



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Propuesta de una alternativa para el manejo de desviaciones en un despacho intradiario en Colombia

Juan Felipe Lozano Suárez

Trabajo Final presentado como requisito parcial para obtener el título de:
Maestría en Ingeniería – Sistemas Energéticos

Director:

PhD. Carlos Jaime Franco Cardona

Universidad Nacional de Colombia – sede Medellín
Facultad de Minas
Departamento de Ciencias de la Computación y la Decisión
Medellín, Colombia
2023

Agradecimientos

Agradezco a Dios, la Virgen María, mi querida familia y al profesor Carlos Jaime Franco Cardona por su apoyo incondicional en la consolidación de este proyecto.

Sueño con hacer cambios que promuevan el progreso en mi país, encaminados a que la energía sea un derecho fundamental y de acceso para todos los colombianos.

Resumen

Actualmente, el mercado de energía colombiano funciona con un despacho económico realizado desde el día anterior de la operación, esto significa que desde el día anterior los Agentes Generadores adquieren un compromiso de generación para el día siguiente, sin embargo, estos compromisos en ocasiones no se logran cumplir, a estos incumplimientos de generación se les conoce como desviaciones y pueden tener penalización. Se está avanzando en estudios regulatorios para la implementación de un despacho intradiario en Colombia, que emita señales de oferta y demanda en corto tiempo, y permita la oferta de generación en varias subastas durante el día de la operación. Sin embargo, las desviaciones seguirán existiendo por fallas en equipos, demoras para entrar en operación, entre otros. Es por esto que en el presente trabajo se propone una alternativa para el manejo de las desviaciones en un despacho intradiario en Colombia. Para lograr lo anterior se realizó una revisión del funcionamiento de desviaciones en algunos países, seleccionando un grupo de esquemas de desviaciones bajo criterios de interés, se evaluaron estrategias de mitigación de desviaciones por parte de un Agente Generador, y con estos elementos se consolidó una propuesta de alternativa de manejo de desviaciones en un despacho intradiario en Colombia.

Palabras clave: Despacho, desviaciones, mercado intradiario, estrategias.

Proposal of an alternative for the management of deviations in an intraday dispatch in Colombia

Abstract

Currently, the Colombian energy market operates with an economic dispatch made from the day before the operation; this means that from the previous day Generating Agents acquire a generation commitment for the following day. However, these commitments are sometimes not met, and these non-compliances of generation are known as deviations and might have penalties. Progress is being made in regulatory studies for implementing an intraday dispatch in Colombia, which issues supply and demand signals in a short time and allows the supply of generation in several auctions during the operating day. However, deviations will continue to exist due to equipment failures, delays to go into operation, etc. For this reason, this paper proposes an alternative for managing deviations in an intraday dispatch in Colombia. To achieve the above, a review of the operation of deviations in some countries was carried out, selecting a group of deviation schemes under criteria of interest, deviation mitigation strategies were evaluated by a Generating Agent, and with these elements, a proposal of an alternative for the management of deviations in an intraday dispatch in Colombia was consolidated.

Keywords: Dispatch, deviations, intraday market, strategies.

Tabla de contenido

Resumen.....	3
Abstract	3
1. Introducción	10
2. Antecedentes	11
2.1. Operación en tiempo real (día de operación).....	12
2.2. Despacho Ideal y Precio de Bolsa.....	12
2.3. Desviaciones en Colombia.....	13
3. Marco teórico.....	15
3.1. Proceso del cálculo del pago de desviaciones en Colombia	15
3.2. Cálculo de la desviación	16
3.3. Redespacho	17
3.4. Despacho Intradarios.	18
4. Revisión de literatura	22
5. Objetivos y metodología	28
5.1. Objetivo General.	28
5.2. Objetivos Específicos.....	28
5.3. Metodología.....	28
5.3.1. Fase 1. Objetivo específico 1.....	28
5.3.2. Fase 2. Objetivo específico 2.....	28
5.3.3. Fase 3. Objetivo específico 3.....	28
5.3.4. Fase 4. Objetivo General	28
6. Esquemas de manejo de desviaciones.....	30
6.1. Identificación de esquemas de manejos de desviaciones, en países seleccionados.	30
6.1.1. Estados Unidos.	30
6.1.2. Desviaciones en PJM.	31
6.1.3. Desviaciones en Nord Pool (Europa).....	39
6.1.4. Desviaciones en Australia.....	40
6.1.5. Desviaciones en Brasil.	41
6.2. Selección un conjunto de esquemas de desviaciones identificados para ser evaluados.	43
7. Propuestas de estrategias de mitigación	45
7.1. Evaluación de estrategias de mitigación de penalidad por desviaciones por parte de un Agente Generador, para los esquemas seleccionados.....	45

7.2. Propuesta de alternativa para el manejo de desviaciones en un despacho intradiario en Colombia.	47
8. Conclusiones	51
8.1. Conclusiones generales del Trabajo Final	51
8.2. Conclusiones asociadas con el logro de los objetivos definidos	51
8.2.1. Objetivo específico 1	51
8.2.2. Objetivo específico 2	52
8.2.3. Objetivo específico 3	53
8.2.4. Objetivo general	53
8.3. Trabajos Futuros.....	55
9. Referencias	56

Lista de Tablas

Tabla 3-1. Mercado Intradiario	18
Tabla 3-2. Hoja de ruta de la Respuesta de la Demanda	20
Tabla 4-1. Ingestigaciones de interés que se han realizado en relación a desviaciones	22
Tabla 4-2. Investigaciones de interés encontradas en Google Scholar.....	23
Tabla 4-3. Investigaciones de interés encontradas.....	24
Tabla 6-1. Cifras para cálculo de desviaciones en CAISO.....	38
Tabla 6-2. Resumen características desviaciones en países seleccionados.....	43
Tabla 7-1. Evaluación de las estrategias identificadas.....	46

Lista de Ecuaciones

Ecuación 3-1. Cálculo de tolerancia	15
Ecuación 3-2. Cálculo de la remuneración de desviación.....	16
Ecuación 3-3. Cálculo de Tolerancia de desviaciones.....	17

Lista de abreviaturas

Abreviatura	Término
MEM	Mercado de Energía Mayorista
CND	Centro Nacional de Despacho
ASIC	Administrador del Sistema de Intercambios Comerciales
AGC	Control Automático de Generación
UNR	Usuarios No Regulados
DDV	Demanda Desconectable Voluntaria
RD	Respuesta de la Demanda
ToU	Precio por Tiempo de Uso
DER	Recursos Energéticos Distribuidos
SDL	Sistema de Distribución Local
OCG	Opciones de Compra de Gas
CREG	Comisión de Regulación de Energía y Gas
PHFA	Planta Hidráulica Filo de Agua.
PJM	Mercado energético de Pensilvania, New Jersey y Maryland.
CAISO	California Independent System Operator
NYISO	New York Independent System Operator
ERCOT	Electric Reliability Council of Texas
TIE	Transacciones Internacionales de Electricidad
LSE	Load Serving Entity
RTO	Regional Transmission Organization
RTM	Real Time Market
AEMO	Australian Energy Market Operator

Abreviatura	Término
NEM	National Electricity Market
MCSO	Mecanismo de Compensación de Sobras y Déficits
ONS	Operador Nacional del Sistema Eléctrico
MRE	Mercado de Relocación de Energía (Brasil)
MME	Mercado de Energía Mayorista (Brasil)
CCEE	Cámara de Compensación de Energía Eléctrica
AGC	Control Automático de Generación

1. Introducción

El mercado de energía colombiano funciona actualmente con un despacho económico, en el que los distintos Agentes Generadores ofertan disponibilidad de entrega de energía, cantidad y precio para el día siguiente (día de operación), es decir que los compromisos de generación se adquieren desde el día anterior. En el tiempo que hay entre la adquisición del compromiso y el momento de entrega de energía, pueden ocurrir eventos que ocasionen que algunos Agentes Generadores no logren cumplir la meta de generación o entrega de energía pactada, a esto se le conoce como desviaciones y pueden ser penalizables.

Actualmente, la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) se encuentra estudiando la implementación de un despacho intradiario en Colombia y se estima que sea implementado en el país en corto plazo (CREG 2022). Un despacho intradiario es en el que los Agentes Generadores puedan modificar sus ofertas en precios y capacidad de generación para horarios predefinidos durante el día de operación (Mastropietro et al., 2020), esto trae consigo cambios interesantes a los cuales sería ideal estar preparados. El desarrollo de este documento se basa principalmente en proponer alternativas de mitigación de desviaciones para un mercado intradiario en Colombia.

En el documento se presentan los antecedentes en el capítulo 2, en los cuales se explica en detalle el funcionamiento del despacho de energía colombiano actual, la operación en tiempo real, fijación de precios de bolsa y se documenta la cantidad de las desviaciones de los últimos años de los Agentes Generadores en Colombia. Seguidamente en el capítulo 3, se agrupan los conceptos teóricos que enmarcan el proceso del cálculo del pago de desviaciones y el funcionamiento de un despacho intradiario.

En el capítulo 4 se documentan los resultados de búsqueda bibliográfica realizada en bases de datos como Scopus y Google Scholar, y se presenta información de investigaciones referentes al mercado de energía, seguidamente en el capítulo 5 se establece el objetivo general, los objetivos específicos y la metodología para llevar a cabo el desarrollo del presente trabajo. Para finalizar se agrupa en el capítulo 6 el esquema del manejo de desviaciones en países seleccionados como Estados Unidos (PJM y CAISO), Australia, Brasil y Nord Pool (Noruega, Suecia, Finlandia, Dinamarca, Estonia, Letonia y Lituania), en el capítulo 7 se establece la propuesta para el manejo de desviaciones y se finaliza con las conclusiones en el capítulo 8.

2. Antecedentes

En Colombia, el Mercado de Energía Mayorista se define como el mercado en el que los Agentes Generadores y los Agentes Comercializadores tienen la oportunidad de comprar y vender energía eléctrica a través de contratos bilaterales. En estos contratos, se acuerdan generalmente precios fijos para la compra y venta futura de electricidad, ya sea en la bolsa de energía o mediante otros acuerdos. Se negocian los excedentes tanto de exceso como faltantes de electricidad para el cumplimiento de sus obligaciones dentro del mercado (Gómez Areiza, D. 2020).

En la actualidad, los Agentes Generadores con despacho central envían diariamente al Centro Nacional de Despacho (CND) las ofertas de precio de energía para las 24 horas del día siguiente (día de operación), así como la declaración de disponibilidad de generación de energía para cada hora del día. Esta información debe ser enviada al CND a más tardar a las 8:00 horas del día anterior a la operación (Jaramillo Arenas, J. 2017). Según el artículo 28 de la resolución CREG 060 del 2019, las ofertas de precio que consoliden los Agentes Generadores, deben considerar (CREG, 2019):

- Para las plantas termoeléctricas, se deben considerar los costos variables de generación esperados, que incluyen el costo incremental del combustible, los gastos de administración, operación, mantenimiento y la eficiencia térmica de la planta.
 - Para las plantas hidroeléctricas, es necesario tener en cuenta los costos de oportunidad, que se refieren al valor del agua, considerando la operación a mediano y largo plazo del Sistema Interconectado Nacional (SIN).
 - Para las plantas de generación variable, como las eólicas, solares fotovoltaicas y filo de agua, se deben considerar los costos de oportunidad de generar energía en el momento de la oferta, teniendo en cuenta la operación económica para el día de operación del SIN.
- Predespacho Ideal y Despacho Programado

La proyección de demanda es calculada por el CND, con base en sus propios modelos e información suministrada por los Agentes Comercializadores, esta proyección se realiza el día previo a la operación por parte del CND y una vez se cuenta con la información de la oferta, la demanda y el estado del sistema, el CND procede a consolidar el Predespacho Ideal y el Despacho Programado para el día siguiente. En el Predespacho Ideal se tiene una primera aproximación al Precio de Bolsa, a la cual se le conoce como Costo Marginal y representa el precio de la última unidad despachada para cada una de las horas del día. En la Figura 1-1 se observa un ejemplo de cómo se obtiene el precio de bolsa para el predespacho o Costo Marginal, en barras se representa la participación de distintos agentes generadores, siendo el ancho su capacidad de generación y el alto el precio ofertado (Jaramillo Arenas, J. 2017).

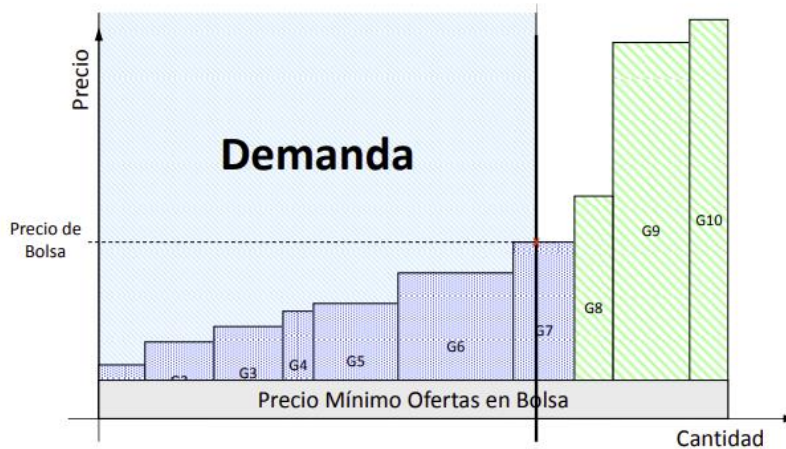


Figura 1-1. Ejemplo predespacho y fijación del precio de bolsa esperado
Fuente: (Jaramillo Arenas, J. 2017).

El Costo Marginal no representa un precio compromisorio para el sistema, el Costo Marginal sirve para la activación de Opciones de Compra de Gas (OCG) y también para una primera señal sobre las condiciones de escasez. (Jaramillo Arenas, J. 2017).

2.1. Operación en tiempo real (día de operación)

Luego de realizar el despacho programado, a partir de las 00:00 horas de cada día, el CND coordina la operación en tiempo real, teniendo en cuenta los cambios en la demanda, los eventos operativos en las unidades de generación, las variaciones en la generación de las plantas menores y filo de agua, los eventos en el Sistema de Transmisión Nacional (STN), las modificaciones en las condiciones energéticas y los cambios en la disponibilidad de combustibles de las plantas térmicas. Utilizando el mismo procedimiento del Despacho Programado, pero para cada hora del día en curso, el CND programa y lleva a cabo la operación del día. Para este cálculo, se considera la información de oferta de precios enviada por los agentes a las ocho de la mañana del día anterior para cada hora del día en curso. (Jaramillo Arenas, J. 2017).

