

**MODELO ÓPTIMO DE DESPACHO ECONÓMICO DE SISTEMAS DE
GENERACIÓN CONSIDERANDO RESTRICCIONES DE INERCIA**

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de
INGENIERO ELÉCTRICO**

**TEMA:
MODELO ÓPTIMO DE DESPACHO ECONÓMICO DE SISTEMAS DE
GENERACIÓN CONSIDERANDO RESTRICCIONES DE INERCIA.**

**AUTOR:
JONNY FABRICIO CUEVA SALGUERO**

**TUTOR:
ALEXANDER ÁGUILA TÉLLEZ**

Quito, julio del 2020

Jonny Fabricio Cueva Salguero

MODELO ÓPTIMO DE DESPACHO ECONÓMICO DE SISTEMAS DE GENERACIÓN CONSIDERANDO RESTRICCIONES DE INERCIA

Universidad Politécnica Salesiana, Quito –Ecuador, 2020

Ingeniería Eléctrica

Breve reseña histórica e información de contacto.



Jonny Fabricio Cueva Salguero (Y'1993 – M'11.) Realizó sus estudios secundarios en el Instituto Tecnológico Superior Central Técnico en la especialidad de Electricidad. Egresado de la carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo trata del óptimo despacho económico de sistemas de generación considerando restricciones de inercia. jcuevas@est.ups.edu.ec

Dirigido por:



Alexander Águila Téllez (Y'1981 – M'09) recibió el título de Ingeniero Eléctrico y el de Máster en Eficiencia Energética en los años 2005 y 2010 respectivamente. Actualmente se encuentra estudiando para obtener su título de Doctor en Ingeniería en la Universidad Pontificia Bolivariana - Colombia-Medellín, es miembro del Grupo de Investigación GIREI. Sus principales intereses de investigación incluyen la compensación VOLT-VAR en redes de distribución eléctrica, redes inteligentes, minimización de pérdidas de energía, las energías renovables y la eficiencia energética. Es profesor investigador de la Universidad Politécnica Salesiana-Ecuador. aaguila@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados:

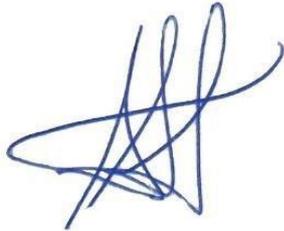
Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con la autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos o investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS
©2020 Universidad Politécnica
Salesiana QUITO-ECUADOR

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR/A

Yo Alexander Águila Téllez declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación “*Modelo óptimo de despacho económico de sistemas de generación considerando restricciones de inercia*” realizado por Jonny Fabricio Cueva Salguero obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, julio 2020



.....

Alexander Águila

Téllez

Cédula de identidad: 1755983184

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo/ Nosotros, Jonny Fabricio Cueva Salguero, con documento de identificación N° 1723352751, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy/somos autor/es del trabajo de grado/titulación intitulado: “*Modelo óptimo de despacho económico de sistemas de generación considerando restricciones de inercia*”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor/es me/nos reservo/reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



Nombre: Jonny Fabricio Cueva

Salguero Cédula: 1723352751

Fecha: julio de 2020

ÍNDICE GENERAL

1.	Introducción	2
2.	Sistema Nacional Interconectado	5
3.	Tipos de generación	5
3.1.	Generación Hidroeléctrica	5
3.2.	Generación Termoeléctrica	6
3.3.	Generación Eólica	6
3.4.	Generación Fotovoltaica	7
4.	Tecnologías de almacenamiento	8
4.1.	Sistema Neumático.....	8
4.2.	Volante de Inercia	9
4.3.	Baterías.....	10
4.4.	Supercondensadores	10
5.	Despacho Económico	11
6.	Confiabilidad	12
7.	Estabilidad en los Sistemas Eléctricos de Potencia	13
7.1.	Estabilidad de Frecuencia	14
8.	Inercia Sistémica.....	16
8.1.	Reserva Inercial	16
8.2.	Inercia Sintética.....	16
8.3.	Respuesta Inercial de BESS	17
9.	Metodología	18
9.1.	Función objetivo.....	18
9.2.	Restricciones	19
9.3.	Pseudocódigo.....	20
10.	Caso de estudio.....	21
11.	Análisis de resultados.....	23
12.	Conclusiones.....	26
13.	Trabajos Futuros	27
14.	Referencias	27
15.	Estado del Arte	32
15.1.	Matriz de estado del arte	32
15.2.	Resumen e Indicadores del estado del arte.....	39
16.	Anexos.....	40

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Composición y distribución de un generador fotovoltaico.....	7
Figura 2. Estructura de un SFCR	8
Figura 3. Estructura conceptual de un CAES.	9
Figura 4. Estados del sistema.....	13
Figura 5. Estabilidad de un sistema eléctrico de potencia	14
Figura 6. Diagrama unifilar del primer caso.	21
Figura 7. Diagrama unifilar del segundo escenario.	21
Figura 8. Demanda eléctrica horaria.....	22
Figura 9. Curva de viento Villonaco.....	22
Figura 10. Niveles de irradiancia El Aromo	22
Figura 11. Demanda y potencia total del sistema del escenario 1.	23
Figura 12. Demanda y potencia total del sistema del escenario 2.	23
Figura 13. Participación porcentual de los dos escenarios.....	24
Figura 14. Costos de generación de energía convencional.	25
Figura 15. Costos de generación de ERNC.....	25
Figura 16. Inercia del sistema en los casos analizados.	25
Figura 17. Costos de producción de los escenarios.....	26

