times g_{tk}(j) + \sum_{j\in\Phi_{TC}(l)} \left(fw_{tk}(j) + fy_{tk}(j)\right) + \sum_{r\in\Phi_R(l)} \left(fw_{tk}(r) + fy_{tk}(r)\right) \leq \tau_t(l) \times h(k) \quad \text{para } l = 1,\ldots,F;\ k = 1,\ldots,K \qquad (5.27)$$

donde:

l	índice de los combustibles		
F	número de combustibles		
$\Phi_T(l)$	conjunto de térmicas que utilizan el combustible l y no poseen contratos		
$\Phi_{TC}(l)$	conjunto de térmicas que utilizan el combustible l y poseen contratos		
$\Phi_R(l)$	conjunto de reservatorios que almacenan el combustible l		
$\varphi(j)$	factor de consumo de la central j	UC / MWh	D
$\tau_t(l)$	tasa máxima de consumo del combustible l en la etapa t	UC/hora	D
$h(k)$	duración del escalón k	horas	D

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

573

6 RESTRICCIONES OPERATIVAS ADICIONALES – RESERVA DE GENERACIÓN

6.1 Reserva rodante

La reserva rodante es un margen operativo dado en MW para cada etapa y escalón de demanda, para ajustar la operación en tiempo real a las desviaciones con respecto a la operación programada.

6.1.1 Reserva rodante para centrales hidroeléctricas

En el caso de centrales hidroeléctricas la reserva rodante se representa como un valor que se substrae de la máxima capacidad de la planta. En este caso la restricción de turbinamiento máximo resulta:

$$u_{tk}(i) \leq Min\left(\overline{u}_{tk}(i), \frac{\overline{g}_{tk}(i)}{\rho(v_t(i))}\right) - \frac{r_{tk}(i)}{\rho(v_t(i))} \qquad \text{para } i = 1,\dots,I;\ k = 1,\dots,K \quad (6.1)$$

donde:

$r_{tk}(i)$	reserva rodante de la central i, etapa t, escalón k	MW	D

6.1.2 Reserva rodante para centrales térmicas

En el caso de centrales térmicas la reserva rodante se representa a través de la siguiente restricción:

$$g_{tk}(j) \leq \overline{g}_{tk}(j) - r_{tk}(j) \qquad \text{para } j = 1,\dots,J;\ k = 1,\dots,K \quad (6.2)$$

donde:

$r_{tk}(j)$	reserva rodante de la central i, etapa t, escalón k	MW	D

Cabe observar que cuando la central térmica tiene una función de costos por tramos, la restricción resultante es:

$$\sum_{h=1}^{3} g_{tk}(j,h) \leq \overline{g}_{tk}(j) - r_{tk}(j) \qquad \text{para } j = 1,\dots,J;\ k = 1,\dots,K \quad (6.3)$$

6.2 Restricciones de reserva de generación

Estas restricciones de reserva de generación pueden combinar unidades hidroeléctricas y térmicas. Existen tres opciones de representación, cuya expresión es detallada a seguir:

1. La reserva de generación debe ser mayor o igual a un porcentaje de la demanda del sistema:

$$\sum_{i\in I(r)}(\overline{g}_{tk}(i) - g_{tk}(i)) + \sum_{j\in J(r)}(\overline{g}_{tk}(j) - g_{tk}(j)) \geq f(r) \times d_{tk} \quad (6.4)$$
$$\text{para } r = 1,\dots,R_1;\ k = 1,\dots,K$$

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación GO6AFF191FB3870
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

2. La reserva de generación compensa la salida de operación de cualquier unidad generadora del sistema que no pertenece al conjunto de reserva:

$$\sum_{i\in I(r)}(\overline{g}_{tk}(i) - g_{tk}(i)) + \sum_{j\in J(r)}(\overline{g}_{tk}(j) - g_{tk}(j)) \geq g_{tk}(s) \quad \text{para } s \notin I(r) \cup J(r) \quad (6.5)$$

$$\text{para } r = 1, \ldots, R_2;\ k = 1, \ldots, K$$

3. La reserva de generación compensa la salida de operación de cualquier unidad generadora del sistema que pertenece al conjunto de reserva.

$$\sum_{m\in I(r)\cup J(r)-s}(\overline{g}_{tk}(m) - g_{tk}(m)) \geq g_{tk}(s) \quad \text{para } s \in I(r) \cup J(r) \quad (6.6)$$

$$\text{para } r = 1, \ldots, R_3;\ k = 1, \ldots, K$$

donde:

r	índice de las restricciones de generación		
R_1	número de restricciones de generación tipo 1		
R_2	número de restricciones de generación tipo 2		
R_3	número de restricciones de generación tipo 3		
$I(r)$	conjunto de hidroeléctricas que pertenecen a la restricción t		
$J(r)$	conjunto de térmicas que pertenecen a la restricción r		
$f(r)$	factor de la demanda correspondiente a la restricción de reserva r	$p.u$	D
d_{tk}	demanda de la etapa t, escalón k	GWh	D

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

575

7 FUENTES DE ENERGIA RENOVABLE

El SDDP permite representar fuentes de energía renovable: centrales eólicas, pequeñas centrales hidroeléctricas, centrales de biomasa, etc. La representación adoptada en el SDDP presupone que el aporte de estas centrales es independiente de una etapa para la siguiente, i.e. la correlación serial es nula. Sin embargo, se preserva una característica importante que es la correlación espacial; por ejemplo, es posible representar la correlación espacial entre aportes en centrales eólicas en una misma región, donde las variaciones del viento son parecidas.

El usuario suministra escenarios estacionales de generación, que pueden ser registros históricos o generados por algún modelo externo. Antes de iniciar el proceso iterativo para cálculo de la política, el SDDP determina los escenarios que serán utilizados de la siguiente manera: para cada etapa t y para cada escenario de caudales condicionados s (abertura en la backward), se sortea un escenario de aporte de energía renovable entre los informados por el usuario para ese mes. Estos escenarios son utilizados en la fase backward.

En la fase de simulación forward se utilizan los mismos escenarios y si el número de series forward es mayor que el número de aberturas, se aplica un esquema de carrusel.

En el caso de una simulación separada, el modelo permite utilizar los mismos escenarios utilizados en la política o bien sortear directamente del archivo de escenarios del usuario. Para mayores detalles, referirse a los manuales de descripción de archivos y de usuario.

En el modelo matemático los aportes de las fuentes de energía renovable son descontados de la demanda, como mostrado a continuación:

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & cg + \alpha \\ & g + r = d' \\ & r \leq d' \end{aligned}$$

donde $d' = d - ER$, siendo ER la suma de los aportes de fuentes de energía renovable en el sistema en esa etapa y serie.

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

8 RED DE TRANSPORTE DE ENERGÍA

Existen dos diferentes formas para representar las restricciones de la red de transmisión: a través de un modelo de interconexiones, que se encuentra descripto en esta sección; o a través del modelo de flujo de potencia linealizado, que está descripto en la próxima sección.