2.2. Despacho Ideal y Precio de Bolsa

Después del día de operación, el Administrador del Sistema de Intercambios Comerciales (ASIC) lleva a cabo el proceso de Despacho Ideal, utilizando el mismo procedimiento del Despacho Programado pero con los datos reales de la demanda, la medición de contadores de generación, las desviaciones, la regulación de la frecuencia, la disponibilidad real de las unidades de generación, la disponibilidad de combustible, los parámetros técnicos de las plantas y la generación real de las plantas menores

y filo de agua. Teniendo en cuenta esta información, se determinan todas las transacciones posteriores del mercado (CREG, 2019):

- Ventas y compras en Bolsa
- Remuneración del servicio de AGC.
- Ejercicio de Obligaciones de Energía en Firme del Cargo por Confiabilidad.
- Precio de las reconciliaciones positivas y negativas.
- Penalizaciones por desviaciones en la generación programada.

2.3. Desviaciones en Colombia

En Colombia, diariamente los Agentes Generadores deben reportar una disponibilidad que refleje sus condiciones de operación para entregar la energía requerida y ofrecida, con la máxima confiabilidad (Jaramillo Arenas, J. 2017). Sin embargo, debido a las condiciones normales de funcionamiento, los equipos de generación suelen experimentar desviaciones entre su programa de despacho y la realidad. Para abordar esto, la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) ha establecido márgenes de tolerancia de hasta el 25% para plantas de generación variable y del 5% para plantas que no son de generación variable. Esto se encuentra estipulado en el artículo 29 de la resolución CREG 060 de 2019, el cual modifica el numeral 1.1.1.1 del Anexo A de la resolución CREG 024 de 1995, que a su vez fue modificado por el artículo 1 de la resolución CREG 011 de 2010. (CREG, 2019)

Las desviaciones suelen ocurrir a eventos como:

- Variación en condiciones ambientales de temperatura, humedad, presión, etc.
- Disparo de unidades de generación por fallas técnicas o errores humanos.
- Variaciones en la disponibilidad del energético primario.

En la Figura 2-4 se observan las desviaciones del mercado eléctrico colombiano, desde el año 2021 hasta finales del año 2022, siendo esta la información disponible en el portal de XM a la fecha de consulta.

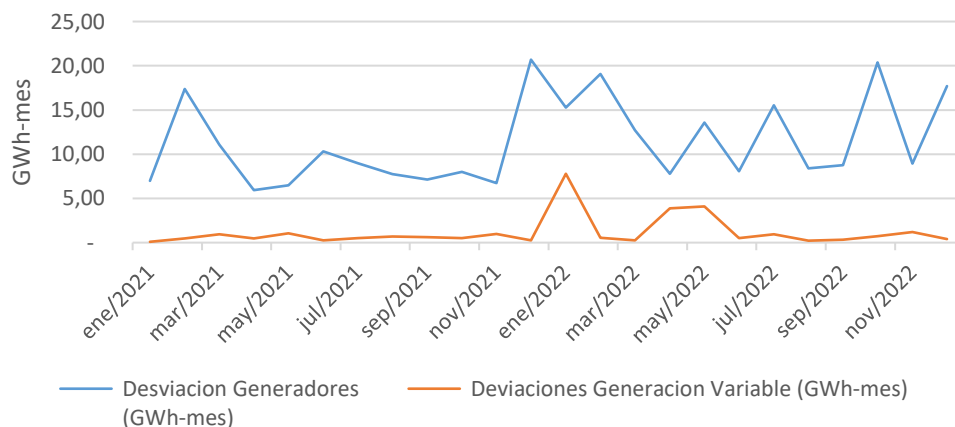


Figura 2-4 Desviaciones en el MEM.

Fuente: Datos (XM, 2023)

Según la Figura 2-4, las desviaciones en el año 2021 fueron de 124.20 GWh-año y en el año 2022 fueron de 177.01 GWh-año. Cuando el agente generador puede prever estas desviaciones y estima que ocurrirán durante el día, tiene la opción de ajustar su oferta disponible o suplir la falta de generación si cuenta con una alternativa para corregirlo en un eventual mercado intradiario.

Actualmente, el Mercado de Energía en Colombia, parte de un predespacho ideal o despacho programado como el descrito y aunque ha contribuido con éxito al buen funcionamiento del sistema, puede no ser capaz de integrar de manera eficiente a la demanda y a los recursos variables.

El Mercado de Energía Intradiario permite la modificación de las ofertas realizadas para programar el despacho durante el día de operación. Esta modalidad se encuentra en la planeación de la hoja de ruta de la Respuesta de la Demanda en el Sistema Interconectado Nacional, según lo establecido en el documento CREG 001 del 18 de enero de 2022 (CREG 2022). La flexibilidad del Mercado de Energía Intradiario es necesaria para emitir señales a tiempo y facilitar la Respuesta de la Demanda, así como para permitir negociaciones bilaterales entre los Agentes.

Debido a lo expuesto anteriormente, es fundamental encontrar alternativas al manejo de desviaciones para los diferentes agentes del mercado que necesiten realizar cambios en sus compromisos de generación en un mercado de corto plazo o intradiario. En el siguiente capítulo se presenta el proceso del cálculo de pago de desviaciones en Colombia, se aborda la definición de despacho y redespacho, Mercado Intradiario, se muestra un ejemplo del cálculo de desviaciones y la hoja de ruta de la respuesta de la Demanda en Colombia.

3. Marco teórico

3.1. Proceso del cálculo del pago de desviaciones en Colombia

Según el artículo 30 de la resolución CREG 060 del 2019 (CREG, 2019), el proceso del cálculo de desviaciones se realiza diariamente para cada uno de los periodos horarios, aplicándose a los generadores que no se definan para la hora en proceso como reguladores del sistema. Según el literal b.1 del artículo 29 de la resolución CREG 060 del 2019 (CREG, 2019) para realizar el cálculo de pago por desviaciones horarias se define una franja de tolerancia para cada planta o unidad de la siguiente manera:

Para las plantas o unidades de generación diferentes a las eólicas, solares fotovoltaicas y filo de agua el porcentaje de desviación horaria se calcula como el valor absoluto de la diferencia entre el despacho programado o el redespacho, según corresponda, y la generación real para cada hora. En el caso de las plantas que se encuentran dentro de este tipo de cálculo, su franja de tolerancia de desviación horaria es del 5 por ciento (5%). Si una planta no tiene un despacho programado o redespacho asignado y su generación real diaria es distinta de cero (0), se considera que la desviación horaria supera el 5 por ciento (5%) (CREG, 2019).

Para plantas de generación variable como las eólicas, solares fotovoltaicas y filo de agua que tengan una desviación diaria en un valor menor o igual al 15% no se les considerará desviación diaria del primer despacho y se les considerará solo la regla de desviación del redespacho. Para las que tengan una desviación diaria en un valor mayor al quince por ciento (15%) y menor al veinte por ciento (20%) se estimará una tolerancia horaria para el día d , en la ecuación 3-1 se establece la forma del cálculo de tolerancia:

$$Tolerancia_{h,d} = 25 - desviación_d \text{ (Ecuación 3-1)}$$

Donde $Tolerancia_{h,d}$ corresponde a la tolerancia horaria para el día d , en unidades porcentuales(%). A partir de este valor la planta de generación variable asume un pago por desviación horaria. En el caso de que una planta no tenga generación diaria en su primer despacho y presente generación real distinta de cero, se considera que la desviación diaria es mayor al 20%. En este escenario, la tolerancia horaria para ese día en particular, para las plantas que presenten una desviación diaria igual o superior al 20%, se establece en un cinco por ciento (5%) (CREG, 2019).

No se le aplica la franja de tolerancia horaria a la planta de generación variable tipo filo de agua, que se encuentre aguas abajo de una planta hidráulica con embalse de regulación de caudales mayor a un día o si para el día del cálculo de desviación la planta en mención se programó como regulador del sistema o el CND modificó en tiempo real su generación. (CREG, 2019).

Teniendo en cuenta los aspectos mencionados anteriormente, se realiza el cálculo de la liquidación horaria para las plantas de generación variables cuando se encuentran en el despacho ideal para satisfacer la demanda nacional comercial, la demanda comercial de transacciones internacionales

de electricidad (TIE) o la demanda internacional. En caso de que la generación real exceda o sea inferior a la tolerancia horaria diaria permitida, se realiza un cálculo de liquidación horaria que involucra el valor absoluto de la diferencia entre la generación real y el despacho programado. Esto se multiplica por el valor absoluto de la diferencia entre el precio de oferta y el precio de bolsa para cada uno de los tipos de cubrimiento de demanda mencionados anteriormente (CREG, 2019). Según lo expuesto anteriormente, se establece que las plantas o unidades de generación que presenten desviaciones en su generación real con respecto al despacho programado para el cálculo horario, y dichas desviaciones superen los límites permitidos por la tolerancia definida, deben realizar el pago correspondiente por dichas desviaciones. Este pago se realizará mediante la liquidación de desviaciones en la Bolsa de Energía, y su cálculo se basará en el valor absoluto de la diferencia entre la generación real y el despacho programado, multiplicado por el valor absoluto de la diferencia entre el precio de oferta y el precio de Bolsa en transacciones relacionadas con la demanda comercial nacional, la demanda comercial de transacciones internacionales de electricidad (TIE) y la demanda comercial internacional (CREG, 2019).

3.2. Cálculo de la desviación

Según el artículo 32 de la res CREG 060 de 2019 (CREG, 2019), el cálculo de desviación en Colombia se define como:

Si la generación real está por fuera de la franja de tolerancia de desviación aplicada al despacho programado (resultado del despacho programado o redespacho, según corresponda) de cada unidad o planta ofertada, el generador deberá retribuir a la cuenta por pago de desviaciones el valor absoluto de la diferencia entre la generación real y el despacho programado, multiplicado por el valor absoluto de la diferencia entre el precio de Bolsa de Energía que aplique para cada tipo de demanda y el precio de oferta, en la ecuación 3-2 se establece la forma del cálculo de la remuneración de desviación:

$$DSV = |PB - pof| \times |G. Real - G. Prog| \text{ (Ecuación 3-2)}$$

Siendo,

DSV = Desviación (\$).

PB = Precio de Bolsa para transacciones nacionales ó Transacciones Internacionales de Electricidad (TIE) ó Transacciones internacionales de exportaciones. (\$/MWh).

Pof = Precio de Oferta (\$/MWh).

G. Real = Generación Real (MWh)

G.Prog = Generación programada (resultado del Redespacho) (MWh).

Es decir que gráficamente las desviaciones se pueden interpretar como en la Figura 3-1:

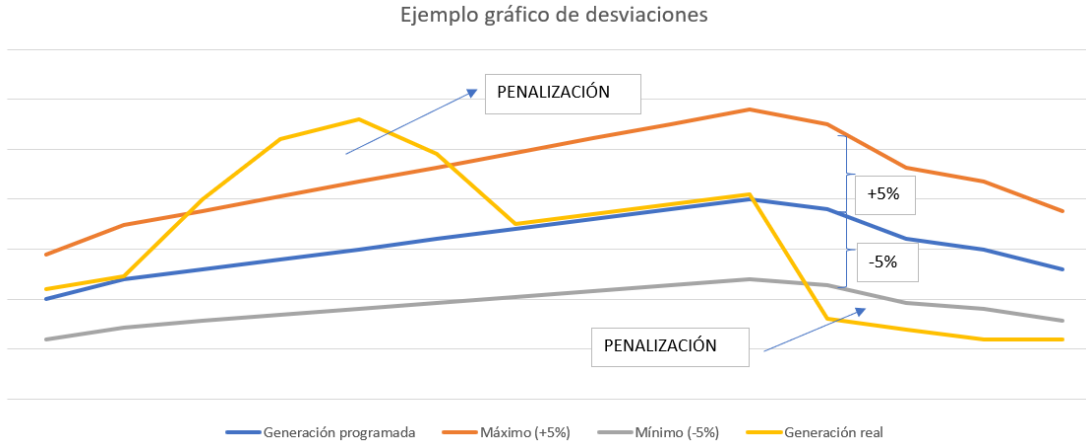


Figura 3-1 Explicación gráfica de desviaciones.

Fuente: Elaboración propia

Lo anterior se conoce como valor diario de las liquidaciones horarias de desviaciones del despacho, adicionalmente la desviación del programa de generación en el redespacho también tiene un cálculo con tolerancias diferentes, la desviación en el redespacho se define como el valor absoluto de la diferencia de su despacho programado o redespacho diario y su generación real diaria, sobre su despacho programado o redespacho (CREG, 2019), esta desviación se considerará solo si es mayor al ocho por ciento (8%), con tolerancia adicional hasta el 15% para plantas de generación variable.

$$Toleranciahoraria = \left(\frac{110}{7}\right) - \left(\frac{5}{7}x(desviaciondiariax100)\right) \text{ (Ecuación 3-3)}$$

El valor a pagar por desviaciones para generadores variables por concepto de desviaciones, corresponde al Valor máximo (Vmax) corresponde al máximo entre el valor total diario de las liquidaciones horarias de desviaciones del despacho y el redespacho.

3.3. Redespacho

Según el artículo 35 de la resolución CREG 060 del 2019 (CREG 2019), se establece que los agentes tienen un periodo de tiempo de al menos una hora y media antes de que entre en vigencia una modificación para enviar y procesar la información necesaria con el fin de llevar a cabo el redespacho. El Centro Nacional de Despacho (CND) proporciona a las empresas generadoras una notificación con al menos media hora de anticipación en caso de haber modificaciones en el programa de generación de las unidades, así como en los cambios de límites de transferencias de las áreas operativas, en caso de presentar.

Las plantas hidráulicas deben informar diariamente al CND antes de las 6:00 horas de cada día los datos principales del embalse, como nivel, agua turbinada, vertida, descargada y promedio de aportes al embalse del día anterior, relación de mantenimientos o indisponibilidades para el día siguiente al de operación. Para plantas de generación Filo de agua, deben informar diariamente al CND antes de las 6:00 horas de cada día, los aportes naturales de todos los ríos que entran al embalse, expresados en m³/seg.

Después de analizar el Despacho Programado y los Redespachos, se lleva a cabo la operación del sistema para generar la cantidad de energía necesaria que cubra la demanda. Durante esta operación, se registran las desviaciones operativas, las cuales se calculan como el valor absoluto de la diferencia entre la generación real y la generación programada. Si estas desviaciones superan el 5%, se aplican penalizaciones. La penalización se determina multiplicando la diferencia entre el precio de Bolsa y el precio de oferta del generador. Los generadores realizan el pago correspondiente, el cual se distribuye proporcionalmente a los comercializadores en función de su demanda. (Poveda Núñez, M. 2012).