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características de aleaciones de baterías.	10
Tabla 2. Valores de constantes de inercia H	15
Tabla 3. Pseudocódigo del algoritmo del modelo de despacho económico.....	20
Tabla 4. Precio de generación renovable.	22
Tabla 5. Unidades de generación que intervienen en el modelo de despacho.	22

MODELO ÓPTIMO DE DESPACHO ECONÓMICO DE SISTEMAS DE GENERACIÓN CONSIDERANDO RESTRICCIONES DE INERCIA

Resumen

En la actualidad la tecnología se encuentra en constante desarrollo brindando mayores beneficios, tanto para aprovechar los recursos existentes como para conservar los recursos naturales. Esto ha provocado un incremento de generación renovable no convencional en sistemas convencionales, que ocasionan cambios en su normal operación.

En el presente documento se plantea el desarrollo de un modelo de despacho económico tomando valores técnicos del Sistema Nacional Interconectado (SNI), a fin de representar un escenario real y el beneficio que tiene un sistema de almacenamiento de energía. El estudio se basa en la proyección de la construcción de la central fotovoltaica “El Aromo”, así se toma en cuenta la capacidad que va a tener para la entrega de energía. El modelo de despacho esta desarrollado en el optimizador GAMS con la finalidad de encontrar las óptimas soluciones para el escenario planteado, sujetándose a restricciones de capacidad de generación, capacidad de demanda, restricción de energía y restricción de inercia. Los resultados obtenidos están basados en dos escenarios, el primero modelando el sistema actual y el segundo incluyendo la nueva central fotovoltaica, el sistema de almacenamiento y la restricción en base a la inercia del sistema.

Palabras Clave: Almacenamiento de energía, energías no convencionales, despacho económico, optimización, inercia sistémica, restricción de inercia.

Abstract

Currently the technology is in constant development that provides greater benefits both to take advantage of existing resources and to conserve natural resources. This has caused an increase in non-conventional renewable generation in conventional systems, causing changes in their normal operation.

This document sets out the development of an economic dispatch model taking technical values from the National Interconnected System (SNI), to represent a real scenario and the benefit of an energy storage system. The study is based on the projection of the construction of the “El Aromo” photovoltaic plant, thus considering the capacity it will have for energy delivery. The dispatch model is developed in the GAMS optimizer to find the optimal solutions for the scenario outlined, subject to restrictions on generation capacity, demand capacity, energy restriction and inertia restriction. The results obtained are based on two scenarios, the first modeling the current system and the second including the new photovoltaic plant, the storage system and the restriction based on the inertia of the system.

Key Words: Energy storage, non-standard energies, economic dispatch, optimization, systemic inertia, inertial constraint.

1. Introducción

El sector eléctrico constituye uno de los principales pilares en el desarrollo socioeconómico de un país, en nuestro caso no viene a ser la excepción y en los últimos años la explotación de este sector ha venido tomando avances y crecimientos considerables, principalmente en el área de generación, esto debido al crecimiento de la demanda y a la necesidad de cubrirla brindando niveles adecuados de calidad al mínimo costo posible [1].

Una nueva demanda supone un crecimiento en otras áreas involucradas al sistema como son: transformación, transmisión y distribución. Motivo por el cual la integración de generación distribuida [2] ha ido ganando mayor acogida, mitigando parcialmente problemas tanto técnicos como económicos de una implementación macro, principalmente en el área de transformación y transmisión.

El crecimiento de la generación se ha visto mayormente enfocado en hidroeléctricas debido al recurso hídrico que existe, lo que permite tener una producción constante y amigable con el ambiente. Otras formas de producción de energía se basan en energías renovables no convencionales (ERNC), aquí se encuentran tecnologías como: biomasa, mareomotriz, eólica y fotovoltaica; siendo estas últimas las más utilizadas en nuestro medio. Una de las características de este tipo de tecnologías consiste en la incapacidad de almacenar su energía [3] y son empleadas como sistemas de respaldo en los momentos de mayor demanda, además de ciertos inconvenientes técnicos relacionados con la estabilidad de la frecuencia.

La producción de energía hidroeléctrica debe responder a estudios

de capacidad instalada, curva de demanda y demanda futura [4], factores que se han obtenido de un estudio previo a la construcción de los proyectos y que sirven no solo para este tipo de producción, sino también para energías renovables no convencionales.

En cuanto a la generación termoeléctrica (una de las más importantes que se tienen en la actualidad) su uso es de gran importancia, pues la disponibilidad que tiene es alta y por tanto está en la capacidad de entregar energía para satisfacer la demanda en el momento que se requiere [5], sin embargo, al ser su principal fuente de producción los combustibles fósiles, la convierte en una tecnología costosa y altamente contaminante, razón por la cual se ha visto desplazada por tecnologías más económicas y limpias [6] dejando su uso para horarios picos.

Otro tipo de tecnología en auge es la eólica, esta surgió debido a una crisis petrolera que obligó a buscar alternativas rentables y renovables, pues este tipo de energía aprovecha el recurso del viento que conlleva una disminución de costos en la producción y brinda energía más limpia y un cuidado mayor del medio ambiente [7]. Cabe mencionar que este tipo de energía no se la obtiene de manera constante debido a fenómenos propios de la naturaleza, motivo por el cual la producción de energía eólica se utiliza para completar demandas.