8.1 Modelo de interconexión

El modelo de interconexiones representa los límites para cambios de energía entre sistemas vecinos. En este caso es necesario definir una ecuación de suministro de la demanda para cada sistema y modelar los límites para la transferencia de energía entre ellos:

La demanda del sistema es compuesta por partes elásticas e inelásticas. Todas las partes son opcionales, siendo que la demanda puede ser puramente inelástica, puramente elástica o una combinación de ambas.

$$d_{tk}(s) = \sum_{i \in In(s)} d^{i}_{tk}(s,i) + \sum_{e \in El(s)} \sum_{p \in P(s)} d^{e}_{tk}(s,e,p)$$

$$0 \le d^{e}_{tk}(s,l,p) \le \overline{d^{e}_{tk}}(s,l,p)$$

$$\text{para } s = 1,\dots,S;\ k = 1,\dots,K$$
$$l = 1,\dots,L(l);\ p = 1,\dots,P(p)$$

donde

s	índice dos sistemas o regiones		
S	número de sistemas		
i	índice de la parte inelástica de la demanda		
$In(s)$	números de demandas inelásticas del sistema s		
e	índice de la parte elástica de la demanda		
$El(s)$	números de demandas elásticas del sistema s		
p	índice del segmento de la parte elástica de la demanda		
$P(s)$	números de segmentos de la parte elástica de la demanda l		
$d_{tk}(s)$	demanda de energía en el sistema s en la etapa t, bloque k	MWh	V
$d^{i}_{tk}(s,i)$	demanda inelástica i de energía en el sistema s en la etapa t, bloque k	MWh	D
$d^{e}_{tk}(s,e,p)$	segmento p de la parte e de demanda elástica de energia en el sistema s en la etapa t, bloque k	MWh	V
$\overline{d^{e}_{tk}}(s,e,p)$	limite máximo del segmento p de la parte e de demanda elástica de energía en el sistema s en la etapa t, bloque k	MWh	D

La ecuación de suministro de la demanda es representada por:

$$\sum_{i \in I(s)} g_{tk}(i) + \sum_{j \in J(s)} g_{tk}(j) + \sum_{l \in \Omega(s)} \left(\omega_{tk}(l,s) - \omega_{tk}(s,l)\right) + r_{tk}(s) = d_{tk}(s) \qquad (8.1)$$

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación GO6AFF191FB3870
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

$$\omega_{tk}(l,s) \leq \overline{\omega}_{tk}(l,s)$$
$$0 \leq r_{tk}(s) \leq \sum_{i \in In(s)} d^{i}_{tk}(s,i)$$

para $s = 1,\ldots,S;\ k = 1,\ldots,K$

donde

s	índice dos sistemas o regiones		
S	número de sistemas		
$I(s)$	conjunto de plantas hidráulicas en el sistema s		
$J(s)$	conjunto de plantas térmicas en el sistema s		
$\Omega(s)$	conjunto de sistemas conectados al sistema s		
$\omega_{tk}(l,s)$	energía transferida del sistema l para el sistema s en la etapa t, bloque k	MWh	V
$\overline{\omega}_{tk}(l,s)$	capacidad de interconexión entre los sistemas l e s	MWh	D
$r_{tk}(s)$	déficit de energía en el sistema s en la etapa t, bloque k	MWh	V

La función objetivo considera un costo variable que depende del bloque, de la variable de interconexión, del costo de déficit de la parte inelástica de la demanda y del precio asociado a la parte elástica de la demanda, como se describe a seguir.

$$\text{Min}\ (\ \sum_{l \in \Omega(s)} \left(c(l,s) \times \omega_{tk}(l,s) + c(s,l) \times \omega_{tk}(s,l) \right) + cr(s) \times r_{tk}(s) - \sum_{e \in El(s)} \sum_{p \in P(s)} (c^{e}_{tk}(s,e,p) \times d^{e}_{tk}(s,e,p))\ ) \quad (8.2)$$

donde

$c(l,s)$	costo de transferencia de energía del sistema l para el sistema s	$\$/MWh$	D
$c(s,l)$	costo de transferencia de energía del sistema s para el sistema l	$\$/MWh$	D
$cr(s)$	costo de déficit de energía del sistema s	$\$/MWh$	D
$c^{e}_{tk}(s,e,p)$	precio máximo del segmento p de la parte elástica de la demanda e en el sistema s	$\$/MWh$	D

8.1.1 Restricción de suma de intercambios

Estas restricciones permiten representar límites mínimos y máximos para un conjunto de líneas de interconexión seleccionadas por el usuario. Representando k como el índice del escalón de carga y t como el índice de tiempo, ellas pueden ser representadas por:

$$\underline{I}_{tk}(si) \leq \sum_{m \in K(si)} I_{tk}(m,si) \leq \overline{I}_{tk}(si) \text{ para } si = 1,\ldots,N_{si};\ k = 1,\ldots,K \quad (8.3)$$

donde:

si	índice de la restricción de suma de intercambio		
N_{si}	número de restricciones de suma de intercambios		
$K(si)$	número de líneas de interconexión pertenecientes a la restricción de suma de intercambios si		
$I_{tk}(m,si)$	intercambio de la línea de interconexión m, en la etapa t, escalón k	MWh	V

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

$\underline{I}_{tk}(si)$	límite inferior de la restricción de suma de intercambios si, en la etapa t, escalón k	MWh	D
$\overline{I}_{tk}(si)$	límite superior de la restricción de suma de intercambios si, en la etapa t, escalón k	MWh	D

8.2 Modelo de flujo de potencia linealizado

El modelo de flujo de potencia activa linealizado se compone de dos conjuntos de ecuaciones, correspondientes a la primera y segunda leyes de Kirchhoff y a las restricciones de límite de flujo en los circuitos.

8.2.1 Primera ley de Kirchhoff

La primera ley representa la ecuación de balance de energía en cada nodo (con el objetivo de simplificar la notación suponemos que existe un único generador en cada nodo):

$$\sum_{m\in\Omega(n)} f(m) + g(n) = d(n) \qquad \text{para } n = 1,\dots,N \qquad (8.4)$$

donde:

n	índice de los nodos		
N	número de nodos		
$g(n)$	generación en el nodo n	MWh	V
$d(n)$	demanda en el nodo n	MWh	D
m	índice de los circuitos		
M	número de circuitos		
$f(m)$	flujo de potencia en el circuito m	MWh	V
$\Omega(n)$	conjunto de circuitos conectados directamente con el nodo n		

El conjunto de las ecuaciones (8.4) se escribe en forma matricial como:

$$-Sf + g = d \qquad (8.5)$$

donde:

S	Matriz de incidencia $N \times M$ que representa las conexiones nodo-circuito: la columna m de la matriz S contiene ceros en todas las posiciones excepto en las posiciones correspondientes a los nodos terminales del m-ésimo circuito, a saber, $n_F(m)$ y $n_T(m)$

$$S(:,m) = \begin{pmatrix} 0 \\ \cdots \\ +1 \\ \cdots \\ -1 \\ \cdots \\ 0 \end{pmatrix} \begin{matrix} \\ \\ \leftarrow nodo\ DE\ n_F(m) \\ \\ \leftarrow nodo\ PARA\ n_T(m) \\ \\ \\ \end{matrix}$$

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

f	vector M-dimensional de flujos en los circuitos
g	vector N-dimensional de generaciones
d	vector N-dimensional de demandas

8.2.2 Segunda ley de Kirchhoff

A su vez, la segunda ley de Kirchhoff establece que:

$$f(m) = \gamma(m)(\theta(n_F(m)) - \theta(n_T(m))) \text{ para } m = 1, \ldots, M \quad (8.6)$$

donde:

$\gamma(m)$	susceptancia del circuito m
$\theta(n_F(m)$	ángulo nodal en el nodo DE $n_F(m)$
$\theta(n_T(m))$	ángulo nodal en el nodo PARA $n_T(m)$

En términos matriciales, las ecuaciones, (8.6) son:

$$f = \gamma S' \theta \quad (8.7)$$

donde:

γ	matriz diagonal $M \times M$ que contiene las susceptancias de los circuitos
S'	matriz $M \times N$, matriz transpuesta de la matriz incidencia S
θ	vector N-dimensional de ángulos nodales

8.2.3 Límites en los flujos en los circuitos

$$-\overline{f} \leq f \leq \overline{f} \quad (8.8)$$

Donde $\overline{f}$ es el vector de capacidad de los circuitos.