3.4. Despacho Intradiarios.

Un despacho intradiario es un proceso en el cual los Agentes Generadores tienen la posibilidad de realizar modificaciones en sus ofertas, tanto en términos de precios como de capacidad de generación, para horarios predefinidos durante el día de operación. Esto permite adaptarse a situaciones imprevistas como fallas en una central térmica, cambios inesperados en los costos de combustible o variaciones imprevistas en los recursos renovables. Estas modificaciones en las ofertas resultarán en la generación de nuevos despachos durante el día de operación y, como consecuencia, en nuevos compromisos comerciales entre los Agentes Generadores y los comercializadores de energía. Es decir, se ajusta la planificación y la operación del sistema eléctrico en tiempo real para responder a las condiciones cambiantes y garantizar un suministro eficiente y confiable de energía. (Mastropietro et al., 2020)

Un ejemplo de Despacho Intradiario se muestra en la Tabla 3-1. El cual consiste en varias sesiones de aperturas, cierres, publicación y horizonte (despacho) que permiten a los agentes modificar los programas que tienen asignados, mediante el envío de ofertas adicionales de venta y compra de energía durante el día de operación. (Jaramillo Arenas, J. 2017).

Tabla 3-1 Mercado Intradiario

	Sesión 1	Sesión 2	Sesión 3	Sesión 4	Sesión 5	Sesión 6	Sesión 7
Apertura	12:55 (D-1)	12:55 (D-1)	17:30 (D-1)	17:30 (D-1)	17:30 (D-1)	17:30 (D-1)	17:30 (D-1)
Cierre	15:00 (D-1)	16:30 (D-1)	23:45 (D-1)	03:45	07:45	11:15	15:45
Publicación	15:30 (D-1)	17:00 (D-1)	00:15	04:15	08:15	11:45	16:15
Horizonte	00-24	00-24	05-24	09-24	13-24	17-24	21-24

Fuente: (Jaramillo Arenas, J. 2017).

Otro esquema y ejemplo de mercado intradiario se observa en la figura 3-2, en la cual se observa que se realizan tres despachos, uno desde el día anterior a la operación (d-1) y otros dos durante el día (d) de operación.

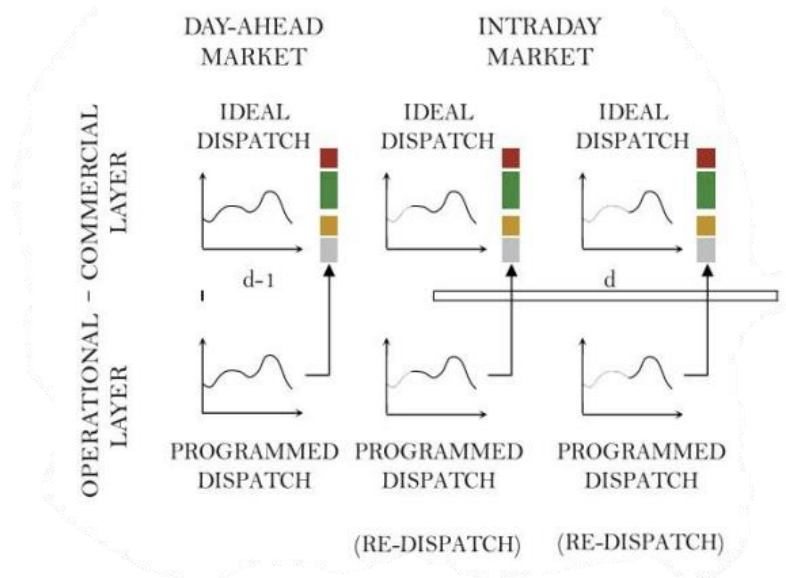


Figura 3-2. Ejemplo de despacho Intradiario
Fuente: Modificado de (Mastropietro et al., 2020)

Según lo anterior se obtendría como resultado un Despacho Real como el mostrado en la figura 3-3.

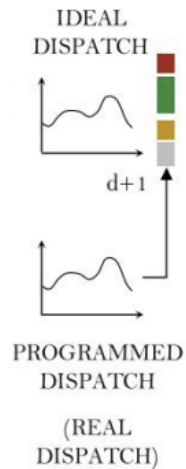


Figura 3-3. Ejemplo de Real luego de un despacho Intradiario.
Fuente: Modificado de (Mastropietro et al., 2020)

Según la circular CREG 011 del 2022 (CREG 2022) se establece que para el mediano plazo se estiman tener metodologías de remuneración y tarifación por bloques horarios y de mercados intradiarios en Colombia. En la tabla 3-2 se establecen los datos más relevantes de la circular CREG 011 del 2022:

Tabla 3-2. Hoja de ruta de la Respuesta de la Demanda.

Corto plazo (2022)	Mediano plazo (2022-23)	Largo plazo (2023-24)
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Resolución definitiva de la modificación y compilación de la DDV. ▪ Estudio de la actividad agregación de demanda. ▪ Análisis de continuidad del programa de RD crítica (Res. 011 de 2015). ▪ Integración en estudios de costo unitario y tarifas por bloques horarios (ToU). 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Activación de una demanda elástica en el MEM. ▪ Ofertas de reducción demanda de UNR en los mercados intradiarios. ▪ Participación directa de los usuarios no regulados en el MEM. ▪ Metodologías de remuneración y tarifación por bloques horarios. ▪ Análisis de otros programas de RD que puedan ser aplicables. ▪ Estudio de propuestas que formulen los agentes. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Participación directa de UNR en programas de RD. ▪ Desarrollo de modelos de recursos energéticos distribuidos, DER. ▪ Desarrollo de servicios complementarios en los SDL. ▪ Esquemas de agregación y comercialización de excedentes en el MEM (p.ej. plantas virtuales). ▪ Nuevos modelos de comercialización o transacciones minoristas de energía (energía transactiva, peer to peer).

Fuente: (CREG 2022)

En Colombia, se ha logrado un significativo avance en la hoja de ruta de la respuesta de la demanda, especialmente con la entrada en vigencia en el año 2023 de la resolución CREG 101 019 (CREG 2022a). Esta resolución representa un hito importante, ya que modifica y compila la regulación del anillo de seguridad del cargo por confiabilidad conocido como Demanda Desconectable Voluntaria (DDV). La principal novedad de esta resolución es la unificación de las fronteras comerciales para participar en la DDV a través de una sola modalidad denominada "Línea Base de Consumo". Esto simplifica el proceso para los agentes involucrados, proporcionando una estructura más clara y eficiente en términos de participación en el mercado de respuesta de la demanda.

Además, la resolución CREG 101 019 también introduce una importante mejora en el acceso a la información. Los agentes representantes ante la DDV ahora tienen la posibilidad de acceder de manera remota a la medida de los consumos de los usuarios. Esto permite una supervisión y gestión más precisa de los consumos y facilita la toma de decisiones informadas en relación con la respuesta de la demanda.

Estos cambios significativos en la DDV impulsan el desarrollo y la participación activa de los agentes en el mercado de respuesta de la demanda en Colombia. La unificación de las fronteras comerciales y el acceso remoto a la información de consumo brindan mayor claridad, eficiencia y transparencia en la operación de la DDV.

En resumen, aunque se ha logrado un avance significativo con la entrada en vigencia de la resolución CREG 101 019, el contexto de la hoja de ruta de la respuesta de la demanda en Colombia sigue en constante evolución. Los estudios continúan en progreso y existe una expectativa continua en relación con los próximos pasos y desarrollos que se llevarán a cabo en este campo estratégico

En este capítulo se abordó el cálculo del pago de desviaciones en Colombia, mostrando los criterios y fórmulas establecidos. También se abordó el proceso de redespacho y la opción de despachos intradiarios para adaptarse a situaciones imprevistas y se destacó la resolución CREG 101 019 del 2022 (CREG 2022-2) por su importancia en la hoja de ruta de la Respuesta de la Demanda. En el siguiente capítulo se presenta la revisión de literatura.

4. Revisión de literatura

La revisión de literatura se realizó con las bases de datos bibliográficas de resúmenes y citas de artículos de revistas científicas Scopus, Google Scholar y en intercambio de correos y consultas en páginas oficiales de los mercados de energía de los países seleccionados, se logró obtener manuales de operación de distintos mercados. En Scopus se realizó la búsqueda con la ecuación “(TITLE-ABS-KEY (deviations) AND TITLE-ABS-KEY (energy) AND TITLE-ABS-KEY (market) OR TITLE-ABS-KEY (dispatch) AND TITLE-ABS-KEY (liquidation) OR TITLE-ABS-KEY (settlement))”; dando como resultado de búsqueda 62 artículos para los años 2008 a 2023. En la tabla 4-1 se presenta un resumen de los detalles más importantes de los principales artículos de interés:

Tabla 4-1. Investigaciones de interés que se han realizado en relación a desviaciones.

Investigación	Resumen	Características	Países de investigación o mercados de referencia.
(Khazaei et al., 2017)	Se investiga los efectos del uso de un mecanismo estocástico de compensación del mercado que considera costos de desviaciones, penalizaciones e incertidumbre; en lugar de los mecanismos existentes en Nueva Zelanda.	Se calculan los equilibrios de Nash resultantes para cada uno de los dos mecanismos de mercado.	Nueva Zelanda
(Mastropietro et al., 2020)	Presenta una propuesta de liquidación múltiple para el mercado de energía colombiano, con sesiones intradiarias y mercado de balance.	Mercado diario, intradiario y de balance	Colombia
(Mohandes et al., 2021)	Propone un programa de Respuesta de la Demanda con un esquema de compensación basado en incentivos y con un contrato inteligente que asegure suficiente flexibilidad a un costo mínimo.	Compara resultados de flexibilidad de la RD ante diferentes condiciones del viento y estaciones del año (invierno, primavera, verano y otoño), fines de semana y días laborales.	Emiratos Árabes Unidos.
(Wang et al., 2021)	Se evalúan las relaciones cuantitativas entre la reducción de la incertidumbre y la mejora de la rentabilidad en el mercado, analizando la solución óptima bajo diferentes desviaciones estándar de demanda.	Toman datos de consumo de la Comisión de Regulación de Energía de Irlanda y los precios de electricidad de diferentes zonas de PJM.	Irlanda y PJM.

En Google Scholar se realizó la búsqueda con las palabras clave: deviations, energy market, dispatch, liquidation y settlement, obteniendo como resultado 11 artículos de revisión desde el año 2018, a

su vez se consultaron investigaciones adelantadas en mercados intradiarios y liquidaciones en Colombia. En la tabla 4-2 se presenta un resumen de las investigaciones de interés, resultantes de la búsqueda en Google Scholar.

Tabla 4-2. Investigaciones de interés encontradas en Google Scholar.

Investigación	Resumen	Características	Países de investigación o mercados de referencia.
(Jaramillo J 2017)	En este trabajo de investigación se realiza un análisis de las condiciones de operación del mercado de corto plazo de electricidad en Colombia, diseñando un mercado ajustado al sistema colombiano, comparado con mercados maduros de algunas regiones de Estados Unidos y Europa, las cuales cuentan con mercados intradiarios de energía	Mercado intradiario.	Estados Unidos, Europa y Colombia.
(Areiza, 2020)	Se presentan algunas alternativas que permiten diseñar un mercado eléctrico más competitivo en Colombia, basadas en el uso de herramientas que en otros mercados mundiales ya funcionan.	Revisión de mercados mundiales y aplicación a Colombia.	Colombia
(Duque G, 2021)	Presenta avances para la propuesta de un esquema remunerativo de mercado intradiario en Colombia, inicialmente se revisan las componentes del mercado eléctrico colombiano actual, seguidamente se realiza un análisis a los precios de bolsa y a los valores de las liquidaciones de energía para cada uno de los mecanismos propuestos.	Liquidación de múltiples puntas.	Colombia
(Rösch et al., 2021)	Presenta una propuesta para la implementación de mercados regionales de flexibilidad, analizando las oportunidades y riesgos.	Mecanismo de fijación de precios basado en Blockchain con acceso equitativo para consumidores, proveedores y operadores de red.	Alemania

Investigación	Resumen	Características	Países de investigación o mercados de referencia.
(Plaum et al., 2022)	El documento ofrece una descripción general de la caracterización de los métodos de flexibilidad energética por parte de la demanda y los principales retos de los agregadores.	Almacenamiento con baterías, calefacción y refrigeración, calor doméstico,	Estonia
(Kumaran Nalini et al., 2022)	Desarrollan un modelo de código abierto llamado OpenTUMFlex, para cuantificar y cotizar la flexibilidad de disminuir consumo por parte de la demanda.	Sistema de gestión de energía que optimiza los datos de los prosumidores para obtener un cronograma de operación rentable.	Alemania

Luego de realizar búsquedas en las bases de datos bibliográficas, se cruzaron correos electrónicos con los centros de atención de cada mercado de los países en evaluación, recibiendo manuales de operación, y bibliografía adicional. Los principales artículos, libros, manuales de interés se presentan en resumen en la tabla 4-3:

Tabla 4-3. Investigaciones de interés encontradas.