La energía fotovoltaica presenta muchas ventajas al momento de aportar producción, pues utiliza un recurso renovable que se encuentra presente en cualquier lugar, la radiación solar, dependiendo del tipo de día que se tenga la radiación llegará en mayor o menor cantidad a los paneles captadores que a su vez transformarán en energía

aprovechable [8]. El modo de captación de la radiación solar dependerá mucho del lugar en el que se encuentre ubicado geográficamente, debido a la trayectoria del sol con respecto a la tierra, su grado de inclinación y la época del año [9].

Un punto clave dentro de las ERNC son los sistemas de almacenamiento, debido al constante aumento de la demanda se ha visto la necesidad de desarrollar nuevas tecnologías que brinden una distribución adecuada de la energía eléctrica, existiendo casos en los que la producción puede estar por encima o por debajo del consumo, para ello es necesario recurrir a sistemas que puedan almacenar energía y posteriormente su entrega en momentos claves cuando se necesite [10][11].

Dentro de estos sistemas existen varios modelos que se pueden emplear, todo depende de las necesidades y capacidades que se presentan en los escenarios donde van a ser implementados, a continuación, algunos de estos modelos.

El sistema de almacenamiento neumático puede consistir en dos mecanismos [12]. El primero a través de aire inyectando en horas de baja demanda y su aprovechamiento en horas de demanda alta. El segundo consiste en un pistón líquido que actúa mediante una bomba/motor comprimiendo y enviando aire dependiendo de la demanda que se tenga [13], [14].

Flywheel o volante de inercia puede ayudarnos en el almacenamiento de energía brindando ventajas al momento de entregar energía a la red, uno de ellos es el consumo uniforme, almacenando en horas valle y su descarga en horas pico brindando un alivio a líneas de transmisión y subestaciones que trabajarán a un ritmo constante, de igual forma su descarga ocurre en un

intervalo de tiempo breve lo que favorece la regulación primaria del control frecuencia – potencia [15]–[17].

Las baterías son el sistema más utilizado para el almacenamiento de energía principalmente en producciones pequeñas, no obstante, varios estudios sugieren su empleo en grandes producciones, de modo que se conviertan en un alivio para el sistema al momento de entregar energía. Un sistema de baterías presenta varios parámetros que se ajustan a las necesidades, entre ellos están: la capacidad, densidad de energía, tensión de operación y máxima corriente.

Entre las diversas tecnologías de almacenamiento tenemos los supercondensadores, estos sistemas presentan varias ventajas importantes como son una larga vida útil y una alta capacidad de potencia [18]. Gracias a las características que presentan los supercondensadores han sido utilizados en aplicaciones diversas como redes inteligentes [19], redes inalámbricas de sensores [20]–[23], dispositivos biomédicos [24], y vehículos eléctricos [25]. Para poder explotar la máxima capacidad de estos dispositivos es necesario entender a profundidad su esquema de funcionamiento.

En un sistema eléctrico de potencia una de las partes más críticas es el despacho de las unidades generadoras ya que estas son las encargadas de abastecer toda la demanda que se tiene, logrando un balance entre el abastecimiento de la demanda y la producción, minimizando el costo de operación y cumpliendo criterios de calidad de servicio [26]. El despacho económico propiamente dicho es el punto clave dentro de la investigación, ya que se consideran modelos óptimos para una solución que sea rentable en producción, transporte y distribución.

Para el escenario que se plantea es necesario tener en cuenta las restricciones, que son los puntos clave que limitaran para tener un despacho económico acorde a lo que se busca. Las restricciones pueden ser de varios tipos y las definimos con una desigualdad o una inecuación para poder solventar lo que se genera y lo que se demanda [27], al usar un modelo completo en un escenario real las restricciones por energía deberán estar presentes para las tecnologías bases, así como los sistemas de almacenamiento [28], [29].

Dentro de un sistema eléctrico de potencia (SEP) la estabilidad del sistema es un tema clave para evitar problemas desde su generación hasta su consumo y se divide en: estabilidad de ángulo, de frecuencia y voltaje [30]–[33]. Para el modelo de estudio la estabilidad de frecuencia será el tema de análisis, este parámetro debe mantenerse dentro de niveles normales para asegurar el abastecimiento de la demanda [31] [34].

Dentro del tema de frecuencia existen tres etapas que permiten al sistema recuperarse después de una contingencia y tenga operación normal, estos son: regulación primaria, secundaria y terciaria, existe una etapa anterior llamada respuesta inercial que actúa inmediatamente ocurrida la contingencia y es la que evita que la caída de frecuencia sea mayor [35].

Para una estabilidad de frecuencia adecuada la inercia que aportan las unidades de generación es de vital importancia, por este motivo la inercia viene a ser una variable más dentro del modelo de despacho, rigiendo como una restricción que el modelo debe solventar para garantizar niveles de operación normales [35], [36]. En este aspecto la inercia que cada unidad de generación aporta a la inercia del sistema depende

de la tecnología en que basa su funcionamiento, así cada unidad puede aportar más o menos inercia o incluso no aportar como el caso de las ERNC [37], [38], para poder suplir esta falta de inercia existen algunos métodos que ayudan a corregir, uno de ellos es el empleo de un sistema de almacenamiento, para el caso en estudio basado en baterías [39], [40].