8.2.4 Formulación compacta

Todas las restricciones de esta formulación (8.4) – (8.8) son lineales y pueden ser incluidas en el planteamiento del problema. Sin embargo, cabe observar que existen tres tipos de variables de decisión, correspondientes a los vectores θ y f (el vector de generación g ya está considerado en las ecuaciones básicas). En una red típica el número de generadores sería alrededor de 100, mientras que el número de barras y circuitos puede ser diez veces mayor. Ahora vamos a mostrar que el esfuerzo computacional puede ser reducido rescribiendo el problema únicamente en términos del vector de decisiones g.

Substituyendo f como fue definido en (8.7) en (8.5) resulta:

$$-B\theta + g = d \quad (8.9)$$

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPUBLICA DE PANAMA AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PUBLICOS 580

donde $B = S\gamma S'$ es una matriz $N \times N$ conocida como matriz susceptancia.

El sistema de ecuaciones lineales (8.9) puede ser resuelto en términos de θ calculando la matriz inversa de B, i.e. $\theta = -B^{-1}(d - g)$. Sin embargo, Se puede demostrar que el rango de la matriz B es $N - 1$. Por lo tanto, se necesita eliminar una fila y una columna de B – por ejemplo las correspondientes al nodo s – y escribir el sistema de ecuaciones como:

$$\tilde{\theta} = -\tilde{B}^{-1}(\tilde{d} - \tilde{g}) \tag{8.10}$$

donde ~ representa matrices y vectores sin el nodo s. El ángulo nodal para el nodo s, conocido como nodo de referencia, se define como $\theta_s = 0$. Para simplificar la notación escribimos la ecuación (8.10) en términos de los vectores completos de generación y demanda adicionando una línea y una columna nulas en la posición s de la matriz $\tilde{B}^{-1}$. Denotamos esta matriz resultante B^{-1} y se rescribe el sistema (8.10) en términos de los vectores originales:

$$\theta = -B^{-1}(d - g) \tag{8.11}$$

Remplazando (8.11) en (8.7), se obtiene:

$$f = \beta(d - g) \tag{8.12}$$

donde $\beta = -\gamma S B^{-1}$ es una matriz $M \times N$. Cada elemento β_{mn} representa la sensibilidad del flujo en el circuito m con respecto a una variación en la generación en el nodo n. Se observa que los factores de sensibilidad con respecto al nodo de referencia s son iguales a cero, es decir, una variación en la inyección en este nodo no afecta los flujos. La razón es que el valor de la generación en la barra de referencia se calcula implícitamente a partir del balance generación demanda de los otros nodos:

$$e'g = e'd \tag{8.13}$$

donde e es un vector unitario de dimensión N, es decir, $e' = (1, \cdots, 1)$

Las ecuaciones resultantes de la formulación compacta son:

$$e'g = e'd \tag{8.14}$$

$$g \leq \overline{g} \tag{8.15}$$

$$-\overline{f} \leq \beta(d - g) \leq \overline{f} \tag{8.16}$$

Las restricciones (8.14) y (8.15) ya están consideradas en la formulación pues corresponden al suministro de la demanda y límites para la generación. La nueva restricción que debe ser agregada al modelo es la (8.16). Escribiéndola en términos algébricos se obtiene:

$$-\overline{f}(m) \leq \sum_{n=1}^{N} \beta(m, N)(d(n) - g(n)) \leq \overline{f}(m) \quad \text{para } m = 1, \ldots, M \tag{8.17}$$

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

Rescribiendo para considerar la demanda para el lado derecho de la ecuación, agregando las informaciones de la etapa y del escalón de demanda, y relajando la consideración de que existe un generador para cada nodo se obtiene:

$$\sum_{i=1}^{I}\beta(m,N(i))g_{tk}(i)-\sum_{j=1}^{J}\beta\big(m,N(j)\big)g_{tk}(j)\geq-\overline{f}_{tk}(m)-\sum_{n=1}^{N}\beta(m,N)d_{tk}(n) \quad (8.18a)$$

$$-\sum_{i=1}^{I}\beta(m,N(i))g_{tk}(i)-\sum_{j=1}^{J}\beta\big(m,N(j)\big)g_{tk}(j)\leq\overline{f}_{tk}(m)-\sum_{n=1}^{N}\beta(m,N)d_{tk}(n) \quad (8.18b)$$

$$\text{para } m = 1,\dots,M, k = 1,\dots,K$$

donde:

i, j	índices para centrales hidros y térmicas en los conjuntos I y J		
$n(i), n(j)$	nodos asociados a las centrales hidros i y térmicas j		
$d_{tk}(n)$	demanda del nodo n en la etapa t, escalón k	MWh	D

8.2.5 Representación de los enlaces DC

De secciones anteriores se sabe que los flujos en los circuitos no son variables de decisión independientes porque deben ser formulados en función de los parámetros de la red de transmisión, de la generación y de la demanda.

Sin embargo, los flujos en los enlaces DC son se representan como variables de decisión independientes, dado que el flujo en ellos no está sujeto a la segunda Ley de Kirchhoff. Un flujo de γ MW en el enlace DC es representado como una generación *negativa* de γ MW en la barra DE n_F y una generación *positiva* de $(1-\eta)\gamma$ MW en la barra $PARA$ n_T, donde η es el factor de pérdida del enlace DC. Esta representación se incorpora a la ecuación de suministro a la demanda (8.14) y en las restricciones de flujo en los circuitos (8.16). En la ecuación de suministro a la demanda se tiene que:

$$\sum_{i=1}^{I}g_{tk}(i)+\sum_{j=1}^{J}g_{tk}(j)+\sum_{l=1}^{L}[(-\gamma_{tk}(l))+(1-\eta_l)\times\gamma_{tk}(l)]=d_{tk}$$

$$\text{para } k = 1,\dots,K \quad (8.19)$$

Resultando:

$$\sum_{i=1}^{I}g_{tk}(i)+\sum_{j=1}^{J}g_{tk}(j)-\sum_{l=1}^{L}\eta_l\times\gamma_{tk}(l)=d_{tk} \quad \text{para } k = 1,\dots,K \quad (8.20)$$

Las restricciones que representan el flujo en los circuitos deben ser modificadas de la siguiente manera:

$$-\overline{f}_{tk}(m)-\sum_{n=1}^{N}\beta(m,N)d_{tk}(i)\leq-\sum_{i=1}^{I}\beta\big(m,N(i)\big)g_{tk}(i)-\sum_{j=1}^{J}\beta\big(m,N(j)\big)g_{tk}(j)+$$

$$\sum_{l=1}^{L}\big[\beta\big(m,N_F(l)\big)\gamma_{tk}(l)-\beta\big(m,N_T(l)\big)(1-\eta_l)\times\gamma_{tk}(l)\big]\leq\overline{f}_{tk}(m)-\sum_{n=1}^{N}\beta(m,N)d_{tk}(i)$$

$$\text{para } k = 1,\dots,K \quad (8.21)$$

donde:

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPUBLICA DE PANAMA AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PUBLICOS

l	índice de los enlaces DC
L	número de enlaces DC
$N_F(l)$	nodo *DE* del enlace DC l
$N_T(l)$	nodo *PARA* del enlace DC l

Además los límites en los flujos del enlace DC se representan a través de las siguientes restricciones:

$$\gamma_{tk}(l) \leq \overline{\gamma}_{tk}(l) \qquad \text{for } l = 1, \ldots, L;\ k = 1, \ldots, K \qquad (8.22)$$

donde:

$\overline{\gamma}_{tk}(l)$	límite del enlace DC en el escalón k	MWh	D

8.2.6 Límites de importación y exportación entre áreas eléctricas

Estas restricciones permiten representar límites de importación y exportación entre áreas eléctricas. Dado que la importación o exportación de un área eléctrica está dada por la diferencia entre la generación y la demanda del área, se tiene que:

$$-\overline{I}_{tk}(a) \leq \sum_{i \in I(a)} g_{tk}(i) + \sum_{j \in J(a)} g_{tk}(j) - \sum_{n \in N(a)} d_{tk}(n) \leq \overline{E}_{tk}(a) \qquad (8.23)$$

$$\text{para } a = 1, \ldots, A;\ k = 1, \ldots, K$$

donde:

a	índice de las áreas		
A	número de áreas eléctricas		
$I(a)$	conjunto de centrales hidroeléctricas en el área a		
$J(a)$	conjunto de centrales térmicas en el área a		
$N(a)$	conjunto de nodos en el área a		
$\overline{I}_{tk}(a)$	límite de importación en el área a en la etapa t, escalón k	MWh	D
$\overline{E}_{tk}(a)$	límite de exportación en el área a en la etapa t, escalón k	MWh	D

Al rescribir las ecuaciones anteriores para representar la demanda en el lado derecho, se tiene:

$$-\overline{I}_{tk}(a) + \sum_{n \in N(a)} d_{tk}(n) \leq \sum_{i \in I(a)} g_{tk}(i) + \sum_{j \in J(a)} g_{tk}(j) \leq \overline{E}_{tk}(a) + \sum_{n \in N(a)} d_{tk}(n)$$

$$\text{para } a = 1, \ldots, A;\ k = 1, \ldots, K \qquad (8.24)$$

8.2.7 Restricción de suma de flujo en circuitos

Estas restricciones permiten representar límites mínimos y máximos para un conjunto de circuitos seleccionados por el usuario. Utilizando la misma notación de la sección 8.2.4, se tiene que:

$$\underline{F}(sc) \leq \sum_{m \in K(sc)} \alpha(m) \sum_{n=1}^{N} \beta(m, N)\,(d(n) - g(n)) \leq \overline{F}(sc)$$

$$\text{para } sc = 1, \ldots, N_{sc} \qquad (8.25)$$

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

donde:

sc	índice de la restricción de suma de flujo en circuito		
N_{sc}	número de circuitos pertenecientes a la restricción de suma de flujo en circuitos sc		
$K(sc)$	número de restricciones de suma de flujo en circuitos sc		
$\alpha(m)$	factor de participación del circuito m en la restricción de suma de flujo en circuitos sc		
$\underline{F}(sc)$	límite inferior de la restricción de suma de flujo en circuitos sc	MWh	D
$\overline{F}(sc)$	límite superior de la restricción de suma de flujo en circuitos sc	MWh	D

Siguiendo las notaciones de la formulación compacta de flujo en circuitos, siendo t el índice para la etapa, k para el escalón de demanda, se tiene el siguiente conjunto de restricciones:

$$\underline{F}_{tk}(sc) - \sum_{m \in K(sc)} \alpha(m) \sum_{n=1}^{N} \beta(m,N) d_{tk}(n) \leq -\sum_{m \in K(sc)} \sum_{i=1}^{I} \beta\big(m, N(i)\big) g_{tk}(i) - \sum_{m \in K(sc)} \sum_{j=1}^{J} \beta\big(m, N(j)\big) g_{tk}(j) \leq \overline{F}_{tk}(sc) - \sum_{m \in K(sc)} \alpha(m) \sum_{n=1}^{N} \beta(m,N) d_{tk}(n) \quad (8.26)$$

$$\text{para } sc = 1, \ldots, N_{sc};\ k = 1, \ldots, K$$

8.3 Representación de pérdidas

8.3.1 Modelo de pérdidas de transmisión

Las pérdidas de transmisión en cada circuito se representan por demandas adicionales en los nodos terminales del circuito, como se ilustra a continuación.

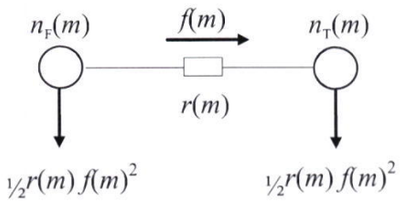


Figura 8.1 – Representación de las pérdidas en un circuito

donde $r(m)$ es la resistencia del circuito m. En términos matriciales, la primera ecuación del Kirchhoff se rescribe como:

$$Sf + g = d + \tfrac{1}{2} R|S| f^2 \quad (8.27)$$

donde:

R	matriz diagonal $M \times M$ con las resistencias de los circuitos
$\lvert S \rvert$	Valor absoluto de la matriz incidencia S, $N \times M$

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

584

8.3.2 Modelo de pérdidas

El modelo utilizado para representar la red de transmisión está basado en una formulación compacta, donde los flujos no son representados explícitamente en el problema. En esta formulación se utiliza un esquema de relajación para incluir los circuitos violados mediante restricciones que utilizan las líneas de la matriz β. Los coeficientes de esta matriz representan la sensibilidad de variación de los flujos con relación a variaciones en la inyección de potencia (generación o demanda).

Sin embargo, para la representación de las pérdidas, este modelo no es adecuado y fue adoptada una formulación donde las pérdidas son representadas explícitamente:

$$Min\ c'g \tag{4}$$

$$sujeito\ a:$$

$$B\theta + g - 1/2|S|p = d$$

$$-\bar{f} \le \gamma S'\theta \le \bar{f}$$

$$p_j \ge \hat{p}_j^k + 2r_j\hat{f}_j^k\left(\gamma_j\Delta\theta_j - \hat{f}_j^k\right) \quad \forall\, j = 1, \dots, M;\ \forall\, k = 1, \dots, K$$

Donde $B = S\gamma S'$. Este modelo tiene más variables que el modelo compacto, pues representa explícitamente los ángulos nodales y las pérdidas por circuito como variables del problema. Por otro lado, las restricciones tienen una estructura dispersa.

8.3.3 Estrategias de solución

Para la solución de este problema se adoptó una estrategia de relajación con criterios adaptativos para la inclusión de linealizaciones de pérdidas. Este método combina una estrategia de ajuste de los criterios para adición de linealizaciones en conjunto con la utilización de pérdidas fijas continuamente actualizadas para aquellos circuitos para los cuales todavía no fueron adicionadas linealizaciones.

La estrategia de ajuste de los criterios permite la adición gradual de las linealizaciones consideradas más importantes resultando en una reducción del número de restricciones adicionadas.. Por otro lado el uso de aproximaciones fijas de las pérdidas en los circuitos que todavía no fueron linealizados permite determinar soluciones más realistas en cada micro iteración. Cabe observar que la calidad de la solución no es afectada ya que las linealizaciones son adicionadas hasta que todos los criterios sean atendidos.

Inicialmente se resuelve el problema sin considerar las restricciones de límite de flujo ni las linealizaciones de pérdidas. La inclusión de las restricciones se hace a medidas en que las violaciones son detectadas.

8.3.3.1 Relajación de los límites de flujo en los circuitos

Después de resolver el problema se calculan los flujos como $f = \gamma S'\theta$ y se verifica la existencia de circuitos violados. En este caso, estas restricciones son adicionadas al problema que se

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

resuelve nuevamente. El proceso se repite hasta que todos los circuitos estén operando dentro de su capacidad.

8.3.3.2 Relajación de las linealizaciones de las pérdidas

El método de relajación de las linealizaciones de pérdidas posee tres criterios para la adición de las linealizaciones:

- CRIT1: es un criterio, en MW, con base en la pérdida cuadrática absoluta, que fuerza la adición de una linealización para todo circuito cuya pérdida cuadrática es mayor que CRIT1;
- CRIT2: es un criterio, en MW, con base en la diferencia absoluta entre la pérdida cuadrática y la pérdida lineal, que fuerza la adición de una linealización para todo circuito cuya diferencia absoluta es mayor que CRIT2;
- CRIT3: es un criterio, en pu, con base en la diferencia relativa entre la pérdida cuadrática y la pérdida lineal, que fuerza la adición de una linealización para todo circuito cuya diferencia relativa es mayor que CRIT3;

En la primera micro iteración de adición de linealizaciones, solamente se aplica el criterio 1. A partir de la segunda micro iteración, los tres criterios son aplicados simultáneamente.