Investigación	Resumen	Características	Países de investigación o mercados de referencia.
(Von Meier, A. 2006)	El libro aborda temas fundamentales como la generación, transmisión, distribución y mercados de energía. Proporciona una visión general de los principios y conceptos clave en la industria eléctrica, incluyendo la operación y control de los sistemas eléctricos, la planificación de la infraestructura, la integración de fuentes de energía renovable y los desafíos asociados con la confiabilidad y la seguridad del suministro eléctrico.	Libro Canadienses	Global

Investigación	Resumen	Características	Países de investigación o mercados de referencia.
(Dong nan da xue. et al., 2008)	En PJM se implementa un mercado diario (Day-ahead) en el que se obtiene un día antes al día de operación, las ofertas de generación, demanda y cronogramas de transacciones bilaterales, eligiendo para un predespacho un cronograma diario utilizando el costo mínimo y analizando compromisos con restricciones de seguridad	Mercado intradiario PJM	Estados Unidos
(Flórez, M., Gómez, B., & García, J. 2016).	Aborda el tema de los esquemas de suficiencia en generación eléctrica y su aplicación en el mercado eléctrico de Colombia. El estudio realiza un análisis comparativo de diferentes esquemas utilizados en otros países y reflexiona sobre su relevancia para el contexto colombiano	Mercado Colombiano	Colombia
(Echeverri, D., Correa, M., Rendon, J. G., & Submitter, C., 2019)	PJM es una entidad que respalda varios estados de los Estados Unidos en el cálculo y administración de desviaciones en el suministro eléctrico. Utiliza la Administración de Desvíos (AD) o regulaciones de frecuencia para comparar la energía programada con la energía generada y los consumos diarios.	PJM	Estados Unidos
(CAISO BPM for Market Operations, 2020)	Manual que establece los procedimientos y reglas para las operaciones del mercado en CAISO El manual abarca diversos aspectos, como la programación de la generación, la administración de la energía y los servicios auxiliares, y la liquidación de transacciones comerciales.	CAISO	Estados Unidos
(Uribe et al., 2020)	Se centra en analizar la integración del mercado de electricidad en Nord Pool. Nord Pool es un mercado de energía eléctrica que abarca varios países de Europa. El estudio busca caracterizar el nivel de integración y la eficiencia del mercado, considerando aspectos como la convergencia de precios, la transmisión de electricidad y la interacción entre los países participantes.	NORD POOL	Europa

Investigación	Resumen	Características	Países de investigación o mercados de referencia.
(Dispatch PJM, 2022)	En el mercado de regulación de PJM, los recursos participantes deben responder de forma inmediata a las señales, alcanzar su capacidad de oferta en cinco minutos y ajustar su generación o consumo según las especificaciones de PJM. Estas medidas aseguran una respuesta rápida y eficiente de los recursos, equilibrando la oferta y la demanda en el despacho de energía.	PJM	Estados Unidos
(NORD POOL, 2022).	Nord Pool Group es un proveedor líder de mercados de energía eléctrica en Europa. Fundada en 1996, la compañía opera mercados de electricidad y certificados de origen en varios países, incluyendo Noruega, Suecia, Finlandia, Dinamarca, Estonia, Letonia y Lituania.	NORD POOL	Europa
(Day-Ahead and Real-Time Market Operations PJM, 2023).	Se trata de un manual de operaciones de PJM, se mencionan diferentes etapas y procesos, como el cierre del periodo de oferta, la determinación de cronogramas de compromiso, el cálculo del perfil de recursos, la publicación de horarios y precios, la apertura del periodo de oferta en tiempo real, el cierre del periodo de oferta de energía en tiempo real, el envío de ofertas revisadas y la notificación de desviaciones.	Mercado intradiario PJM	Estados Unidos
(PJM Market Settlements Development Department, 2023)	El manual de operaciones de PJM es un documento que proporciona información y pautas para el desarrollo de liquidaciones en el mercado. Describe los procesos y procedimientos necesarios para calcular y liquidar transacciones comerciales de energía eléctrica, capacidad y servicios auxiliares. El manual también aborda temas como la administración de desvíos, la reconciliación de pagos y las políticas de tarifas.	PJM	Estados Unidos

De la búsqueda bibliográfica se resaltan temas importantes como:

- Los contratos automáticos para las compras de reducciones de consumo, que ayudan a aumentar la eficiencia en la compra y venta de energía eólica, en remuneración y penalizaciones por déficit de disminuciones de consumo. (Mohandes et al., 2021).
- Un modelo de liquidación estocástica de penalizaciones con desviación fija puede ser más conveniente para la compra y venta de energía, según el funcionamiento actual del mercado de energía en Nueva Zelanda, dado que la penalización se elige de manera adecuada, en un intervalo que incluye los costos de desviaciones reales. (Khazaei et al., 2017).
- La acción conjunta de los productores de energía y los operadores de la red podría dar paso a un mercado de electricidad más eficiente que conduzca al logro de los objetivos integrales de sostenibilidad (Rösch et al., 2021)
- Un mecanismo de liquidación adecuado para Colombia es de múltiples puntas, el cual consiste en comparar múltiples programas de despacho y establece diferencias entre la asignación realizada por cada sección del mercado y su asignación previa, teniendo así diferencias entre asignaciones que puede tener un recurso en cada periodo durante el día de operación, y estas diferencias pueden ser pagados o cobrados a distintos precios de bolsa, reconciliación positiva o reconciliación negativa. (Duque Gonzalez, R 2021)
- PJM es una entidad que respalda varios estados de los Estados Unidos en el cálculo y administración de desviaciones en el suministro eléctrico. Utiliza la Administración de Desvíos (AD) o regulaciones de frecuencia para comparar la energía programada con la energía generada y los consumos diarios. (Echeverri, D., Correa, M., Rendon, J. G., & Submitter, C., 2019)
- El mercado intradiario de PJM implementa un mercado diario (Day-ahead) en el que se obtienen las ofertas de generación, demanda y cronogramas de transacciones bilaterales para el día siguiente. Se utiliza un algoritmo de predespacho para determinar un cronograma diario óptimo, minimizando los costos y considerando las restricciones de seguridad. (Dong nan da xue. et al., 2008):

Según la revisión de literatura realizada, se observan avances de investigación en mercados intradiarios, respuesta de la demanda, flexibilidades y mercados de balance en la última década. Esto genera avances positivos en relación al mejor uso del recurso energético mundial. En el siguiente capítulo se presentan los objetivos principales para la realización del presente trabajo, posteriormente se presenta la metodología implementada para el alcance de los mismos.

5. Objetivos y metodología

5.1. Objetivo General.

- Proponer una alternativa para el manejo de las desviaciones en un despacho intradiario en Colombia.

5.2. Objetivos Específicos.

- Identificación de esquemas de manejos de desviaciones, en países seleccionados.
- Seleccionar un conjunto de esquemas de desviaciones identificados para ser evaluados.
- Evaluar estrategias de mitigación de penalidad por desviaciones por parte de un Agente Generador, para los esquemas seleccionados.

5.3. Metodología

5.3.1. Fase 1. Objetivo específico 1.

Con el fin de identificar esquemas del manejo de desviaciones, se realizó una selección de países para identificar la forma de realizar liquidaciones, pagos o penalizaciones por desviaciones en los compromisos de generación por parte de Agentes Generadores.

5.3.2. Fase 2. Objetivo específico 2.

Luego de identificar el funcionamiento de los esquemas de desviaciones en algunos países, se buscó un criterio de decisión para la selección un conjunto de características en común, para que posteriormente compararlas entre sí.

5.3.3. Fase 3. Objetivo específico 3.

Para el conjunto de esquemas seleccionados se realizó una búsqueda de documentación regulatoria, caracterizando despachos económicos de energía eléctrica y formas de calcular desviaciones. Lo anterior con el fin de evaluar estrategias de mitigación de penalidad por desviaciones por parte de un Agente Generador en los países seleccionados.

5.3.4. Fase 4. Objetivo General

Se identificaron avances regulatorios para la implementación del despacho intradiario en Colombia, con el fin de caracterizar su funcionamiento y se propone una alternativa para el manejo de

desviaciones bajo esta caracterización, incluyendo un esquema estimado remunerativo para el manejo de desviaciones ante un mercado intradiario, con tiempos requeridos, beneficios obtenidos y penalización estimada ante el incumplimiento.

En el siguiente capítulo se identifican esquemas de manejo de desviaciones en países seleccionados.

6. Esquemas de manejo de desviaciones

6.1. Identificación de esquemas de manejos de desviaciones, en países seleccionados.

Para la selección de los países de este estudio se consideraron diversos factores para garantizar una representación adecuada de diferentes regiones y sistemas eléctricos. Estados Unidos fue seleccionado debido a su importancia como una de las economías más grandes y por su experiencia en la gestión de desviaciones. Nord Pool se incluyó por ser el mercado eléctrico más desarrollado de Europa y su reputación en eficiencia y transparencia en el manejo de desviaciones. Australia fue elegida por su transformación en el sector energético y su enfoque en la integración de energías renovables. Brasil, por su parte, fue seleccionado como un país en desarrollo con una relevancia significativa en la generación hidroeléctrica y otras fuentes renovables. Estos países representan una combinación diversa que permitirá obtener una visión global y comparativa de los esquemas de manejo de desviaciones. En resumen el conjunto de países seleccionado es:

- Estados Unidos (PJM y CAISO)
- Nord Pool (Noruega, Suecia, Finlandia, Dinamarca, Estonia, Letonia y Lituania)
- Australia.
- Brasil.

6.1.1. Estados Unidos.

En Estados Unidos existen diferentes mercados de energía eléctrica, a continuación, se mencionan algunos de los más importantes:

- PJM (Pennsylvania-Jersey-Maryland Interconnection): Es el mercado de energía que abarca Nueva Jersey, Pensilvania, Maryland, Virginia y otros estados de la costa este. PJM cubre gran parte de la costa este de EE.UU y se destaca por ser uno de los más desarrollados, grandes y complejos, con una capacidad instalada de 186 GW (PJM, 2022; IEA, 2021).
- CAISO (California Independent System Operator): Se trata de un mercado de energía de la Costa Oeste, que cubre una extensa área en California, así como partes de Nevada y Arizona. Este mercado se caracteriza por su enfoque avanzado en el uso de energías renovables, con más del 30% de la energía generada proveniente de fuentes renovables. En el año 2022, la capacidad instalada de CAISO fue de aproximadamente 72 GW, sin incluir la generación distribuida (CAISO, 2022).
- NYISO (New York Independent System Operator): Este mercado de energía abarca Nueva York y una parte de New Jersey. Su enfoque se centra en el mercado de capacidad, buscando garantizar la suficiente capacidad de generación mediante mecanismos de incentivos para

satisfacer la demanda en momentos de alta exigencia. Actualmente, cuenta con una capacidad instalada de alrededor de 44,7 GW (NYISO, 2021).

- ISO-NE (ISO New England): Este mercado de energía engloba los estados de Nueva Inglaterra, que incluyen Connecticut, Maine, Massachusetts, New Hampshire, Rhode Island y Vermont. Se caracteriza por su enfoque en la capacidad de reserva y la integración de energías renovables. ISO-NE cuenta con una capacidad instalada de aproximadamente 30 GW (ISO-NE, 2022).
- ERCOT (Electric Reliability Council of Texas): Este mercado de energía cubre la mayor parte de Texas y se destaca por ser un mercado aislado del resto del país. ERCOT es el mercado más grande de EE.UU., con una capacidad instalada de alrededor de 100 GW (ERCOT, 2022).

Teniendo en cuenta lo anterior, en las secciones 6.1.2. y 6.1.3. Se profundizará en la liquidación de desviaciones en los mercados PJM y CAISO para el caso de Estados Unidos.

6.1.2. Desviaciones en PJM.

En PJM se implementa un mercado diario (Day-ahead) en el que se obtiene un día antes al día de operación, las ofertas de generación, demanda y cronogramas de transacciones bilaterales, eligiendo para un predespacho un cronograma diario utilizando el costo mínimo y analizando compromisos con restricciones de seguridad (Dong nan da xue. et al., 2008) En la Figura 6-1 se observa la secuencia nominal para el análisis del despacho:

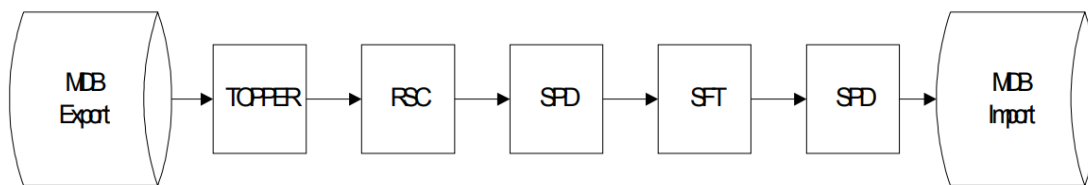


Figura 6-1. Secuencia nominal para el análisis del despacho en PJM.

Fuente (Dong nan da xue. et al., 2008)

Siendo:

- Export (Market Data Base/MDB): Se refiere a la base de datos del mercado, que almacena la información relevante en formato de archivo CSV (separado por comas). Esta base de datos proporciona los datos necesarios para el análisis y la toma de decisiones.
- TOPPER (Transmission Open Python for Power Engineering Research): Es un sistema de conversión de modelo de red. Su función principal es convertir los datos provenientes de la base de datos en formato CSV, facilitando su posterior procesamiento y análisis.

- RSC (Unit commitment and de-commitment S): Se refiere al compromiso y liberación de unidades. En este proceso, se determina qué unidades de generación se comprometen a estar disponibles y cuáles se liberan según la demanda y las restricciones operativas.
- PD (Optimal Economic Dispatch and Power Flow): Es el proceso de despacho económico y flujo de potencia óptimo. En esta etapa, se optimiza la generación y el flujo de energía en la red eléctrica, teniendo en cuenta los costos y las restricciones operativas.
- SFT (Security-Constrained Contingency Analysis): Es un análisis de contingencia que evalúa la seguridad y la estabilidad del sistema eléctrico ante posibles fallas o contingencias. Se consideran diversas situaciones adversas y se buscan soluciones para mantener la operación segura y confiable.
- SPD (Security-Constrained Power Dispatch): Es un proceso en el que se reenvía la información con restricciones de seguridad adicionales según las necesidades del usuario. Se garantiza que las decisiones de despacho sean coherentes con los límites operativos y las restricciones de seguridad establecidas.
- Import: Es el proceso de carga de los resultados obtenidos en los diferentes análisis y cálculos realizados anteriormente. Los datos procesados se importan para su posterior uso y análisis.

El cronograma de PJM para programar el despacho del día siguiente tiene como objetivo establecer los plazos y procedimientos que deben seguirse en PJM para garantizar una operación eficiente y confiable del sistema eléctrico. A continuación, se presenta el cronograma detallado:

- Cierre del periodo de oferta del mercado diario: A las 11:00 a.m., se cierra el periodo de oferta del mercado diario. Todas las ofertas deben presentarse antes de esta hora, el día anterior al día de operación. En este momento, PJM determina los cronogramas de compromiso por hora y el precio marginal (LMP) para calcular el perfil de compromiso de recursos y cubrir la demanda. Se tienen en cuenta reducciones de demanda compensadas y reservas operativas (Day-Ahead and Real-Time Market Operations PJM, 2023).
- Publicación de horarios diarios y LMP: Antes de las 1:00 p.m., PJM publica los horarios diarios por hora y los LMP. Estos datos están disponibles para su descarga a través del Markets Gateway System o un enlace de comunicación con los participantes (Day-Ahead and Real-Time Market Operations PJM, 2023).
- Apertura del periodo de oferta del mercado en tiempo real: Después de la publicación de PJM y antes de las 2:15 p.m., se abre el periodo de oferta del mercado de energía en tiempo real. Durante este periodo, los participantes del mercado pueden presentar ofertas

revisadas. Sin embargo, aquellos participantes programados en el mercado del día siguiente no pueden cambiar el estado de sus ofertas (Day-Ahead and Real-Time Market Operations PJM, 2023).

- Cierre del periodo de oferta de energía en tiempo real: A las 2:15 p.m., se cierra el periodo de oferta de energía en tiempo real. En este momento, PJM realiza un segundo compromiso de recursos conocido como Evaluación y Compromiso de Confiabilidad (RAC). Además, se actualiza el pronóstico de carga y la desviación del pronóstico de carga. PJM también puede ejecutar compromisos de recursos adicionales en esta etapa (Day-Ahead and Real-Time Market Operations PJM, 2023).
- Envío de ofertas de recursos revisadas: A partir de las 6:30 p.m. (normalmente después de completar la evaluación de confiabilidad) y hasta sesenta y cinco (65) minutos antes de la hora de operación, los participantes pueden enviar ofertas de recursos revisadas a PJM (Day-Ahead and Real-Time Market Operations PJM, 2023).
- Notificación de desviaciones: Los participantes tienen un máximo de cuarenta y cinco (45) minutos antes de la operación programada del recurso para notificar las desviaciones a PJM (Day-Ahead and Real-Time Market Operations PJM, 2023).