Cuando se tiene un sistema de generación variado entre sistemas convencionales y ERNC uno de los aspectos más importantes es la estabilidad de frecuencia, hoy por hoy las plantas convencionales son las únicas que participan en la regulación primaria de frecuencia. Los sistemas fotovoltaicos y eólicos no pueden brindar este tipo de regulación debido a que operan a su máxima potencia [41], para que puedan brindar aporte sería necesario que disminuyan su producción y mantengan una reserva de potencia, algo que debido a las características actuales es económicamente inaccesible, sin embargo, en un futuro esto sería inevitable y brindaría una inercia al sistema [42].

En casos como el de Alemania se prevé que la generación alcance 70 GW en plantas fotovoltaicas y 80 GW de plantas eólicas, dado que la demanda máxima actual es de 81 GW [43] lo que buscan es que toda la demanda sea cubierta por sistemas renovables, esto ha llevado a que ciertas plantas fotovoltaicas ya cuenten con control de frecuencia. En [44] se demostró que la respuesta de frecuencia adicional de una máquina síncrona se la puede emular con sistema fotovoltaicos autocontrolados en operaciones interconectadas.

Ya con esta información se buscará un modelo de despacho económico basado

en programación lineal [45], donde se presente el beneficio de sistemas de baterías acoplado a un sistema fotovoltaico, así como el papel que desempeña la restricción de inercia, presentando datos como: el problema, el caso de estudio, función objetivo y restricciones propias de un despacho de esta manera poder suministrar energía utilizando los sistemas pertinentes, encontrando el equilibrio entre niveles adecuados de energía y costos [46], [47].

2. Sistema Nacional Interconectado

El crecimiento poblacional es uno de los desafíos a los que se enfrenta el sector eléctrico, lo que provoca que las instituciones a cargo deban estar preparadas para poder cubrir la demanda. Esto implica una mayor capacidad de producción, redes de transmisión perfectamente acordes para poder transportar la producción sin ningún tipo de inconveniente y finalmente el sistema de distribución que crece al ritmo del aumento poblacional creando nuevas redes o repotenciando las existentes.

Esto ha causado que los órganos rectores del campo eléctrico busquen nuevas opciones de generación para poder cubrir la demanda creciente. Debido al estado actual del mundo, la búsqueda de nuevas opciones de generación prioriza que deben ser sostenibles y amigables con el ambiente, razón por la cual las energías renovables han ganado mucho terreno, no solo por su eficiencia sino porque representa menores costos de producción, ya que su principal fuente son los recursos naturales. A diferencia de las plantas termoeléctricas que representan un costo por la adquisición del combustible para la operación,

costos en el traslado, almacenamiento y mantenimiento de este.

Las unidades de producción ERNC se han integrado al sistema nacional interconectado sin complicaciones y son las hidroeléctricas las que se han convertido en la base principal del despacho, relegando a las plantas termoeléctricas a ser una fuente de apoyo en situaciones de demandas altas.

Para dar mayor firmeza al SNI se plantea la inserción de sistemas de almacenamiento de energía, de esta manera otras tecnologías como centrales fotovoltaicas o eólicas pueden proporcionar energía al sistema de manera continua, haciendo que se necesite cada vez menos a las plantas termoeléctricas.

3. Tipos de generación

Existen varias formas de convertir energía en electricidad y los procesos necesarios para esta conversión dependen mucho del tipo de tecnología que se tenga acceso o se necesite. Por este motivo es necesario definir el concepto de planta o central eléctrica, que es la integración de subsistemas o un sistema en sí que puede generar electricidad cumpliendo requerimientos económicos, técnicos y ambientales.

En los siguientes apartados se describirán algunas de las tecnologías más relevantes que aportan energía a un sistema interconectado.

3.1. Generación Hidroeléctrica

Este tipo de tecnología consiste en una de las más importantes hoy en día y también la más empleada, los beneficios que presenta dentro de un sistema interconectado son amplios tanto en la parte técnica operativa como en la ambiental. Debido a que su funcionamiento se basa en el

aprovechamiento del agua, los costos por operación son bajos al contar con este recurso en la naturaleza, convirtiéndola en una tecnología económica, dejando a tecnologías más costosas para que cubran las horas pico de demanda.

Este tipo de generación basa su funcionamiento en máquinas rotativas que almacenan energía cinética, razón por la cual su aporte a la estabilidad de frecuencia es alto, brindando robustez al sistema y evitando caídas bruscas de frecuencia.

3.2. Generación Termoeléctrica

Hasta hace algunos años este tipo de generación era la más utilizada para abastecer una demanda, llegando a ser la energía base de un despacho económico, actualmente esta tecnología presenta muchas desventajas por lo que su uso ha sido relegado a completar bloques de demanda donde se necesita mayor capacidad de energía.

Al ser una tecnología que se basa en la quema de combustibles fósiles su funcionamiento es costoso, pues se debe tener en cuenta la compra del combustible (diésel, fuel oil, carbón, etc.) que generalmente proviene de una fuente no renovable, haciendo cada vez más costosa su obtención. Por otro lado, su funcionamiento está basado en la quema de estos combustibles para generar vapor, el mismo que mueve las aspas de una turbina produciendo energía eléctrica. Este proceso hace que la combustión genere un desperdicio y emita gases tóxicos al ambiente, haciendo de esta una tecnología poco amigable al ambiente [5].