Originalmente, los tres criterios están fijados en los siguientes valores:

CRIT1	1.0d-2	MW
CRIT2	1.0d-1	MW
CRIT3	2.5d-2	pu

Se observa, sin embargo que en sistemas grandes el número de linealizaciones adicionadas puede ser muy elevado implicando en un aumento en el tiempo de procesamiento.

8.3.3.3 Ajuste del criterio de adición de linealizaciones

El método de linealizaciones de pérdidas fue perfeccionado con la siguiente estrategia de ajuste de criterios:

- Inicialmente se resuelve el problema sin considerar las pérdidas. A continuación se calculan las pérdidas en función de los flujos resultante y se fijan estos valores.
- La primera linealización se realiza en el punto de operación obtenido después de fijar las pérdidas aproximadas.
- El criterio 1, inicializado en 3 MW, es ajustado a cada micro iteración de la siguiente manera: CRIT1 = max(0.5*CRIT1,1.0d-2).
- En cada micro iteración se adicionan las linealizaciones que violan los criterios, como mencionado en el ítem anterior.
- Para aquellos circuitos cuyas pérdidas no violan los criterios y que por lo tanto no tuvieron ninguna linealización adicionada, se fijan las pérdidas cuadráticas en el problema.

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

- Caso el criterio establecido en una micro iteración sea insuficiente para adicionar una nueva linealización (la mayor pérdida cuadrática es menor que CRIT1), un nuevo ajuste es realizado (CRIT1 = max(0.5*CRIT1,1.0d-2) hasta que una nueva linealización sea adicionada o hasta que el criterio 1 llegue a su valor mínimo. Este procedimiento garantiza la calidad de la solución para sistemas con pérdidas pequeñas.
- El número máximo de iteraciones para adición de linealizaciones sugerido es 6, pero puede ser alterado por el usuario.

Es importante observar que la calidad de la solución no es afectada dado que todas las linealizaciones son adicionadas hasta que CRIT1 llega a su valor mínimo.

8.3.3.4 Relajación de las restricciones de integralidad

En el caso que existan restricciones en el problema que requieren ser modeladas con variables enteras (vertimiento no controlable, térmicas *commiment* y/o costo cóncavo), cada micro iteración implica en la solución de un problema de programación entera con el consiguiente aumento del tiempo de solución.

Para resolver este problema, se adoptó una estrategia de solución donde en las primeras micro iteraciones se relajan las variables enteras y se adicionan las restricciones de circuitos violados y linealizaciones de pérdidas. Después de atendidos los criterios de convergencia, se activa la representación de las variables enteras y se realizan micro iteraciones adicionales.

Esta estrategia se mostró eficiente computacionalmente sin afectar la calidad de la solución.

8.3.3.5 Tratamiento de casos donde las pérdidas exceden la linealização

Fue adicionada una estrategia para los casos donde, debido al costo marginal negativo, las pérdidas en algunos circuitos eran aumentadas artificialmente, "dislocándose" de las aproximaciones lineares. Cuando un caso de estos es detectado, una penalidad de $1/MWh es definida para las pérdidas. Esta penalidad puede ser aumentada, iterativamente, hasta que las pérdidas no sean utilizadas para aumentar artificialmente la demanda. Después de obtenida la solución, las pérdidas son fijadas en los valores obtenidos, las penalidades son retiradas y es realizado un *restart* primal, a partir de la base primal factible, para el cálculo correcto de los costos marginales.

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

587

9 DISPONIBILIDAD Y TRANSPORTE DE GAS NATURAL

Este conjunto de restricciones visa modelar la estructura de producción, consumo y logística de transporte de gas natural, que es el combustible utilizado por algunas plantas termoeléctricas.

El sistema de gas natural se representa por un modelo de flujo en redes a través de un conjunto de nodos – que representan las áreas donde ocurre la producción y consumo del gas, y a los cuales están asociadas las plantas térmicas – y arcos – que representan los gasoductos que interconectan estas áreas.

9.1 Producción de gas

9.1.1 Costos de producción

Para la contabilización de los costos de producción de gas existen las siguientes posibilidades:

1. Red de gas con costo de combustible por térmica:

   En esta representación se consideran los costos de combustibles de las térmicas y se ignoran los costos de producción de gas. Pequeñas penalidades (10-3) son adicionadas a la producción de gas en el nodo para ayudar en la convergencia del modelo.

2. Red de gas con costo de producción por nodo:

   En este caso se consideran los costos de producción de gas, siendo ignorados los costos de combustible y de transporte de las plantas térmicas asociadas. Matemáticamente, los siguientes términos son adicionados a la función objetivo:

$$Min \sum_{n=1}^{N_g} CP_t(n) P_t(n)$$

donde:

$CP_t(n)$	Costo de producción de gas natural en el nodo n, en la etapa t	k$/M[UV]	D

9.1.2 Límites de producción

Los nodos del sistema de gas natural pueden contar con fuentes de producción locales a los cuales están asociados límites mínimo y máximo diarios. Estas restricciones operacionales son representadas por el siguiente conjunto de ecuaciones:

$$\overline{P}_t(n) \leq P_t(n) \leq \underline{P}_t(n) \qquad \text{for } n = 1, \ldots, N_g \qquad (9.1)$$

donde:

n	índices de los nodos de producción de gas		
N_g	número de nodos de producción de gas		
$\overline{P}_t(n)$	máximo límite de producción en un nodo n en la etapa t	M[UV]/día	D

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación GO6AFF191FB3870
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

$\underline{P_t}(n)$	mínimo límite de producción en un nodo n en la etapa t	M[UV]/día	D
$P_t(n)$	producción de gas natural en el nodo n, etapa t	M[UV]/día	V

9.2 Transporte de gas

9.2.1 Costos de transporte en los gasoductos

De forma análoga al costo de producción del nodo, el costo de transporte en los gasoductos obedece a la siguiente representación:

1. Red de gas con costo de combustible por térmica:

   En esta representación se ignoran los costos de transporte en los gasoductos. Pequeñas penalidades (10^{-3}) son adicionadas a las variables de flujo en los gasoductos para facilitar la convergencia del modelo.

2. Red de gas con costo de producción por nodo:

   En este caso se consideran los costos de transporte de gas en los gasoductos, ignorando los costos de combustible térmico, adicionando los siguientes términos en la función objetivo:

   $$\sum_{n=1}^{N_g} \sum_{m=1}^{\Omega(n)} CT_t(m,n) f_t(m,n)$$

   donde:

$CT_t(m,n)$	Costo de transporte en el gasoducto que conecta los nodos m y n en la etapa t	k$/M[UV]	D

9.2.2 Límite de flujo en los gasoductos

Los nodos de gas natural son interconectados por gasoductos. Cada gasoducto puede ser caracterizado por sus límites de transporte de flujo mínimo y máximo, originando las siguientes restricciones:

$$\underline{f_t}(n,m) \leq f_t(n,m) \leq \overline{f}_t(n,m) \qquad \text{para } (n,m) \in M_g \qquad (9.2)$$

donde:

n, m	índices de los nodos terminales de los gasoductos		
M_g	número de gasoductos de gas natural		
$\overline{f}_t(n,m)$	límite máximo de flujo en el gasoducto que conecta los nodos terminales n y m del sistema de gas en la etapa t	M[UV]/día	D
$\underline{f_t}(n,m)$	límite mínimo de flujo en el gasoducto que conecta los nodos terminales n y m del sistema de gas en la etapa t	M[UV]/día	D
$f_t(n,m)$	flujo de gas natural en el gasoducto que conecta los nodos terminales n y m del sistema de gas en la etapa t	M[UV]/día	V