PJM implementa Despacho Intradiario para igualar la demanda instantánea con la generación instantánea, operando en tiempo real para buscar el equilibrio. Este mercado está abierto a distintos participantes y es ajustado según oferta y demanda segundo a segundo. Los precios en el mercado en tiempo real en PJM, están determinados por el despacho económico, calculados a intervalos de cinco minutos y se publican en el sitio web de PJM. Las transacciones se liquidan cada hora y se emiten facturas a los participantes, mensualmente. (Dong nan da xue. et al., 2008).

La entidad encargada de la carga se denomina LSE, por sus siglas en inglés "Load Serving Entity" la cual paga el precio marginal (LMP) a los generadores, por cualquier demanda que exceda las cantidades programadas para el día siguiente, estos generadores reciben ingresos por desviaciones de la demanda, en caso de que la demanda este por debajo de las cantidades programadas y pagan por las desviaciones de generación, en caso de que estas resulten en que la generación está por debajo de sus cantidades programadas, los usuarios pagan las tarifas de congestión por las desviaciones de la cantidades de transacciones bilaterales de los horarios del día siguiente. Todas las compras y ventas del mercado en tiempo real, se liquidan a precios en tiempo real (Dong nan da xue. et al., 2008).

PJM opera dos mercados de servicios complementarios: Regulación y reserva sincronizada, el servicio complementario de regulación ajusta los cambios a corto plazo en el uso de electricidad, que pueden amenazar la estabilidad del sistema, busca nivelar la generación y la carga, ajustando

la generación de salida para mantener la frecuencia deseada. Las entidades del servicio de carga denominadas ELe por sus siglas en inglés Load Serving Entities, pueden comprar energía con contratos a través del servicio de reserva sincronizada, si así es requerido, para suministrar electricidad si la red tiene necesidades inesperadas en poco tiempo (Dong nan da xue. et al., 2008).

En PJM, se encuentra un mercado de regulación gestionado por PJM RTO (Regional Transmission Organization, por sus siglas en inglés), la cual tiene la autoridad para regular y equilibrar el despacho de energía en PJM. El objetivo de este mercado es contar con recursos que puedan suplir desviaciones y ajustar la oferta y la demanda del despacho. Para lograr una regulación eficiente del despacho, es necesario que los recursos de generación que participen en este mercado estén equipados con un sistema de Control Automático de Generador (AGC, por sus siglas en inglés). Este sistema permite a los recursos recibir, procesar y responder a las señales de encendido o apagado de acuerdo con los parámetros requeridos por PJM. Asimismo, los recursos de respuesta de la demanda que participen en la regulación deben contar con un sistema de control similar.

Es importante destacar que todos los recursos participantes deben ser capaces de responder de manera inmediata a las señales, alcanzar su capacidad de oferta en un plazo máximo de cinco minutos y ajustar su capacidad de generación o consumo de acuerdo con las especificaciones proporcionadas por PJM. Estas medidas garantizan que los recursos disponibles en el mercado de regulación puedan responder de manera rápida y eficiente, contribuyendo así al equilibrio entre la oferta y la demanda en el despacho de energía en PJM. Esta regulación es fundamental para mantener la estabilidad y confiabilidad del sistema eléctrico (Dispatch PJM, 2022).

PJM Interconnection es un sistema eléctrico que brinda soporte a varios estados de Estados Unidos. En el cálculo de las desviaciones en PJM, se utiliza la Administración de Desvíos (AD) o las Regulaciones de Frecuencias. Este proceso implica la comparación entre la energía programada y la energía generada diariamente, así como los consumos. Las desviaciones identificadas se liquidan mediante un proceso de reconciliación que incluye pagos definidos por PJM. De esta manera, se garantiza una gestión eficiente de las desviaciones y se asegura la estabilidad del sistema eléctrico en la región.

La idea de PJM es mantener estable el sistema de suministro eléctrico y garantizar que las redes se encuentren estables. En ocasiones se presentan fluctuaciones de las frecuencias derivadas de las desviaciones presentadas, El valor normal de operaciones estables es de aproximadamente 60Hz, en este sentido se pueden utilizar plantas generadoras de energía que responden inmediatamente a los paneles o señales de los controles, en algunos casos los servicios auxiliares ofrecen la manera de regular la frecuencia en tiempo real. De esta manera se equilibran las desviaciones para que se establezca el suministro. (Echeverri, D., Correa, M., Rendon, J. G., & Submitter, C., 2019). Los recursos asignados para participar en el mercado de regulación, deben tener la capacidad de generar o disminuir consumo de al menos el doble de lo que PJM le asigne, tal como se muestra en la figura 6-2.

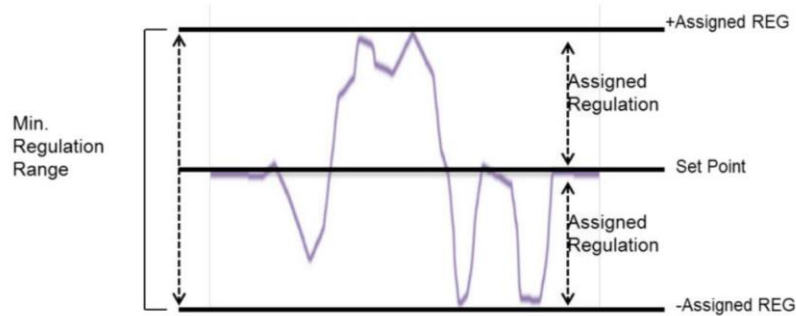


Figura 6-2. Ejemplo de capacidad de regulación de los recursos.

Fuente: (Dispatch PJM, 2022)

La Entidad Responsable de la Carga (LSE) en PJM es la encargada de determinar el requerimiento de regulación de carga para cada hora. Este requerimiento puede ser satisfecho de diferentes maneras: mediante recursos auto programados que estén listos para generar o reducir consumo, a través de transacciones bilaterales con otros agentes o mediante compras en el Mercado de Regulación. A continuación, se describe el proceso para la regulación:

- a) PJM notifica a los Titulares de Transmisión y a los titulares de Generación el requerimiento de regulación a través de PJM ALL CALL. Esta notificación incluye la cantidad de energía requerida y la duración esperada para cumplir con la regulación.
- b) Los propietarios de los recursos que participan en la regulación pueden ver los resultados del mercado de regulación media hora antes de la hora de operación a través de Markets Gateway. En caso de que los propietarios tengan recursos auto programados, deben informar a PJM cuando esos recursos estén en línea y operando.

Estos pasos permiten que los participantes en el mercado de regulación estén informados sobre los requerimientos y los resultados del proceso. Así, se facilita la coordinación y el cumplimiento de la regulación de carga en PJM, contribuyendo a mantener un despacho eficiente y equilibrado (Dispatch PJM, 2022).

PJM realiza el cálculo de desviaciones para cada hora del día de operación, dependiendo del suministro energético programado, en este cálculo se encuentran los límites que se establecen según las programaciones de las generaciones y los consumos, en este sentido si hay ajustes se pueden presentar penalizaciones.

Las tolerancias en PJM pueden variar según el intervalo de tiempo considerado y se definen en términos de desviaciones permitidas en la generación y el consumo de energía. Estas desviaciones se determinan sumando el valor absoluto de las desviaciones en intervalos de cinco minutos durante la hora, y luego dividiendo esta suma en doce partes iguales para los recursos de generación individuales. Se considera una evaluación de desviación cuando existe una diferencia del diez por ciento (10%) entre la generación esperada y la generación real. Esto activa la evaluación en tiempo

real de dichos recursos. Sin embargo, hay una excepción: si la suma total de las desviaciones en intervalos de cinco minutos, dividida en doce partes, es inferior a 5 MWh para una hora determinada, ese recurso de generación no se considera una desviación y no es evaluado como tal.

Es importante destacar que este cálculo de desviaciones se realiza por región, lo que permite la compensación dentro de cada ubicación. Este proceso se aplica a todos los recursos que participan tanto en el despacho diario como en el tiempo real, asegurando así un seguimiento preciso y eficiente de las desviaciones de generación en PJM (PJM Market Settlements Development Department, 2023).

PJM calcula el costo a cobrar por las desviaciones para cada región y para todos los participantes del Mercado PJM. Este cálculo se basa en la participación diaria de cada participante en la suma de desviaciones de intervalo de 5 minutos, y se realiza de la siguiente manera:

$$\text{Costo de desviaciones por región} = \text{Total del balance operativo} \times \text{Total de MW desviados. (\$)}$$

(Ecuación 6-1)

Las facturaciones por los desvíos se llevan a cabo dos meses después de la operación, ya que las Empresas de Distribución Eléctrica (EDC) tienen la responsabilidad de proporcionar los datos de conciliación de desviaciones a PJM. Estos datos deben ser enviados a más tardar el último día del mes de facturación, es decir, dos meses después del mes de operación. Por ejemplo, todos los datos de conciliación correspondientes a enero deben ser enviados antes del 31 de marzo a las 23:59.

Este proceso de facturación permite que las Empresas de Distribución Eléctrica (EDC) proporcionen los datos necesarios para calcular el costo de los desvíos y realizar una facturación precisa y oportuna en el Mercado PJM. (PJM Market Settlements Development Department, 2023).

6.1.2.1. Desviaciones en CAISO.

En CAISO (California Independent System Operator), las desviaciones son calculadas en el mercado de tiempo real (RTM), el cual se encarga de comprar y vender energía y servicios de ajuste de carga en tiempo real para asegurar la estabilidad del sistema eléctrico. El RTM de CAISO funciona de manera paralela al mercado diario, conocido como "Day-Ahead Market" o Mercado del Día Siguiente. En el Day-Ahead Market, los participantes tienen la oportunidad de presentar sus ofertas y demandas para el día siguiente. Estas ofertas y demandas son procesadas y evaluadas para determinar los programas de generación y consumo.

Por otro lado, en el RTM, las ofertas y demandas se presentan y se gestionan en tiempo real, lo que permite ajustar y equilibrar la generación y el consumo en función de las condiciones y demandas actuales del sistema eléctrico. Ambos mercados, el Day-Ahead Market y el RTM, desempeñan un papel crucial en la operación eficiente y confiable del sistema eléctrico de CAISO. El Day-Ahead Market permite la planificación anticipada y la asignación de recursos, mientras que el RTM asegura la capacidad de respuesta inmediata y los ajustes en tiempo real para mantener el equilibrio y la estabilidad del sistema (CAISO BPM for Market Operations, 2020).

Las desviaciones en CAISO se gestionan a través de recursos de generación equipados con control automático (AGC), lo que permite corregir los desequilibrios a corto plazo. Estas desviaciones se clasifican en cuatro categorías:

- Energía de desequilibrio instruida por el Forward Market Mitigation (FMM): Esta categoría se refiere a la energía que se desvía de las instrucciones establecidas por el FMM, el cual es responsable de supervisar las ofertas y los precios en el mercado futuro. Su objetivo es garantizar que el mercado de Forwards funcione de manera justa y transparente.
- Energía de desequilibrio instruida por despacho en tiempo real (Real Time Dispatch, RTD): Aquí se incluye la energía que se desvía de las instrucciones establecidas por el despacho en tiempo real. El RTD es el proceso mediante el cual se realiza el despacho y la programación de la generación y el consumo en tiempo real, ajustándose a las condiciones y demandas actuales del sistema eléctrico.
- Energía de desequilibrio no instruida: Esta categoría abarca las desviaciones que no están previstas en las instrucciones del despacho. Puede deberse a errores en los pronósticos de demanda, interrupciones forzadas, contingencias, comportamiento estratégico o incumplimiento de las instrucciones del despacho.
- Energía de desequilibrio no contabilizada: Esta categoría se refiere a la energía que no puede ser contabilizada en el mercado de balance de energía de CAISO. Puede ser el resultado de errores de medición, pérdidas en las líneas de transmisión o problemas de coordinación entre los distintos sistemas de medición.

Estas categorías permiten identificar y gestionar las diferentes fuentes de desviaciones en el sistema eléctrico de CAISO, asegurando un equilibrio y una operación eficiente en el mercado de energía (CAISO BPM for Market Operations, 2020).

El proceso de liquidación y cálculo de desviaciones en CAISO se lleva a cabo de la siguiente manera:

- a) Programación de la generación y la demanda: Antes del inicio del período de operación, CAISO programa la generación y la demanda de energía para cada hora del día, considerando las previsiones de demanda y la disponibilidad de recursos de generación.
- b) Monitoreo en tiempo real: Durante el período de operación, CAISO realiza un seguimiento continuo de la generación y la demanda de energía en tiempo real para identificar cualquier desviación con respecto a la programación establecida.
- c) Desviaciones de energía: Si la generación de energía difiere de la programación o si la demanda de energía es diferente de lo previsto, se producen desviaciones de energía. Estas desviaciones pueden ser positivas o negativas, dependiendo de si la generación es mayor o menor que la programación, o si la demanda es menor o mayor que lo previsto.
- d) Precio marginal: CAISO calcula un precio marginal de energía en tiempo real, el cual se utiliza como referencia para liquidar todas las transacciones en el mercado de energía.

- e) Liquidación de desviaciones: Al finalizar cada hora de operación, CAISO realiza la liquidación de las desviaciones de energía utilizando el precio marginal de energía. Si un participante del mercado tiene una desviación positiva, se le paga el precio marginal de energía multiplicado por la cantidad de energía desviada. En el caso de una desviación negativa, el participante debe pagar el precio marginal de energía multiplicado por la cantidad de energía desviada.
- f) Informe de resultados: Después de la liquidación, CAISO proporciona a los participantes del mercado un informe que detalla sus desviaciones y los resultados de la liquidación, permitiendo una mayor transparencia y rendición de cuentas.

Este proceso garantiza que las desviaciones sean controladas y compensadas adecuadamente, asegurando la eficiencia y estabilidad del sistema eléctrico en CAISO (CAISO 2023, 2023).

A continuación, se muestra un ejemplo numérico del cálculo de desviaciones en CAISO, asumiendo los valores de la Tabla 6-1 :

Tabla 6-1. Cifras para cálculo de desviaciones en CAISO

Descripción	Cantidad	Unidades
Generación programada	1000	MWh
Generación real	950	MWh
Demanda programada	900	MWh
Demanda real	920	MWh
Precio marginal de energía	50	\$/MWh

- Desviación de generación: La generación real es menor que la generación programada, lo que resulta en una desviación negativa de 50 MWh (1000 MWh - 950 MWh = -50 MWh).
- Desviación de demanda: La demanda real es mayor que la demanda programada, lo que resulta en una desviación positiva de 20 MWh (920 MWh - 900 MWh = 20 MWh).
- Ajuste de desviación de generación: $-50 \text{ MWh} * \$50/\text{MWh} = -\$2,500$
- Ajuste de desviación de demanda: $20 \text{ MWh} * \$50/\text{MWh} = \$1,000$

Es decir que la liquidación de desviaciones es:

- Participante con desviación negativa: Deberá pagar \$2,500 (ajuste de desviación de generación) en su cuenta de liquidación.
- Participante con desviación positiva: Recibirá un crédito de \$1,000 (ajuste de desviación de demanda) en su cuenta de liquidación.