Por otro lado, una de sus principales ventajas es la disponibilidad que tiene y su bajo costo de construcción [6], eficiencia al empleo de un ciclo

combinado, que aprovecha la salida de gases de la primera turbina y los utiliza nuevamente para producir vapor, además hace funcionar una segunda turbina de manera que gana eficiencia en una carga de combustible.

3.3. Generación Eólica

Esta es una de las nuevas tecnologías que ayuda a la generación de energía limpia dentro de las ERNC, al utilizar la fuerza del viento que ayuda a girar las aspas del generador y transforma la energía mecánica en energía eléctrica [8].

Este tipo de generación es mayormente empleado en sistemas aislados, donde se dificulta proveer de energía a través de un sistema interconectado, pero también es utilizado en sistemas interconectados como fuentes de respaldo para poder completar el abastecimiento de la demanda.

Algunos de los parámetros más importantes a tomar en cuenta son los sistemas en los que se trabaja, estos pueden ser de corriente continua o corriente alterna. El primero basa su funcionamiento en un dínamo que tiene escobillas, esto exige un alto mantenimiento y lo hace más pesado en comparación a un generador de la misma capacidad de corriente alterna. En tanto que para los sistemas de corriente alterna presenta alternadores y generadores de inducción.

Los alternadores se emplean principalmente en instalaciones autónomas desconectadas a la red [7], esto debido a que su velocidad debería ser constante para mantener un valor fijo de frecuencia y se necesitaría de un sistema complejo de control para poder adaptar a la red.

No así, el caso de los generadores de inducción que una vez conectadas a la red giran a velocidad constante

impuesto por la frecuencia de la red, dependiendo de la intensidad del viento para entregar más o menos energía [7].

Cabe señalar que debido a los diferentes acoples que pueden tener al integrarse a un sistema interconectado, su diseño no permite el aporte de inercia al sistema, de este modo no participa en la estabilidad de frecuencia.

3.4. Generación Fotovoltaica

Al igual que la generación eólica este tipo de generación aprovecha el recurso natural renovable de la radiación solar a través de paneles captadores. Esta radiación es receptada en la atmósfera sobre una superficie perpendicular y es denominada constante solar, con un valor aproximado de 1353 W/m^2 [8]. De esta radiación 1/3 llega a la tierra y es aprovechable, esta se divide en tres tipos que son:

Directa: radiación recibida directamente desde el sol sin ningún tipo de obstrucción.

Difusa: este tipo de radiación sufre alguna desviación afectando su dirección o por la reflexión en la atmósfera.

Albedo: este tipo de radiación se recibe por reflexión del suelo o superficies próximas al panel fotovoltaico.

3.4.1. Geometría del movimiento

El movimiento que presenta la tierra alrededor del sol es uno de los principales puntos a tomar en cuenta cuando se trata de centrales fotovoltaicas, pues la posición en la que se ubiquen los paneles determinará una mayor producción de energía y el correcto aprovechamiento de la captación de radiación.

Así pues, el movimiento de la tierra se realiza en una forma elíptica, existiendo

puntos más y menos alejados del sol, tomando como punto de referencia la línea equinoccial.

$$r = r_0 \left\{ 1 + 0.017 \sin \left[\frac{2\pi * (d_n - 93)}{365} \right] \right\} \quad (1)$$

Donde:

d_n : Número de día del año

r_0 : distancia promedio o unidad astronómica $r_0 = 1.496 \times 10^8 \text{ km}$

Analizando el movimiento de la tierra se evidencia que existe un ángulo constante de 23.45° entre el plano de la trayectoria elíptica y el eje polar [9], por otro lado, el ángulo que existe entre la distancia de la tierra al sol y el plano equinoccial es variable y además es el responsable de existencia de las estaciones a lo largo del año.

3.4.2. Generador Fotovoltaico

Se define como generador fotovoltaico a la disposición de paneles fotovoltaicos para el abastecimiento de una demanda determinada. Su composición está dada por el número total de paneles calculado por $N_p * N_s$ donde, N_p indica el número de ramas y N_s el número de paneles en serie [9]. Estos datos son importantes en la construcción del generador, ya que N_p nos brinda la corriente de la unidad generadora, mientras que N_s nos brinda el voltaje de esta.

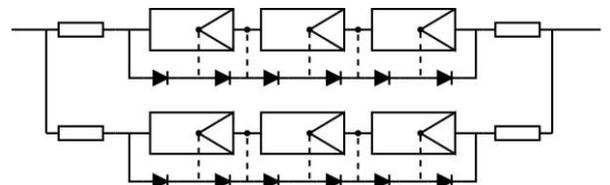


Figura 1. Composición y distribución de un generador fotovoltaico.

3.4.3. Conexión a la red

La generación fotovoltaica puede o no ser conectada a la red de distribución

convencional, cuando esto ocurre pasa a ser un Sistema Fotovoltaico Conectado a la Red (SFCR) que tiene por finalidad producir energía con las condiciones requeridas para poder acoplarse a la red, para este efecto es necesario de un inversor DC/AC y las debidas protecciones como se ilustra en la Figura 2.