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

9.3 Balance térmico en la simulación de la red de gas

Para cada etapa, la suma de las demanda en cada nodo debe ser igual a la suma de las ofertas – producción local o importación a través de los gasoductos – y el déficit de gas – caso no exista gas natural para el suministro de la demanda no eléctrica de gas. Para cada nodo del sistema de gas, la siguiente restricción de balance se aplica:

$$P_t(n) + \sum_{m\in\Omega(n)}(1 - p_t(m,n))f_t(m,n) - \sum_{m\in\Omega(n)} f_t(n,m) - \sum_{j\in T(n)} \phi_t(j)g_t(j) + \sum_{k\in D(n)} \delta_t(n,k) = \sum_{k\in D(n)} d_t(n,k) \quad \text{para } n = 1,\dots,N_g \qquad (9.3)$$

donde:

$\Omega(n)$	conjunto de nodos del sistema de gas conectados al nodo n		
$T(n)$	conjunto de térmicas directamente conectadas al nodo n del sistema de gas		
$D(n)$	conjunto de demanda no eléctricas en el nodo n del sistema de gas		
$P_t(n)$	producción de gas natural en el nodo n, en la etapa t	M[UV]/día	V
$p_t(m,n)$	factor de pérdidas del gasoducto que conecta los nodos m y n en la etapa t (dirección $m \to n$)	M[UV]/día /MWh	D
$f_t(m,n)$	flujo de gas natural a través del gasoducto que conecta los nodos m y n en la etapa t (dirección $m \to n$)	M[UV]/día	V
$\phi_t(j)$	factor de conversión de consumo para la planta térmica j en la etapa t	M[UV]/día/MWh	D
$g_t(j)$	generación de la planta térmicas j en la etapa t	MWh	V
$\delta_t(n,k)$	déficit de gas natural del nodo n en la etapa t, escalón k	M[UV]/día	V
$d_t(n,k)$	demanda de gas natural del nodo n en la etapa t, escalón k	M[UV]/día	D

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

590

10 PLANTAS TÉRMICAS CON COSTO DE EMISIÓN DE CO2

El SDDP permite representar los costos de emisión de CO2. En este caso la variable de generación térmica tiene una parcela adicional en la función objetivo:

$$\sum_{h=1}^{3} c_{co_2}(t) \times \varphi_e(l) \times \varphi_r(j) \times \varphi(j) \times g_{tk}(j,h) \qquad \text{para } j = 1, \ldots, J \qquad (10.1)$$

donde:

l	índice del combustible asociado a la planta j		
$c_{co_2}(t)$	costo de emisión CO2 en la etapa t	$/tCO$_2$	D
$\varphi_e(l)$	factor de emisión del combustible l	tCO$_2$/UC	D
$\varphi_r(j)$	coeficiente de emisión de la planta térmica j	p.u.	D
$\varphi(j)$	factor de consumo de la planta térmica j	UC/MWh	D
$g_{tk}(j,h)$	generación de la planta térmica j en el segmento h, en la etapa t, escalón k	MWh	V

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

591

11 MODELADO PERSONALIZADO

11.1 Restricciones genéricas

Las restricciones genéricas del SDDP permiten crear ecuaciones o inecuaciones que contienen combinaciones lineales de variables de decisión asociadas a agentes registrados en el caso, lo que se puede utilizar para definir relaciones y requisitos personalizables que no están preprogramados en el modelo.

Las restricciones genéricas siguen el siguiente modelo matemático, pudiendo adoptar la forma de ecuaciones o inecuaciones.

$$\sum_{i=1}^{N} a_i x_i \geq , =, \leq R \tag{11.1}$$

donde

x_i: variable de decisión asociada a un agente registrado

a_i: coeficiente de la variable de decisión x_i

R: requirement of the constraint

N: number of variables in the constraint

Dado que el objetivo de esta funcionalidad es permitir la modelización de restricciones no estandarizadas que representen aspectos específicos de cada sistema, estamos introduciendo los agentes y las variables de decisión según la necesidad de los clientes (bajo demanda). Nuestro objetivo es ampliar esta funcionalidad para cubrir todos los agentes y variables. Por lo tanto, si está interesado en modelar alguna restricción y echa de menos algún agente/variable, por favor infórmenos para ayudar a priorizar los próximos desarrollos.

11.2 Restricciones genéricas por interpolación

Las restricciones genéricas por interpolación tienen como objetivo modelar relaciones genéricas entre un conjunto de variables de decisión de agentes registrados en el caso, al igual que las restricciones generales más simples explicadas en la sección anterior. Las relaciones se construyen a través de un conjunto de puntos proporcionados para cada variable participante en una determinada restricción. Una combinación lineal convexa entre estos puntos determina el requisito que debe cumplirse para cada variable, de acuerdo con los parámetros proporcionados para la restricción. Matemáticamente, las restricciones siguen la siguiente formulación:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_N \end{bmatrix} \geq, =, \leq \sum_{k=1}^{K} \lambda_k \begin{bmatrix} \hat{x}_{1k} \\ \hat{x}_{2k} \\ \dots \\ \hat{x}_{Nk} \end{bmatrix} + \delta \tag{11.2}$$

$$\sum_{k=1}^{K} \lambda_k = 1 \tag{11.2}$$

$$\lambda_k \leq y_{k-1} + y_k \; \forall k \in \{1, \dots, K\} \tag{11.3}$$

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPUBLICA DE PANAMA AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PUBLICOS

$$\sum_{k=0}^{K} y_k = 1 \quad (11.4)$$

$$y_0 = 0 \quad (11.5)$$

$$y_K = 0 \quad (11.6)$$

La restricción 11.1 describe la combinación convexa entre los puntos proporcionados para la restricción. Cada punto $[x_{1k}, x_{2k}, \ldots, x_{Nk}]$ va acompañado de un coeficiente λ_k que le asigna un peso, determinando el requisito que debe cumplirse por $[x_1, x_2, \ldots, x_N]$, que representa el conjunto de decisiones tomadas por el modelo. La restricción incluye la variable de holgura δ para casos de violación. La restricción 11.2 garantiza que los coeficientes de todos los puntos sumen a la unidad, como es necesario en la combinación convexa.

Las restricciones 11.3, 11.4, 11.5 y 11.6 aseguran que solo un segmento de la curva lineal por partes descrita por los puntos proporcionados esté activo en cada momento. Estas restricciones son conocidas en la literatura como SOS2.

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

593

12 CLASIFICACIÓN DE LAS RESTRICCIONES

Las restricciones del SDDP pueden ser clasificadas en restricciones blandas y restricciones duras. Las restricciones de tipo dura (D) son obligatoriamente obedecidas por el programa mientras que para las restricciones de tipo blandas (B) una variable de holgura, penalizada en la función objetivo, asume la inviabilidad de tales restricciones. A seguir son listadas todas las restricciones disponibles en el SDDP, su clasificación y el valor padrón de la penalización en el caso de las restricciones blandas.