La tolerancia para las desviaciones de energía se establece en un 5% de la carga programada en cualquier intervalo de quince minutos. Esto significa que, si la cantidad de energía entregada o consumida en un intervalo de quince minutos se encuentra dentro del 5% de la cantidad de energía

programada para ese intervalo, no se aplicará ninguna penalización por desviación. Sin embargo, si la desviación supera el 5%, se aplicarán cargos por desviación y se liquidarán de acuerdo con el proceso de liquidación de desviaciones de CAISO (CAISO 2023, 2023).

6.1.3. Desviaciones en Nord Pool (Europa).

Nord Pool se posiciona como el principal mercado eléctrico de Europa, especializado en la negociación y comercio de energía eléctrica. Desde su fundación en 1996, ha expandido sus operaciones a varios países de la región nórdica y báltica, entre ellos Noruega, Suecia, Finlandia, Dinamarca, Estonia, Letonia y Lituania. Además, cuenta con una presencia significativa en el mercado alemán. La plataforma de negociación y liquidación de Nord Pool ofrece a los productores de energía, consumidores, traders y otros actores del mercado eléctrico la oportunidad de participar en subastas y establecer contratos bilaterales. Esto les permite ajustar sus posiciones de acuerdo con la oferta y la demanda en tiempo real, facilitando así la compra y venta eficiente de energía eléctrica (Flatabo et al., 2003).

En Nord Pool, el sistema de mercado del equilibrio, conocido como "Balancing Market", se utiliza para comparar la energía programada con la energía real generada y consumida. Las desviaciones resultantes se liquidan mediante contratos balanceados y tarifas establecidas por Nord Pool (Carrero, S., & Vergel, L., 2010).

Además de su papel en la comercialización de energía eléctrica, Nord Pool ofrece una amplia gama de servicios que abarcan la gestión del equilibrio de la red y la compensación de desviaciones entre la producción y el consumo programado de energía. En su misión de promover un mercado energético eficiente y competitivo, Nord Pool se distingue por fomentar la transparencia, la competencia y la cooperación regional. Nord Pool se destaca como uno de los mercados eléctricos más avanzados y desarrollados, su modelo de mercado ha sido tomado como referencia por otros mercados eléctricos tanto en Europa como en el ámbito global. Su enfoque innovador y su compromiso con la excelencia han consolidado su reputación como líder en el sector, al tiempo que contribuyen al crecimiento y la evolución de la industria energética en Europa (NORD POOL 2022) .

Es importante destacar que Nord Pool es una entidad independiente y su funcionamiento está regulado por las autoridades energéticas de los países en los que opera, así como por la legislación y regulaciones pertinentes en cada uno de ellos (NORD POOL 2022).

En el mercado de energía NORD POOL, las desviaciones se calculan utilizando el concepto de "imbalances" o desequilibrios. Los desequilibrios se producen cuando la energía generada o consumida difiere de la energía programada (NORD POOL 2022) y el ajuste de energía es el mecanismo utilizado para equilibrar la oferta y la demanda de energía, en el tiempo inmediato o real, cada operador de país se encarga de hacer los procesos establecidos y mantener dicho equilibrio. (Carrero, S., & Vergel, L., 2010). En NORD POOL, existen diferentes tipos de desviaciones y tolerancias, dependiendo del mercado y el período de tiempo considerado. A continuación, se presentan algunos ejemplos:

- Mercado de Día Anterior (Day-Ahead Market):
 - Margen de Tolerancia para los productores de energía: Permite una variación del $\pm 15\%$ respecto a la energía programada.
 - Margen de Tolerancia para los consumidores de energía: Permite una variación del $\pm 15\%$ respecto a la energía programada.
 - Ejemplo: Si un agente generador programa generar 100 MWh y efectivamente genera 95 MWh, se produciría una desviación del 5% y no se aplicarían penalizaciones. Sin embargo, si el productor generara 110 MWh, se produciría una desviación del 10%, lo cual podría implicar una penalización.

- Mercado Intradiario (Intraday Market):
 - Margen de Tolerancia para los productores y consumidores: Permite una variación del $\pm 15\%$ respecto a la energía programada.
 - Ejemplo: Si un productor programa generar 50 MWh y efectivamente genera 45 MWh, se produciría una desviación del 10% y no se aplicarían penalizaciones. Si la generación fuera de 40 MWh, se produciría una desviación del 20% y podría haber una penalización.

Es importante tener en cuenta que los ejemplos anteriores son solo ilustrativos y las tolerancias pueden variar según la región y el período de tiempo específicos en Nord Pool. Las penalizaciones por desviaciones se establecen en función de las tarifas y los mecanismos de ajuste definidos por el operador del mercado, y pueden implicar costos adicionales o compensaciones financieras.

En el momento en que se detecta la posibilidad de desviaciones, los operadores inmediatamente procuran hacer las correcciones en el menor tiempo posible, dentro de las acciones que se toman están las activaciones de las reservas, el uso de las diferentes interconexiones y se colabora con los demás países tanto para realizar exportaciones o en su defecto para realizar importaciones, especialmente la demanda se compromete a minimizar consumos en momentos de criticidad, por ejemplo la industria participa activamente. (Carrero, S., & Vergel, L., 2010).

También se realizan transacciones específicas relacionadas con las correcciones de dichas desviaciones. Este es uno de los mercados más dinamizados en el sector. Nord Pool, involucra también dentro de su sistema todas las energías renovables existentes. (Carrero, S., & Vergel, L., 2010).

6.1.4. Desviaciones en Australia.

Según el Australian Energy Market Operator (AEMO), la entidad responsable de la operación y administración del Mercado Nacional de Electricidad (National Electricity Market, NEM), las desviaciones se liquidan a través del Proceso de Liquidación del Mercado (Market Settlement Process).

Durante este proceso, se calculan y ajustan las transacciones de energía para garantizar el equilibrio entre la oferta y la demanda, así como para garantizar el cumplimiento de las obligaciones de los participantes en el mercado (AEMO, 2023).

La liquidación de las desviaciones se basa en el concepto de Precio de Desviación (Deviation Price), que es el precio al que se liquida la diferencia entre la energía programada y la energía real entregada o consumida. El Precio de Desviación se establece para cada intervalo de tiempo y puede ser positivo o negativo, reflejando el exceso o déficit de energía en comparación con la programación. (Arriaga, J., Sánchez, L., & de Tembleque, M.)

El cálculo de las desviaciones y los precios correspondientes involucra una serie de factores, como las ofertas y demandas de energía, las restricciones de red, los costos de generación y los precios máximos y mínimos establecidos por el regulador. Estos cálculos se llevan a cabo dentro del marco regulatorio establecido por la Australian Energy Market Commission (AEMC) y se realizan de acuerdo con las reglas y procedimientos del Mercado Nacional de Electricidad (NEM).

En el NEM de Australia, las desviaciones se calculan y liquidan en diferentes horizontes de tiempo, incluyendo el mercado en tiempo real. En el mercado en tiempo real (intradía), las desviaciones se calculan y liquidan en intervalos de cinco minutos, esto significa que los ajustes se realizan en tiempo real para garantizar el equilibrio de la oferta y la demanda de electricidad, en el mercado diario. El Australian Energy Market Operator (AEMO) establece una tolerancia para las desviaciones en relación con la energía programada de +/- 5%. (Gamboa, A., 2019). Por ejemplo, si un generador había programado entregar 100 MW de energía para un intervalo de cinco minutos, pero solo entrega 96 MW, la desviación sería de -4 MW, la desviación estaría dentro de la tolerancia y no tiene penalización.

6.1.5. Desviaciones en Brasil.

En Brasil, el mercado de energía funciona principalmente a través del mercado diario. El Operador Nacional del Sistema Eléctrico (ONS) se encarga de coordinar y administrar este mercado, garantizando un suministro eficiente de energía. El proceso de liquidación de desviaciones en el mercado energético brasileño se realiza mediante el Mecanismo de Compensación de Sobras y Déficit (MCSD). El objetivo de este mecanismo es equilibrar las diferencias entre la energía programada y la energía real generada o consumida por los agentes del mercado. Para ello, se comparan los datos de programación y generación de energía en diferentes intervalos de tiempo, y se calcula la suma de las diferencias correspondientes. (Von Meier, A. 2006).

Además, en el mercado de energía de Brasil se emplea el mecanismo de relocación de energía conocido como Mercado de Relocación de Energía (MRE). Este mecanismo juega un papel importante al facilitar los intercambios de excedentes y déficits de energía entre las distintas regiones del país. Su objetivo principal es lograr un equilibrio entre la oferta y la demanda de energía en todo el territorio nacional. (Arriaga, J., & Abbad, M., 2021).

La tolerancia para el cálculo de desviaciones en Brasil es del 5% en comparación con la energía programada. Esto implica que la generación real puede desviarse hasta un 5% por encima o por debajo de la generación programada sin incurrir en penalizaciones. En el mercado de energía de Brasil, se lleva a cabo una comparación entre la energía programada y la energía efectivamente generada por cada generador. Esta comparación se realiza en intervalos de tiempo específicos, generalmente en períodos de 15 minutos. El cálculo de las desviaciones se efectúa sumando las diferencias entre la energía programada y la energía generada en cada intervalo durante un período determinado. (Liranzo Paulino, C. D. J., 2017)

Cuando la generación real supera el programa establecido, el generador recibirá una compensación financiera por el excedente de energía. El valor de esta compensación se determina en función del precio de energía en el mercado spot y de los aranceles establecidos por la Cámara de Comercialización de Energía Eléctrica (CCEE). Las tasas de compensación pueden variar entre los generadores y la CCEE, dependiendo de los contratos y acuerdos específicos. (Flórez, M., Gómez, B., & García, J. 2016).

A continuación, se presentan ejemplos numéricos para ilustrar los casos de penalización por desviaciones y la ausencia de penalización, suponiendo una generación programada de 1000 MW:

a) Ejemplo de penalización por desviaciones:

- Generación real: 950 MW (una desviación del 5% por debajo de la generación programada).
- Penalización: En este caso, el agente responsable de la desviación puede recibir una penalización financiera o ser requerido para compensar la diferencia mediante la compra de energía en el mercado o la activación de recursos adicionales.

b) Ejemplo de no penalización:

- Generación real: 1020 MW (una desviación del 2% por encima de la generación programada).
- No hay penalización: En este escenario, la desviación se encuentra dentro de la tolerancia permitida del 5%, por lo tanto, el agente no incurre en una penalización financiera ni se le exige compensar la diferencia.

Como resumen de la sección 6.1 se tiene:

En el mercado eléctrico de PJM, las desviaciones se calculan utilizando el concepto de "desvíos" o "desbalances", se aplican penalizaciones a los agentes cuya generación o consumo de energía se desvíe más allá de las tolerancias establecidas, las cuales varían según el tipo de mercado y el período de tiempo considerado.

En el mercado eléctrico de California (CAISO), también se utiliza el concepto de "deviations" o desviaciones. Las desviaciones se liquidan a través del Mercado de Energía Real (Real-Time Energy

Market) y se aplican cargos o créditos a los participantes cuya generación o consumo de energía se desvíe de la programada.

En el mercado eléctrico Nord Pool las desviaciones se calculan utilizando el concepto de "desequilibrios" o desequilibrios, y se aplican tolerancias y penalizaciones según el mercado y el período de tiempo considerado.

En el mercado eléctrico de Australia las desviaciones se liquidan a través del Proceso de Liquidación del Mercado, basado en el Precio de Desviación. El cálculo de las desviaciones y los precios correspondientes se realiza dentro del marco regulatorio establecido por la Australian Energy Market Commission. Se establece una tolerancia del 5% y las desviaciones más allá de esta tolerancia tienen penalización.

En el mercado eléctrico de Brasil, las desviaciones se liquidan a través del Mecanismo de Compensación de Sobras y Déficits (MCSD). Se permite una tolerancia del 5% en comparación con la energía programada, y las desviaciones dentro de esta tolerancia no incurrir en penalizaciones. Las desviaciones más allá de esta tolerancia pueden resultar en penalizaciones financieras o la necesidad de compensación por parte de los agentes responsables.

De acuerdo a lo anterior, en la siguiente sección se resumen los criterios de decisión para la selección de un conjunto de características en común en el esquema de desviaciones de los países descritos.

6.2. Selección un conjunto de esquemas de desviaciones identificados para ser evaluados.

En la tabla 6-2 se presenta un resumen con las principales características del funcionamiento del cálculo de desviaciones en los países seleccionados, teniendo en cuenta que las desviaciones de las que trata el presente trabajo corresponden a las desviaciones obtenidas en la oferta de generación por parte de Agentes del Mercado y no en desviaciones del sistema o por regulación de frecuencia del mismo:

Tabla 6-2. Resumen características desviaciones en países seleccionados

Mercado/Administrador	País	Mercado Diario	Mercado Intradía	% de Tolerancia
PJM	Estados Unidos	Sí	Sí	± 10%
CAISO	Estados Unidos	Sí	Sí	± 10%
Nord Pool	Noruega, Suecia, Finlandia, Dinamarca, Estonia, Letonia y Lituania	Sí	Sí	± 15%

Mercado/Administrador	País	Mercado Diario	Mercado Intradiario	% de Tolerancia
AEMO	Australia	Sí	Sí	± 5%
ONS	Brasil	Sí	No	± 5%
XM	Colombia	Si	No	± 5%

Debido a que Brasil no funciona con un mercado intradiario, se procede a evaluar estrategias de mitigación de desviaciones en PJM, CAISO, Nord Pool, AEMO en el siguiente capítulo.