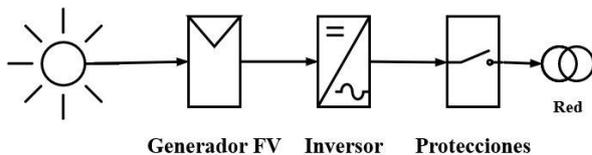


Figura 2. Estructura de un SFCR

Si es una persona natural o consumidor quien implementa este sistema puede verse beneficiado por brindar energía a la red, debido a que se convierte en un punto de generación distribuida que aporta al sistema de distribución. Para este efecto existen dos formas de retribución. La primera consiste en una retribución económica (net billing), la segunda es el balanceo neto (net metering), donde al consumidor se le otorga notas de crédito por la energía suministrada [46], [48], [49]. Esto depende de las regulaciones del mercado en el cual se esté trabajando [50].

4. Tecnologías de almacenamiento

Cada vez son más las fuentes de generación que aprovechan los recursos naturales como el agua, viento, radiación, entre otras. Este tipo de tecnologías presentan un avance en cuanto a generación limpia y el aprovechamiento de recursos que no implica un costo en su adquisición, sin embargo, este tipo de tecnologías presentan problemas con respecto a una producción constante, ya que los recursos naturales varían dependiendo del lugar geográfico donde se encuentre

la central de generación y la estación del año [11].

Por este motivo, un importante acople a los sistemas ERNC son las tecnologías de almacenamiento que pueden ayudar a contrarrestar la intermitencia de la producción, almacenando energía cuando se tenga mayor entrega de recursos y despacharlo cuando más haga falta como son horas punta [10].

Los puntos más destacados del almacenamiento de energía son:

- Reserva energética de mayor capacidad que una reserva de combustibles fósiles.

- Permite una viabilidad económica de las energías renovables.

- Amortiza los costos altos de horas punta.

- Disminuye la necesidad de instalar centrales de generación.

Los sistemas de almacenamiento de energía presentan variaciones con respecto a su tecnología interna de operación, dando paso a múltiples opciones que podemos aprovechar dependiendo la necesidad que se tenga.

4.1. Sistema Neumático

Este sistema se basa en la inyección de aire a altas presiones que oscilan entre 60 – 70 bar en depósitos subterráneos, estos sistemas también son conocidos como CAES (Compressed Air Energy Storage) por sus siglas en inglés. La compresión del aire se la realiza en horas de baja demanda para luego ser enviadas en horas de demanda alta de forma progresiva y así lograr un mayor rendimiento [12].

Como todo sistema presenta ciertas ventajas y desventajas en su empleo [13], [14].

Ventajas

- Alta velocidad de respuesta.
- Almacenamiento de grandes cantidades de energía.
- Bajos costos en el almacenamiento.

Desventajas

- Congelamiento de los álabes de la turbina por la descompresión del aire.
- Sobrecalentamiento al momento de comprimir el aire.
- Cámaras selladas de almacenamiento.

Debido a que este sistema de almacenamiento se basa en la compresión de aire, su comportamiento en cuanto a presión y temperatura viene dado por la siguiente expresión:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{(K-1)}{K}} \quad (2)$$

Donde:

- T₁: Temperatura inicial
- T₂: Temperatura final
- P₁: Presión inicial
- P₂: Presión final
- K: Índice politrópico del proceso irreversible de compresión

Estos factores actúan durante todo el proceso, el cual está representado en forma conceptual en la Figura 3.

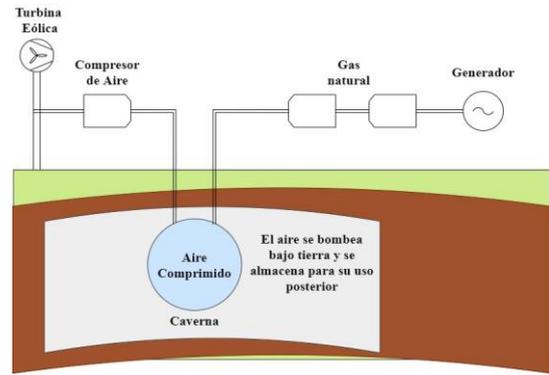


Figura 3. Estructura conceptual de un CAES.

4.2. Volante de Inercia

El volante de inercia es un sistema de almacenamiento de energía en forma mecánica [12], su principio de funcionamiento se basa en la acumulación de energía cinética para luego ser transformado en energía eléctrica, este proceso se realiza mediante el movimiento mecánico de un generador, por tal motivo es también llamado “batería mecánica”, debido a esto una de sus principales características es la acumulación y entrega de energía en poco tiempo[15]–[17].

Dentro de sus primeros usos constaban máquinas de arcilla, prensas y troqueladoras; luego de la revolución industrial se empezó a dar distintos usos y de mayor aprovechamiento para la producción como almacenamiento de energía, vehículos, trenes, entre otros.

Los actuales diseños poseen densidades entre los 45 a 90 Wh/Kg y el peso restante del sistema oscila entre el 30% y 60% de la masa de rotor, dando mayor eficiencia al momento de su uso [16].

La cantidad de energía que puede almacenar un volante de inercia se expresa de la siguiente forma:

$$E = \frac{1}{2} I * \omega^2 \quad (3)$$

Donde:

I: Momento de inercia del volante

ω : Velocidad Angular

Otro factor que determina la capacidad de almacenamiento de energía es la resistencia del material con el que está construido, este factor indica el máximo de energía que puede almacenar el volante [15]–[17].