Restricción	Tipo	Penalización padrón
Balance hídrico	H	–
Límite almacenamiento	H	–
Turbinamiento mínimo	S	Valor especificado en el campo "Penalización violación desfogue mínimo" en la sección "Parámetros Económicos"
Turbinamiento máximo	H	–
Límites generación térmica	H	–
Suministro demanda	H	–
Volumen alerta	S	1.1 × costo térmica más cara siendo despachada
Volumen mínimo	S	1.1 × costo déficit
Volumen espera	H	–
Desfogue total mínimo	S	Valor especificado en el campo "Penalización violación desfogue mínimo" en la sección "Parámetros Económicos"
Desfogue total máximo	S	0
Regularización centrales pasada	H	–
Límite consumo de combustible	H	–
Límite tasa consumo de combustible	H	–
Restricción generación mínima	H	–
Restricción generación	S	1.1 × costo déficit
Reserva rodante	H	–
Reserva de generación	S	1.1 × costo déficit
Riego	S	Existen 3 tipos de restricciones: *Energía prioritaria*: 1.1 × costo déficit *Riego prioritario*: 1.1 × costo térmica más cara siendo despachada Valor fijo: 0
Suma de intercambios	H	–
Límite de flujo en los circuitos	H	–
Representación enlace DC	H	–
Límites exportación/importación áreas	H	–
Suma de flujo en los circuitos	H	–

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS 594

13 DICCIONARIO DE VARIABLES

Nombre	Descripción	Unidad	Tipo
k	índice de los escalones de demanda de una etapa		
K	numero de escalones de demanda		
$h(k)$	duración del escalón de demanda k	horas	D
d_{tk}	demanda de energía de la etapa t, escalón k	MWh	D
c_δ	representación genérica para el costo de violaciones operativas	$/ unidad violación	D
δg_t	violación de la demanda (déficit) en la etapa t	unidad violación	V
i	índice de centrales hidroeléctricas		
I	número de centrales hidroeléctricas		
$I_U(i)$	conjunto de centrales aguas arriba que turbinan para i		
$I_S(i)$	conjunto de centrales aguas arriba que vierten para i		
$I_F(i)$	conjunto de centrales aguas arriba que filtran para i		
$v_{t+1}(i)$	volumen de la central i al final de la etapa t	hm^3	V
$v_t(i)$	volumen de la central i al inicio de la etapa t	hm^3	D
$a_t(i)$	volumen caudal afluente a la central i durante la etapa t	hm^3	D
$\varepsilon(v_t(i))$	volumen evaporado por la central i durante la etapa t	hm^3	D
$u_{tk}(i)$	volumen caudal turbinado por la planta i durante la etapa t, escalón k	hm^3	V
$s_{tk}(i)$	volumen vertido por la central i durante la etapa t, escalón k	hm^3	V
$\phi_{tk}(i)$	volumen filtrado en la central i, durante la etapa t, escalón k	hm^3	V
$x_t(i)$	variable 0-1 que implementa la característica de vertimiento no controlable para la central i	0-1	V
$\overline{v}_t(i)$	volumen mínimo almacenado de la central i al final de la etapa t	hm^3	D
$\underline{v}_t(i)$	volumen mínimo almacenado en la central i al final de la etapa t	hm^3	D
$\overline{u}_{tk}(i)$	volumen turbinado máximo para la central i en la etapa t, escalón k	hm^3	D
$\underline{u}_{tk}(i)$	volumen turbinado mínimo para la central i en la etapa t, escalón k	hm^3	D
$\delta u_{tk}(i)$	violación del volumen mínimo para la central i en la etapa t, escalón k	hm^3	V

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

Nombre	Descripción	Unidad	Tipo
$\rho(v_t(i))$	coeficiente de producción de la central i en la etapa t calculado en función del nivel del embalse al inicio de la etapa	MWh/hm³	D
$\overline{\rho}(i)$	coeficiente de producción promedio de la central i	MWh/hm³	D
$\underline{v}_{at}(i)$	volumen de alerta de la central i en la etapa t	hm³	D
$\delta_{at}(i)$	violación del volumen de alerta de la central i en la etapa t	hm³	V
$\underline{v}_{mt}(i)$	volumen mínimo operativo de la central i en la etapa t	hm³	D
$\delta_{mt}(i)$	violación del volumen mínimo operativo de la central i en la etapa t	hm³	V
$\underline{v}_{et}(i)$	volumen de controle de crecidas de la central i en la etapa t	hm³	D
$\underline{\Delta}_t(i)$	desfogue total máximo de la central i en la etapa t	hm³	D
$\overline{\Delta}_t(i)$	desfogue total mínimo de la central i en la etapa t	hm³	D
$\delta_{1t}(i)$	violación de la restricción de desfogue total mínimo de la central i en la etapa t	hm³	V
$\delta_{2t}(i)$	violación de la restricción de desfogue total máximo de la central i en la etapa t	hm³	V
$\phi(i)$	factor de regulación para la central i	p.u.	D
$r_t(i)$	volumen de riego de la central i en la etapa t	hm³	V
$\delta r_t(i)$	violación del riego de la central i en la etapa t	hm³	V
$r_{tk}(i)$	reserva rodante de la central i, etapa t, escalón k	MW	D
p	índices para los segmentos de la función de costo futuro (linear por partes)		
P	número de segmentos de la función de costo futuro (linear por partes)		
α	variable escalar que representa el valor esperado del costo futuro	k$	V
$w_t(p)$	termo constante del *p-ésimo* segmento de la función de costo futuro (lineal por partes)	k$	D
$\lambda_{tv}(i,p)$	coeficiente para la central i del *p-ésimo* segmento de la función de costo futuro (lineal por partes)	k$/hm³	D
$\lambda_{ta}(i,p)$	coeficiente para el volumen afluente a la central i del *p-ésimo* segmento de la función de costo futuro (lineal por partes)	k$/hm³	D
N_r	número de embalses en el sistema		
$J(i)$	conjunto de plantas hidroeléctricas ubicadas aguas debajo de la central i		

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

Nombre	Descripción	Unidad	Tipo
$f_{vutil}(i)$	factor de participación del volumen de la central i en el sistema	p.u.	D
δ_t	violación de la curva de aversión a riesgo en la etapa t	MWh	V
f_{ea}	factor de la curva de aversión a riesgo	p.u.	D
j	índice de las plantas térmicas		
J	número de plantas térmicas		
C	conjunto de plantas térmicas con representación de unit commitment		D
$c(j)$	costo operativo de la planta térmica j	$/MWh	D
$c_a(j)$	costo de arranque de la planta térmica j	k$	D
$x_{tk}(j)$	decisión de commitment de la planta térmica j en la etapa t, escalón k	p.u.	V
$g_{tk}(j)$	generación de la planta j en la etapa t, escalón k	MWh	V
$\underline{g}_{tk}(j)$	generación mínima generación de la planta j en la etapa t, escalón k	MWh	D
$\overline{g}_{tk}(j)$	generación máxima generación de la planta j en la etapa t, escalón k	MWh	D
$c(j,h)$	costo unitario de producción de la planta j en el segmento h	$/MWh	D
$g_{tk}(j,h)$	generación de planta térmica j en el segmento h	MWh	V
$\sigma(j,h)$	factor de participación del segmento h respecto a la capacidad de la planta térmica j	p.u.	D
l	índice de los combustibles		
F	número de combustibles		
$\Phi(l)$	conjunto de plantas que utilizan el combustible l		
$\Phi_t(l)$	disponibilidad del combustible l en la etapa t	UC	D
$\varphi(j)$	factor de consumo de la planta j	UC / MWh	D
$\tau_t(l)$	tasa de consumo máxima del combustible l en la etapa t	UC/hora	D
$c_{co_2}(t)$	costo de emisión de CO2 en la etapa t	$/tCO$_2$	D
$\varphi_e(l)$	factor de emisión del combustible l	tCO$_2$/UC	D
$\varphi_r(j)$	coeficiente de emisión de la planta j	p.u.	D
$\varphi(j)$	factor de consumo del combustible de la planta j	UC/MWh	D
r	índice de las restricciones de generación		
R	número de restricciones de generación		
$J(r)$	conjunto de plantas térmicas en la restricción r		
$I(r)$	conjunto de plantas hidroeléctricas en la restricción r		