7. Propuestas de estrategias de mitigación

7.1. Evaluación de estrategias de mitigación de penalidad por desviaciones por parte de un Agente Generador, para los esquemas seleccionados

Luego del análisis del funcionamiento del cálculo de desviaciones en los distintos países se evaluaron las siguientes estrategias para el manejo de desviaciones desde el punto de vista de un Agente Generador:

a) PJM:

- Programación precisa: Los agentes generadores deben realizar una programación precisa de su generación de energía para evitar desviaciones significativas. Esto implica utilizar pronósticos precisos de demanda y condiciones climáticas.
- Participación en mercados de capacidad: Al participar en mercados de capacidad, los agentes generadores pueden garantizar una disponibilidad adicional de generación para cubrir posibles desviaciones y reducir el riesgo de penalizaciones.

b) CAISO:

- Gestión activa de la energía: Los agentes generadores deben monitorear de cerca la producción en tiempo real y realizar ajustes rápidos si se detectan desviaciones. Esto implica utilizar tecnologías avanzadas de monitoreo y control para optimizar la generación.
- Participación en programas de respuesta de la demanda: Al participar en programas de respuesta de la demanda, los agentes generadores pueden ajustar su generación en función de la demanda real, lo que reduce el riesgo de desviaciones y penalizaciones.

c) Nord Pool:

- Coordinación de la generación: Los agentes generadores pueden colaborar entre sí para coordinar la generación y reducir las desviaciones. Esto implica el intercambio de información en tiempo real y la implementación de estrategias de generación conjunta.
- Uso de tecnología de predicción: Los agentes generadores pueden utilizar tecnología de predicción avanzada para estimar la producción de energía con mayor precisión y realizar ajustes anticipados para evitar desviaciones.

d) Australia:

- Monitoreo continuo: Los agentes generadores deben monitorear continuamente la generación en relación con la programación y realizar ajustes rápidos si se detectan desviaciones. Esto implica la implementación de sistemas de monitoreo en tiempo real y la comunicación efectiva con el operador del mercado.
- Uso de recursos flexibles: Los agentes generadores pueden utilizar recursos flexibles, como almacenamiento de energía o generación distribuida, para compensar cualquier desviación y garantizar el equilibrio entre la oferta y la demanda.

En la tabla 7-1 se observa la evaluación de las diferentes estrategias identificadas:

Tabla 7-1. Evaluación de las estrategias identificadas.

Mercado/Administrador	País	Estrategia principal	Efectividad	Facilidad de implementación
PJM	Estados Unidos	- Programación precisa - Participación en mercados de capacidad	Alta	Media
CAISO:	Estados Unidos	- Gestión activa de la energía - Participación en programas de respuesta de la demanda	Media	Alta
NORD POOL	Noruega, Suecia, Finlandia, Dinamarca, Estonia, Letonia y Lituania	- Coordinación de la generación - Uso de tecnología de predicción	Alta	Baja
AEMO	Australia:	- Monitoreo continuo - Uso de recursos flexibles	Media	Alta

En resumen, las estrategias de mitigación de penalidades por desviaciones comparten varios aspectos clave. Estos incluyen una programación precisa, monitoreo y ajuste en tiempo real, participación en mercados específicos, colaboración entre agentes generadores, implicación de la demanda a través de reducciones de consumo y utilización de tecnologías avanzadas. El objetivo principal de estas estrategias es optimizar la generación de energía y mantener un equilibrio adecuado entre la oferta y la demanda, evitando así desviaciones significativas y posibles sanciones.

En la siguiente sección se propone una alternativa para el manejo de desviaciones en un despacho intradiario en Colombia.

7.2. Propuesta de alternativa para el manejo de desviaciones en un despacho intradiario en Colombia.

Al tener en cuenta la evaluación de estrategias de mitigación para cada uno de los países seleccionados establece la Propuesta de Alternativa para el Manejo de Desviaciones en el Mercado de Energía con Despacho Intradiario en Colombia. Debido a que un despacho intradiario, permitirá realizar ajustes en tiempo real y gestionar de manera más eficiente las desviaciones entre la generación programada y la generación real, brindando mayor flexibilidad y estabilidad al sistema eléctrico nacional, se propone:

A) Desarrollo del Despacho Intradiario:

- **Creación del Operador del Mercado Intradiario:** Se propone establecer una función adicional al administrador del Sistema de Intercambios Comerciales (ASIC), llamado ASIC INTRADAY, entidad responsable de coordinar y administrar el despacho intradiario en Colombia. El ASIC INTRADAY contará con expertos en la operación del sistema eléctrico y será independiente de los participantes del mercado, asegurando la imparcialidad en el proceso.
- **Implementación de una plataforma tecnológica avanzada:** Se propone implementar una plataforma tecnológica robusta y eficiente que permita el intercambio de información en tiempo real entre los agentes generadores, comercializadores y el ASIC INTRADAY. Esta plataforma facilitará la comunicación, la programación y la actualización constante de datos relevantes para el despacho intradiario.
- **Mejora en los pronósticos y datos en tiempo real:** se propone que los Agentes Generadores deberán proporcionar pronósticos precisos de su generación en intervalos de tiempo más cortos, por ejemplo, de 30 minutos o en las horas mínimas de oferta definidas en el eventual despacho intradiario. Estos pronósticos servirán de base para el despacho intradiario y permitirán una programación más precisa de la generación de energía.

B) Propuesta para el manejo de Desviaciones:

- **Establecimiento de una tolerancia y penalidades:** Se propone establecer una tolerancia para las desviaciones entre la generación programada y la generación real del cinco por ciento (5%) para la Generación convencional y del 15% para la generación eólica y solar, en línea con las mejores prácticas internacionales y considerando las características específicas

del sistema eléctrico colombiano. En caso de que las desviaciones superen esta tolerancia, se aplicarán penalidades a los agentes generadores responsables. Todos los agentes participantes para manejar o suplir desviaciones deben tener dispositivos AGC, similar a como funciona en PJM.

- **Aplicación de ajustes económicos:** Las penalidades por desviaciones podrán incluir ajustes económicos, los cuales serán definidos por el ASIC INTRADAY y serán basados en las tarifas y los mecanismos de ajuste establecidos. Estos ajustes podrán ser proporcionales a la magnitud de la desviación y podrán implicar el pago de una compensación financiera al ASIC INTRADAY, como la cantidad desviada liquidada al precio o costo marginal del momento de la desviación.
- **Fomento de estrategias de mitigación de desviaciones:** Se propone fomentar la implementación de estrategias por parte de los agentes generadores para mitigar las desviaciones. Estas estrategias podrán incluir la participación en mercados secundarios, el uso de recursos flexibles como almacenamiento de energía, respuesta de la demanda, la colaboración entre generadores para el intercambio de energía y la utilización de tecnologías avanzadas de monitoreo y control.

C) Supervisión y Cumplimiento

- Se sugiere que la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) sea la entidad encargada de establecer las regulaciones y normas para el despacho intradiario, mientras que XM asuma el rol de supervisar y hacer cumplir dichas reglas y regulaciones. XM se encargará de garantizar la transparencia, equidad e integridad del mercado, tomando las medidas necesarias en caso de incumplimientos o conductas anticompetitivas para asegurar un ambiente de mercado justo y eficiente. Esta colaboración entre la CREG y XM permitirá un adecuado funcionamiento del despacho intradiario, beneficiando tanto a los agentes generadores como a los consumidores. Adicionalmente, se propone que el ASIC INTRADAY realice auditorías periódicas para verificar el cumplimiento de las normas y reglamentos del despacho intradiario. Además, se requerirá a los agentes generadores la presentación de reportes detallados sobre sus actividades de generación y las desviaciones asociadas.

D) Capacitación y Divulgación:

- **Programas de capacitación:** Se propone implementar programas de capacitación dirigidos a los agentes generadores y otros participantes del mercado, con el objetivo de mejorar su comprensión sobre el despacho intradiario, las estrategias de mitigación de desviaciones y el cumplimiento de las regulaciones.
- **Divulgación de información:** Se propone promover la divulgación de información clara y transparente sobre el despacho intradiario, sus beneficios, requisitos y consecuencias. Se

establecerán canales de comunicación efectivos para brindar orientación y aclarar dudas a los agentes generadores y otros interesados.

E) Estrategias desde el punto de vista de los Agentes Generadores:

- **Participación en programas de respuesta de la demanda:** Ajustar la generación en función de la demanda real al participar en programas de respuesta de la demanda. Esto permite adaptar la producción de energía de manera más precisa y reducir el riesgo de desviaciones.
- **Colaboración con otros generadores:** Colaborar con otros generadores para coordinar la generación y reducir las desviaciones. Compartir información en tiempo real y establecer estrategias conjuntas de generación que pueden ayudar a mantener un equilibrio adecuado entre la oferta y la demanda.
- **Análisis y gestión de riesgos:** Se propone realizar análisis de riesgos periódicos y desarrollar estrategias de mitigación específicas para minimizar las desviaciones. Esto implica evaluar los posibles escenarios y prepararse con medidas adecuadas para enfrentarlos.
- **Mejora continua del proceso:** Revisar y mejorar continuamente el proceso de generación y monitoreo para reducir las desviaciones. Esto puede incluir la implementación de nuevas tecnologías, la capacitación del personal y la adopción de mejores prácticas de la industria.

La implementación de una estrategia para la mitigación de desviaciones de generadores en un despacho intradiario también conlleva beneficios significativos para los generadores de energía. Algunos de estos beneficios incluyen:

- **Cumplimiento de compromisos:** Al reducir las desviaciones entre la energía comprometida y la entregada, los generadores cumplen de manera más efectiva con los compromisos adquiridos en el mercado intradiario. Esto fortalece su reputación y credibilidad, lo que a su vez puede generar mayores oportunidades comerciales y relaciones comerciales sólidas.
- **Optimización de recursos:** Al minimizar las desviaciones y optimizar la operación del sistema, los generadores pueden gestionar de manera más eficiente sus recursos, como la capacidad de generación y los combustibles utilizados. Esto les permite maximizar su eficiencia y reducir los costos operativos asociados con desviaciones significativas.
- **Mejora de la rentabilidad:** Al evitar penalizaciones por incumplimiento, los generadores evitan gastos adicionales y multas económicas que podrían afectar su rentabilidad. Al

mantener un buen historial de cumplimiento, se posicionan favorablemente en el mercado y pueden acceder a mejores condiciones comerciales y contratos más ventajosos.

En conclusión, la Propuesta descrita busca implementar un sistema de despacho intradiario que permita realizar ajustes en tiempo real y gestionar de manera más eficiente las desviaciones entre la generación programada y la generación real de energía. Esta propuesta se fundamenta en la creación de un Operador del Mercado Intradiario independiente y experto en la operación del sistema eléctrico, así como en el desarrollo de una plataforma tecnológica avanzada para el intercambio de información entre los agentes generadores y el ASIC INTRADAY. Además, se establecen tolerancias y penalidades para las desviaciones, con el objetivo de incentivar a los agentes generadores a cumplir con sus compromisos y reducir las desviaciones. Asimismo, se promueve la implementación de estrategias de mitigación por parte de los generadores, como la participación en mercados secundarios y el uso de tecnologías avanzadas de monitoreo y control.

En el siguiente capítulo se presentan las principales conclusiones del presente trabajo.

8. Conclusiones

8.1. Conclusiones generales del Trabajo Final

En este trabajo se realizó un análisis exhaustivo del proceso de cálculo de desviaciones en los mercados energéticos de PJM, CAISO, Colombia, Brasil y Nord Pool. Se encontró que en todos estos mercados se presentan desviaciones, lo cual destaca la importancia de implementar estrategias eficientes de mitigación.

Una observación relevante es que todos los mercados estudiados, a excepción de Colombia y Brasil, operan con un mercado intradiario. Esto resalta la necesidad de que estos dos países consideren la implementación de un mercado intradiario en su estructura energética, lo que podría contribuir a un mejor equilibrio entre la oferta y la demanda, y así reducir las desviaciones.

Como resultado de esta investigación, se propuso una alternativa para el manejo de desviaciones en el mercado energético colombiano. Esta alternativa incluye el desarrollo del despacho intradiario, el manejo de desviaciones mediante la respuesta de la demanda, una supervisión y cumplimiento más rigurosos, así como la capacitación y divulgación de información adecuada a todos los actores involucrados.

Se espera que estas recomendaciones contribuyan a mejorar el manejo de las desviaciones en el mercado energético colombiano y promuevan un sistema más eficiente y equilibrado. Es fundamental que los agentes del mercado, los reguladores y otros actores relevantes trabajen en conjunto para implementar estas medidas y asegurar un sistema energético más confiable y sostenible en el país.

En resumen, este trabajo ha puesto de manifiesto la presencia de desviaciones en varios mercados energéticos y ha destacado la importancia de abordar este desafío. La propuesta de alternativas específicas para el mercado energético colombiano busca fomentar la adopción de prácticas más efectivas en el manejo de desviaciones por parte de Agentes Generadores y así fortalecer el sector energético del país.

8.2. Conclusiones asociadas con el logro de los objetivos definidos

8.2.1. Objetivo específico 1

“Identificación de esquemas de manejos de desviaciones, en países seleccionados”.

En el Capítulo 6, titulado "Esquemas de Manejo de Desviaciones", se llevó a cabo un análisis del manejo de desviaciones en diversos mercados energéticos, centrándose en los casos de PJM y CAISO en Estados Unidos, Nord Pool (Noruega, Suecia, Finlandia, Dinamarca, Estonia, Letonia, Lituania) en Europa, Australia y Brasil, adicionalmente en el capítulo 2 y 3 se explicó como funciona el manejo de desviaciones en Colombia. A través de esta investigación, se buscó comprender los diferentes enfoques y estrategias implementadas en cada mercado para abordar las desviaciones y mantener un equilibrio entre la oferta y la demanda de energía.

En primer lugar, se examinó el caso de PJM, en el que se identificaron las medidas implementadas para mitigar las desviaciones, como la utilización de mercados de ajuste y programas de respuesta de la demanda. Estas iniciativas han demostrado ser eficientes para controlar y reducir las desviaciones en el mercado energético de Estados Unidos.

Por otro lado, se analizó el esquema de manejo de desviaciones en CAISO, donde se destacó la importancia de la coordinación entre los participantes del mercado y la implementación de programas de compensación. Estos mecanismos han demostrado ser efectivos para minimizar las desviaciones y garantizar un equilibrio en el sistema eléctrico de California.

Además de los casos de Estados Unidos, se examinaron los enfoques utilizados en Nord Pool, Australia y Brasil. En Nord Pool, se enfatizó el papel de los mercados intradiarios y la colaboración entre países para reducir las desviaciones y promover una gestión más eficiente de la energía. En Australia, se encontró que el uso de contratos bilaterales y programas de control de desviaciones ha sido fundamental para mitigar los desequilibrios en el suministro y la demanda.

En el caso de Brasil, se identificaron desafíos significativos en el manejo de desviaciones debido a la falta de un mercado intradiario. Sin embargo, se destacaron algunas iniciativas en desarrollo, como el intercambio de información y la implementación de programas de respuesta de la demanda, que podrían contribuir a mejorar la gestión de las desviaciones en el país.

En resumen, se desarrolló una visión integral de los esquemas de manejo de desviaciones en distintos mercados energéticos. Se encontró que existen enfoques variados, pero todos ellos enfocados en mantener un equilibrio entre la oferta y la demanda de energía, minimizando las desviaciones y garantizando un suministro confiable.

Este análisis comparativo de los esquemas de manejo de desviaciones en PJM, CAISO, Nord Pool, Australia y Brasil, brinda una perspectiva valiosa para los responsables de la toma de decisiones en el sector energético. Los hallazgos de este estudio pueden servir como base para el diseño e implementación de estrategias efectivas de mitigación de desviaciones en otros mercados energéticos, contribuyendo así a la eficiencia y estabilidad de los sistemas eléctricos a nivel global.