4.3. Baterías

Este sistema de almacenamiento ha ganado mucho terreno en diferentes campos ya sea desde el uso doméstico hasta un nivel industrial, debido a la gran versatilidad que tienen para entregar energía, así como también su entrega constante y energía específica. Su almacenamiento se basa en un proceso químico denominado redox (reducción – oxidación) donde internamente el ácido provoca cambios en sus electrodos produciendo que un electrodo se reduzca y el otro se oxide.

Existen parámetros que indican sus especificaciones y capacidades que tienen y son:

Tensión en circuito abierto: Voltaje máximo que puede entregar.

Capacidad: Muestra la capacidad de energía que puede suministrar en un tiempo específico (energía).

Estado de carga: Indica el estado actual que tiene el dispositivo con respecto a su capacidad nominal.

Estado de Vida: Denota la capacidad de la unidad de poder seguir almacenando y suministrando energía.

Con el avance de la tecnología se han venido desarrollando diferentes tipos de aleaciones que ayudan al proceso

químico de las baterías, dando un rango de valores esperados siendo más o menos eficientes, todo depende de los materiales empleados.

La Tabla 1 indica algunas de las aleaciones de baterías y sus características.

Tabla 1. Características de aleaciones de baterías.

Tipo de Batería	Eficiencia	Temperatura de operación
Ácido sólido	72 – 78	-5 a 40°C
Níquel – Cadmio	72 – 78	-40 a 50°C
Sulfuro – Sodio	89	300 a 350°C
Ion Litio	100	-30 a 60°C
Vanadio	85	0 a 40°C
Zinc – Bromo	75	0 a 40°C
Metal – Aire	50	-20 a 50°C

La configuración de las conexiones es otro punto para tomar en cuenta, ya que permite aprovechar un aspecto específico de las baterías.

Conexión Serie

Este tipo de conexionado permite duplicar la tensión de salida de cada batería individual, manteniendo la misma capacidad de almacenamiento. Es empleado en el almacenamiento de energía en sistemas eólicos y fotovoltaicos.

Conexión Paralelo

El conexionado en paralelo permite duplicar la capacidad de almacenamiento manteniendo la misma tensión de cada batería.

4.4. Supercondensadores

Los supercondensadores son un tipo de almacenamiento de energía relativamente nuevo que basa su

funcionamiento en los condensadores tradicionales, con la diferencia de que su corriente de descarga y capacidad son mayores [18].

Ya que el funcionamiento consiste en el intercambio de iones y no de masa, lo convierte en un sistema de menos desgaste con respecto a las baterías, esto permite que su uso sea muy amplio obteniendo ventajas significativas. En [19] se muestran estudios de sistemas híbridos que combinan el sistema de baterías y los supercondensadores, con un marco de control coordinado para una mejor administración de los componentes de baja y alta frecuencia acoplado a un sistema de generación eólico, dando mejores rendimientos en la estabilidad de frecuencia y regulación del voltaje.

Aun cuando los supercondensadores representan una tecnología rentable y superior a las baterías, existen inconvenientes para su completo reemplazo a este tipo de almacenamiento como se describe en [20]–[23]. Un punto importante en el comportamiento es el cambio de voltaje como sugieren [21], [22] y [23], depende del cambio del estado inicial en el que se encuentre el supercondensador. Esto influye en el desempeño cuando se presente una variación de carga, así como también el tiempo de carga y descarga, factores que afectan a los nodos de una red inalámbrica.

Los estudios que se realizan sobre los supercondensadores van describiendo el alto impacto que pueden llegar a tener, sabiendo aprovecharlos en varios campos como en el mundo de la medicina [24], todo depende del modelo que se diseñe, dando a entender que cada sistema debe ser previamente estudiado y analizado para poder implementar un sistema específico que cubra las necesidades.

5. Despacho Económico

Cuando se habla sobre producción de energía se debe tener en cuenta todas las etapas del proceso, desde su generación hasta su consumo, evaluando los beneficios y los problemas que se tenga durante el proceso. Uno de los puntos clave es el económico, pues se debe lograr mayor rendimiento al menor costo posible.

El despacho económico es la característica que ayuda al sistema eléctrico de potencia a lograr objetivos, como maximizar el beneficio social y minimizar el costo de producción. Lo primero para tener en cuenta es la demanda a la que se va a abastecer y cuál será su proyección para el futuro despacho, una adecuada proyección de la demanda facilitará el proceso de despacho económico, teniendo en consideración que el despacho real no será igual al programado, pero si muy cercano haciendo eficiente la operación.

Dentro de un sistema eléctrico de potencia el despacho brinda coordinación entre la cantidad de producción de potencia activa y los puntos críticos de alta demanda, decidiendo estratégicamente que centrales de generación son las que deben despachar más o menos. Así también evalúa los costos de producción de cada unidad de generación, encontrando el modelo óptimo que tenga un balance entre la energía entregada y el valor total, esto en beneficio tanto de la entidad encargada de producir (sea pública o privada) como también del usuario final y que no se vea afectado en el pago del servicio. Todo esto se lo realiza respetando criterios de calidad como restricciones de seguridad.

Un despacho puede ser modelado de distintas formas eligiendo los parámetros que deseamos obtener, por consiguiente, el resultado que obtengamos puede dar un rendimiento óptimo económico y por ende de entrega de energía, como también un resultado óptimo en cuestión de seguridad y calidad, por tal motivo el modelo debe ser planteado correctamente de acuerdo con los requerimientos que se buscan y las restricciones presentes, planteando una función objetivo adecuada.