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

Nombre	Descripción	Unidad	Tipo
$\underline{G}_{tk}(r)$	límite inferior de la restricción r en la etapa t, escalón k	MWh	D
$\overline{G}_{tk}(r)$	límite superior de la restricción r en la etapa t, escalón k	MWh	D
r	índice de las restricciones de reserva de generación		
R_1	número de restricciones de reserva de generación tipo 1		
R_2	número de restricciones de reserva de generación tipo 2		
R_3	número de restricciones de reserva de generación tipo 3		
$f(r)$	factor de la demanda correspondiente a la restricción de reserva r	p.u.	D
s	índices de los sistemas o regiones		
S	número de sistemas		
$I(s)$	conjunto de plantas hidroeléctricas en el sistema s		
$J(s)$	conjunto de plantas térmicas en el sistema s		
$\Omega(s)$	conjunto de sistemas directamente conectados al sistema s		
$d_{tk}(s)$	demanda de energía en el sistema s en la etapa t, en el escalón k	MWh	D
$\omega_{tk}(l,s)$	trasferencia de energía del sistema l al sistema s en la etapa t, escalón k	MWh	V
$\overline{\omega}(l,s)$	límite de transferencia desde el sistema l al sistema s	MWh	D
$c(l,s)$	costo de transferencia del sistema l al sistema s	$/MWh	D
$c(s,l)$	costo de transferencia del sistema s al sistema s	$/MWh	D
si	índices de las restricciones de suma de intercambio		
N_{si}	número de restricciones de suma de intercambio		
$K(si)$	número de líneas de intercambio pertenecientes a la restricción de suma de intercambio si		
$I_{tk}(m,si)$	línea de intercambio m de la restricción si, en la etapa t, escalón k	MWh	V
$\underline{I}_{tk}(m,si)$	límite inferior de la restricción de suma de intercambio si, en el escalón k y en la etapa t	MWh	D
$\overline{I}_{tk}(m,si)$	límite superior de la restricción de suma de intercambio si, en el escalón k y en la etapa t	MWh	D
n	índices de barras		
N	número de barras		

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

Nombre	Descripción	Unidad	Tipo
$g(n)$	generación en la barra n	MWh	V
$d(n)$	demanda en la barra n	MWh	D
m	índices de circuitos		
M	número de circuitos		
$f(m)$	flujo de potencia en el circuito m	MWh	V
$\Omega(n)$	conjunto de circuitos directamente conectados a la barra n		
$\gamma(m)$	susceptancia del circuito m		
$\theta(n)$	ángulo nodal de la barra n		
$n(i)$	conjunto de barras asociadas a la planta i		
$n_F(m)$	barra DE del circuito m		
$n_T(m)$	barra PARA del circuito m		
l	índices de enlace DC		
L	número de enlaces DC		
$\overline{\gamma}_{tk}(l)$	límite de flujo del enlace DC l en la etapa t, escalón k	MWh	D
a	índices de áreas eléctricas		
A	número de áreas		
$I(a)$	conjunto de plantas hidroeléctricas pertenecientes al área a		
$J(a)$	conjunto de plantas térmicas pertenecientes al área a		
$N(a)$	conjunto de barras pertenecientes al área a		
$\overline{I}_{tk}(a)$	límites de importación del área a en la etapa t, escalón k	MWh	D
$\overline{E}_{tk}(a)$	límites de exportación del área a en la etapa t, escalón k	MWh	D
sc	índices de las restricciones de suma de flujo en los circuitos		
N_{sc}	número de restricciones de suma de flujo en los circuitos		
$K(sc)$	número de circuitos pertenecientes a la restricción de soma de flujo en circuitos sc		
$\alpha(m)$	factor multiplicativo asociado al circuito m de la restricción sc		
$\underline{F}(sc)$	límite inferior de la restricción de suma de flujo en circuitos sc	MWh	D
$\overline{F}(sc)$	límite superior de la restricción de suma de flujo en circuitos sc	MWh	D
n	índices de los nodos de producción de gas natural		
N_g	número de nodos de producción de gas natural		

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPUBLICA DE PANAMA AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PUBLICOS

Nombre	Descripción	Unidad	Tipo
$\Omega(n)$	conjunto de nodos del sistema de gas conectados al nodo n		
$T(n)$	conjunto de plantas térmicas asociadas al nodo n del sistema de gas		
$D(n)$	conjunto de demandas no eléctricas conectadas al nodo n del sistema de gas		
$\overline{P}_t(n)$	límite máximo de producción de gas del nodo n en la etapa t	M[UV]/día	D
$\underline{P}_t(n)$	límite mínimo de producción de gas del nodo n en la etapa t	M[UV]/día	D
$P_t(n)$	producción de gas natural en el nodo n en la etapa t	M[UV]/día	V
n, m	índices de los nodos terminales de los gasoductos		
M_g	número de gasoductos		
$\overline{f}_t(n,m)$	límite máximo de flujo de gas del gasoducto que conecta los nodos t y m en la etapa t	M[UV]/día	D
$\underline{f}_t(n,m)$	límite mínimo de flujo de gas del gasoducto que conecta los nodos n y m en la etapa t	M[UV]/día	D
$f_t(n,m)$	flujo de gas natural del gasoducto que conecta los nodos n y m en la etapa t	M[UV]/día	V
$p_t(m,n)$	factor de pérdidas del gasoducto que conecta los nodos m y n en la etapa t (cuando el flujo está en la dirección $m \rightarrow n$	M[UV]/día/MWh	D
$\phi_t(j)$	factor de conversión de consumo de gas para la planta térmica j en la etapa t	M[UV]/día/MWh	D
$\delta_t(n,k)$	déficit de la demanda de gas natural k en el nodo n en la etapa t	M[UV]/día	V
$d_t(n,k)$	demanda de gas natural k en el nodo n en al etapa t	M[UV]/día	D

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta

REPÚBLICA DE PANAMÁ
AUTORIDAD NACIONAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS
600

14 BIBLIOGRAFÍA

Pereira, M.V., Pinto, L.M.V.G., "Multi-stage stochastic optimization applied to energy planning", *Mathematical Programming*, Volume 52, Numbers 1-3, pp. 359-375, May, 1991

Pereira, M.V., McCoy M.F., Merrill, H.M., "Managing risk in the new power business", *IEEE Computer Applications in Power*, pp.18-24, Apr, 2000.

Gorenstin, B.G., Campodonico, N.M., Costa, J.P., Pereira, M.V.F., "Stochastic optimization of a hydro-thermal system including networkconstraints", *Power Industry Computer Application Conference, 1991. Conference Proceedings*, pp. 127-133, May, 1991.

Pereira, M. V., Campodonico, N.M., Kelman, R., "Planning Risks. In: Risk Tutorial", *IEEE Pica Conference*, Santa Clara, 1999.

Pereira, M. V., Campodonico, N.M., Kelman, R., "Long-term Hydro Scheduling based on Stochastic Models", EPSOM'98, Zurique, Suiça, 1998.

Pereira, M. V., Campodonico, N.M., Kelman, R., "Programación Dinámica Dual Estocástica (MPODE y SUPER/OLADE)", *Seminario Internacional Modelos de Planeación y Mercados para el Sistema Eléctrico Colombiano*, 1998, Bogotá, Colombia, 1998

Pereira, M. V., Campodonico, N.M., Gorenstin, B.G., Costa, J. P., "Application of Stochastic Optimization in Power System Planning and Operation". *International Symposium on Electric Power Engineering*, Estocolmo, Suécia, 1995.

Gaceta Oficial Digital
Para verificar la autenticidad de una representación **GO6AFF191FB3870**
en el sitio web www.gacetaoficial.gob.pa/validar-gaceta