8.2.2. Objetivo específico 2

“Seleccionar un conjunto de esquemas de desviaciones identificados para ser evaluados”.

El Capítulo 6 se enfocó en recopilar y analizar las principales características de los mercados energéticos estudiados, con el objetivo de comprender y comparar sus esquemas de manejo de desviaciones. Para lograrlo, se utilizó la Tabla 6-2 donde se recopilaron datos relevantes como la existencia o no de un mercado diario o intradiario y el porcentaje de tolerancia permitido a las desviaciones.

A través de esta recopilación de información, se obtuvo una visión panorámica de las diferentes características y requisitos de cada mercado. Se observó que algunos mercados funcionan con un esquema diario, mientras que otros utilizan un enfoque intradiario. Esta distinción es fundamental para comprender las dinámicas y plazos de ajuste de cada mercado en relación con las desviaciones.

Además, la inclusión del porcentaje de tolerancia en la tabla 6-2 se aprecia la magnitud de las desviaciones que son permitidas en cada mercado. Algunos mercados pueden tener un margen de tolerancia más amplio, lo que implica que se permiten mayores desviaciones, mientras que otros son más estrictos y requieren un mayor control de las desviaciones.

En conclusión, la Tabla 6-2 ha sido una herramienta importante para reunir y visualizar las principales características de los mercados energéticos estudiados en términos de sus esquemas de manejo de desviaciones. Este análisis comparativo proporciona una base para comprender las diferencias y similitudes entre los mercados, y permite identificar las mejores prácticas y posibles áreas de mejora en el manejo de las desviaciones.

8.2.3. Objetivo específico 3

“Evaluar estrategias de mitigación de penalidad por desviaciones por parte de un Agente Generador, para los esquemas seleccionados.

En la sección 7.1 titulada "Evaluación de estrategias de mitigación de penalidad por desviaciones por parte de un Agente Generador", se llevó a cabo un análisis de las estrategias de mitigación utilizadas en los esquemas de PJM, CAISO, Nord Pool y Australia para el manejo de desviaciones.

En conclusión, la evaluación de las estrategias de mitigación de penalidad por desviaciones por parte de los agentes generadores en los esquemas de PJM, CAISO, Nord Pool y Australia reveló la importancia del monitoreo continuo, la coordinación de la generación, el uso de tecnología para la predicción y la participación en programas de respuesta de la demanda. Estas estrategias son fundamentales para mantener un equilibrio en el suministro de energía y evitar penalizaciones por desviaciones significativas.

8.2.4. Objetivo general

“Proponer una alternativa para el manejo de las desviaciones en un despacho intradiario en Colombia”.

En el capítulo 7.2 titulado "Propuesta de alternativa para el manejo de desviaciones en un despacho intradiario en Colombia" se muestra una propuesta para el manejo de desviaciones en el mercado de energía colombiano a través de la implementación de un despacho intradiario. Esta propuesta se basa en la evaluación de estrategias utilizadas en los esquemas de PJM, CAISO, Nord Pool y Australia.

La implementación de un despacho intradiario en Colombia permitiría realizar ajustes en tiempo real y gestionar de manera más eficiente las desviaciones entre la generación programada y la generación real. Con este enfoque, se busca brindar mayor flexibilidad y estabilidad al sistema eléctrico nacional, asegurando un suministro confiable de energía.

La propuesta se divide en varias áreas clave. En primer lugar, se propone el desarrollo del despacho intradiario, el cual sería administrado por el Operador del Mercado Intradiario que estaría a cargo de XM. Además, se sugiere implementar una plataforma tecnológica avanzada que facilite el intercambio de información en tiempo real entre los agentes generadores, comercializadores y el Operador del Mercado Intradiario.

En relación al manejo de desviaciones, se sugiere establecer una tolerancia del 5% para los Agentes Generadores convencionales y del 15% para la Generación Variable. Además, se propone la aplicación de penalidades a aquellos agentes generadores cuyas desviaciones superen esta tolerancia. Estas penalidades incluirán ajustes económicos que serán determinados en base a las tarifas y mecanismos de ajuste establecidos, como la cantidad de energía desviada liquidada a precio o costo marginal.

Además, se busca fomentar estrategias de mitigación por parte de los agentes generadores, como la participación en mercados secundarios, el uso de recursos flexibles, la Respuesta de la Demanda y la colaboración entre generadores. Asimismo, se enfatiza la importancia de la supervisión y el cumplimiento de las regulaciones por parte de la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG), así como la realización de auditorías periódicas y la presentación de reportes por parte de los agentes generadores.

Finalmente, se propone la implementación de programas de capacitación y divulgación para mejorar la comprensión de los agentes generadores y otros participantes del mercado sobre el despacho intradiario, las estrategias de mitigación de desviaciones y el cumplimiento de las regulaciones.

En resumen, esta propuesta busca establecer un marco para el manejo de desviaciones en el mercado de energía colombiano a través del despacho intradiario. Se espera que la implementación de estas medidas mejore el manejo de desviaciones, reduzca las penalidades por desviaciones y promueva un suministro más confiable de energía en el país.

8.3. Trabajos Futuros

Las recomendaciones para trabajos futuros derivadas de las conclusiones mencionadas podrían incluir:

- Incorporar tecnologías emergentes: A medida que avanza la tecnología, es importante realizar investigaciones continuas sobre nuevas herramientas y tecnologías que puedan mejorar el manejo de desviaciones en el sector energético. Se sugiere investigar y evaluar el uso de inteligencia artificial, el aprendizaje automático y la analítica avanzada para mejorar la precisión de las predicciones y optimizar el equilibrio entre la oferta y la demanda de energía.
- Evaluar el impacto de las políticas regulatorias: Se sugiere realizar investigaciones adicionales para evaluar el impacto de las políticas regulatorias en el manejo de desviaciones. Esto incluye analizar la eficacia de los incentivos y las penalidades establecidas por los organismos reguladores para fomentar la mitigación de desviaciones y promover el cumplimiento de los estándares de equilibrio entre la oferta y la demanda.
- Realizar estudios de viabilidad económica: Es importante realizar estudios de viabilidad económica para evaluar el costo-beneficio de la implementación de diferentes estrategias de mitigación de desviaciones. Esto permitiría a los responsables de la toma de decisiones en el sector energético comprender mejor los impactos financieros y determinar la rentabilidad de las inversiones en infraestructura y tecnología.

Estas recomendaciones proporcionan una base para futuros trabajos en el ámbito del manejo de desviaciones en el sector energético.

9. Referencias

AEMO (2023). About AEMO. Recuperado de <https://aemo.com.au/>

Arriaga, J. I. P., & Abbad, M. R. (2021). Los sistemas de energía eléctrica. Análisis y operación de sistemas de energía eléctrica (1st ed.). Recuperado de http://departamento.us.es/ielectrica/wp-content/uploads/2021/08/Analisis-y-operacion-de-SEE_2010.pdf#page=21

Arriaga, J. I. P., Sánchez, L. J., & de Tembleque, M. P. (2021). La gestión de la demanda de electricidad vol. II (Anexos). Recuperado de https://www.researchgate.net/profile/Mercedes-Buendia-2/publication/28087838_La_gestion_de_la_demanda_de_electricidad_II/links/542a92940cf29bbc1267b2c5/La-gestion-de-la-demanda-de-electricidad-II.pdf

Areiza, D. (2020). Mercados Minoristas Alternativos en el Mercado Eléctrico Colombiano. Areiza D. (2020). 1-57.

CAISO BPM for Market Operations. (2020). Business Practice Manual for Market Operations CAISO BPM for Market Operations (2020) 1-300.

CAISO. (2023). California Independent System Operator Corporation Fifth Replacement Tariff CAISO 2023(2023) 2-206.

CAISO. (2022). About CAISO. Recuperado de <https://www.caiso.com/TodaysOutlook/Pages/supply-demand.aspx>

Carrero Pabón, S. I., & Vergel Criado, L. F. (2010). Volatilidad intradía en los precios de la energía eléctrica en el mercado colombiano. Recuperado de <https://repository.unab.edu.co/handle/20.500.12749/13869>

CREG. (2019). Resolución 060 de 2019. Recuperado en septiembre de 2022, de [http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/1c09d18d2d5ffb5b05256eee00709c02/ca640edbe4b7b5100525842d0053745d/\\$FILE/Creg060-2019.pdf](http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/1c09d18d2d5ffb5b05256eee00709c02/ca640edbe4b7b5100525842d0053745d/$FILE/Creg060-2019.pdf)

CREG. (2001). Resolución 034 de 2001. Recuperado en junio de 2023, de https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion_creg_0034_2001.htm

- CREG. (2022). Respuesta de la demanda en el Sistema Interconectado Nacional - Hoja de Ruta - Documento de consulta pública CREG (2022) 1-25.
- CREG. (2022a). Resolución 101 019 de 2022. Recuperado en junio de 2023, de https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion_creg_101-19_2022.htm
- Day-Ahead and Real-Time Market Operations PJM. (2023) PJM Manual 11 Energy & Ancillary Services Market Operations Revision: 123 - Day-Ahead and Real-Time Market Operations (1st ed., pp. 1-227).
- Dispatch PJM. (2022) PJM Manual 12: Balancing Operations Revision: 47 - Operations Dispatch PJM (1st ed., pp. 1-114).
- Dong nan da xue. et al. (2008). The 3rd International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring, and Power Technologies (DRPT 2008): April 06-09, 2008, International Conference Hotel of Nanjing. IEEE Power Engineering Society. Zhongguo dian ji gong cheng xue hui (Beijing CIEEE), 2867.
- Duque Gonzalez, R. (2021). Determinación del mecanismo de liquidación de energía para el mercado Intradario en Colombia (1st ed., pp. 1-55).
- Echeverri, D., Correa, M., Rendon, J. G., & Submitter, C. I. E. F. (2019). Integración de fuentes de energías renovables no convencionales y redes inteligentes en Estados Unidos: evidencia para PJM [Integration of Non-Conventional Renewable Energy Sources and Smart Grids in the United States: Evidence From PJM]. Recuperado de https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3524989
- ERCOT. (2022). About ERCOT. <http://www.ercot.com/about>
- Flatabø et al. (2003) Experience with the nord pool design and implementation Flatabø N, Doorman G, [...] Wangensteen IEEE Transactions on Power Systems (2003) 18(2) 541-547
- Flórez, M., Gómez, B., & García, J. (2016). Análisis Comparativo de Diferentes Esquemas de Suficiencia en Generación Eléctrica: Algunas Reflexiones Para el Mercado Eléctrico en Colombia [Comparative Analysis of Different Schemes in Sufficiency in Power Generation: Some Thoughts for the Electricity Market in Colombia]. Center for Research

- in Economics and Finance (CIEF), Working Papers, (16-18). Recuperado de https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2826110
- Gamboa Román, A. I. (2019). Tarifación costo-reflectiva para la inversión y operación óptima de la generación distribuida. Recuperado de <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/173344>
- IEA. (2021). Electricity Information 2021. Recuperado de <https://www.iea.org/reports/electricity-information-overview>
- ISO-NE. (2022). About ISO-NE. Recuperado de <https://www.iso-ne.com/about/>
- Jaramillo J. (2017). Implementación de Mercados Intradiarios de Generación en Colombia.
- Khazaei et al. (2017) Single and multisettlement approaches to market clearing under demand uncertainty. *Operations Research*, 65(5), 1147-1164.
- Kumaran Nalini et al. (2022) OpenTUMFlex: A flexibility quantification and pricing mechanism for prosumer participation in local flexibility markets, Kumaran Nalini B, You Z, Wagner U *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 143.
- Liranzo Paulino, C. D. J. (2017). Almacenamiento de energía en distribución eléctrica. Recuperado de <https://idus.us.es/handle/11441/70819>
- Mastropietro et al. (2020). Reforming the colombian electricity market for an efficient integration of renewables: A proposal Mastropietro P, Rodilla P, Batlle C *Energy Policy*, 139.
- Mohandes et al. (2021) Incentive Based Demand Response Program for Power System Flexibility Enhancement Mohandes B, El Moursi M, [...] El Khatib S *IEEE Transactions on Smart Grid* 12(3), 2212-2223.
- NORD POOL. (2022). Nord Pool Group. (s.f.). About us. Recuperado de <https://www.nordpoolgroup.com/en/About-us/>
- NYISO. (2021). State of the Grid Report: New York Independent System Operator. Recuperado de <https://www.nyiso.com/documents/20142/230718/2021-State-of-the-Grid-Report.pdf/8e9ce242-778d-bf09-3cb1-8be71d216aec> (pág. 13)
- ONS. (2023). About ONS. Recuperado de <https://www.ons.org.br/>

Plaum et al. (2022) Aggregated demand-side energy flexibility: A comprehensive review on characterization, forecasting and market prospects Plum F, Ahmadiyahangar R, Kilter Energy Reports.

PJM. (2022). About PJM. Recuperado de <https://www.pjm.com/about-pjm/index.aspx>

PJM Market Settlements Development Department. (2023). PJM Manual 28: Operating Agreement Accounting (pp. 1-160).

Poveda Núñez, M. (2012). Modelamiento del precio de bolsa incluyendo costos de arranque y parada en el mercado eléctrico colombiano.

Rösch et al. (2021) Regional flexibility markets—solutions to the european energy distribution grid—a systematic review and research agenda Rösch T, Treffinger P, Koch B. Energies.

Uribe et al. (2020) Characterizing electricity market integration in Nord Pool Uribe J, Mosquera-López S, Guillen M Energy, 208.

Von Meier, A. (2006). Electric power systems: a conceptual introduction. John Wiley & Sons. Recuperado de: https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=bWAI22IB3IkC&oi=fnd&pg=PR7&dq=%22Electric+Power+Systems:+A+Conceptual+Introduction%22+by+Alexandra+von+Meier++Este+libro+proporciona+una+introducci%C3%B3n+conceptual+a+los+sistemas+de+energ%C3%ADa+el%C3%A9ctrica+y+cubre+temas+relevantes+como+generaci%C3%B3n,+transmisi%C3%B3n,+distribuci%C3%B3n+y+mercados+de+energ&ots=zb9DaRCMp5&sig=qmgJ1yFqXerzXsN-2GT7yoZrVqc&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false

Wang et al. (2021) Data valuation for decision-making with uncertainty in energy transactions: A case of the two-settlement market system Wang B, Guo Q, Sun H Applied Energy, 288.

XM (2023). Informe Anual de Operación y Mercado 2021. Recuperado de <https://informeanual.xm.com.co/17-desviaciones-al-programa-de-generacion/index.html>

XM. (2022, 12 de octubre). Capacitación Virtual XM 12 de octubre [archivo de video]. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=ijeTgoi3E-s&t=381s>