Para empezar con el despacho económico se debe tener los valores de costo de producción de las unidades de generación, estos precios están dados por procesos públicos de selección, en base a estos precios se realizará el despacho hasta que la generación sumada sea igual a la demanda del sistema en forma total. Una vez realizado el despacho se tendrá el dato de un generador marginal que viene a ser el que cubre el aumento de la demanda y su costo de operación es denominado Spot [25]-[26] que es el valor que tendrá la energía en el mercado de oportunidad.

Las restricciones dentro del despacho son uno de los puntos claves para un correcto abastecimiento de la demanda, pues estas evitan que las variables adquieran valores ilógicos como potencias de carácter negativo o bien que las mismas se disparen con valores muy altos o bajos.

Una de las restricciones viene dada por la capacidad de producción de cada central de generación [27], la potencia activa calculada en el modelo debe permanecer dentro de los límites de operación y no rebasar la capacidad para la que fue diseñada.

Otra restricción importante es la cantidad de energía que se entregará al sistema, esto modelado de acuerdo con el tipo de tecnología, para el caso en cuestión las centrales de producción hidro y térmicas presentan una restricción por capacidad de energía.

Cuando se tiene el acoplamiento de un sistema de almacenamiento, el modelo de despacho debe ser enfocado a la inclusión de este y el costo que representa como se plantea en [28] y [29], dando así un despacho preferente a los sistemas de almacenamiento y que su impacto en la parte económica sea positivo aliviando los costos de producción.

6. Confiabilidad

En un sistema eléctrico varios son los factores que se involucran al momento de producir energía y abastecer la demanda, diferentes fenómenos que ocurren en los niveles que lo componen ya sea en generación, transmisión o distribución, que pueden ser técnicos o por el ambiente en el cual se encuentra el sistema eléctrico, de este modo pueden existir afectaciones al normal funcionamiento de un SEP que muchas veces son problemas imprevistos y que salen del control humano.

Sea cual sea el motivo el objetivo principal de un SEP es la generación, transporte y consumo de la energía eléctrica y a su vez el despacho debe garantizar que esto se cumpla.

La confiabilidad entonces va muy de la mano al despacho económico y es un punto para tomar en cuenta, ya que se debe entregar energía con índices de calidad garantizando que esta llegue al consumidor sin problemas.

A continuación, se señalan ciertos objetivos que tienen los estudios de confiabilidad que son:

Garantizar niveles de calidad técnica
 Recuperación del suministro sin interrupción
 Permitir la pronta recuperación luego de una interrupción

Un estudio de confiabilidad tiene como objetivo final determinar el requerimiento de reserva para que el sistema cumpla su función.

Conocer los estados del sistema es importante al momento de determinar su funcionamiento, así tenemos un estado de operación y otro de falla, el primero desarrolla su función sin problema y cumple los parámetros establecidos y el segundo es donde no lo puede realizar.

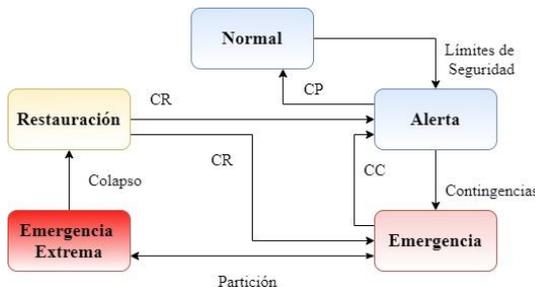


Figura 4. Estados del sistema.

Los siguientes indicadores, son los más utilizados a nivel de generación dentro de un estudio de confiabilidad:

- LOLP:** Probabilidad de déficit.
- LOLE:** Valor esperado de duración anual de déficit.
- EENS:** Valor esperado anual de energía no suministrada.
- EIR:** Fracción esperada de la energía suministrada.
- FOI:** Frecuencia de interrupciones.
- EDOI:** Duración esperada de interrupciones.
- EENSI:** Valor esperado anual de energía no suministrada por interrupción.
- ELCI:** Potencia esperada de déficit por interrupción.

7. Estabilidad en los Sistemas Eléctricos de Potencia

Dentro de los sistemas eléctricos de potencia el tema de estabilidad es fundamental para asegurar un correcto funcionamiento del sistema, desde la etapa de generación hasta el consumo, entregando al sistema niveles de calidad y seguridad.

Se puede definir a la estabilidad de un sistema eléctrico de potencia, como la capacidad que tiene el sistema para regresar a su estado de operación normal después de producirse una perturbación de sus niveles normales [31]. Entonces, la estabilidad del sistema se relaciona con los cambios que presenta a través del tiempo, tomando como punto de referencia una condición de equilibrio [30].

Las perturbaciones que ocurren son de varios tipos como corto circuitos, sin embargo, las variaciones de demanda son las más comunes, presentando una variación entre la potencia generada y la requerida, debido a esto el sistema constantemente se está ajustando.

Actualmente, los sistemas eléctricos operan con máquinas sincrónicas por lo que el principal cometido es mantener en sincronía la operación de todas las máquinas [51].

En la Figura 5 se muestra la clasificación de la estabilidad en un sistema eléctrico de potencia.

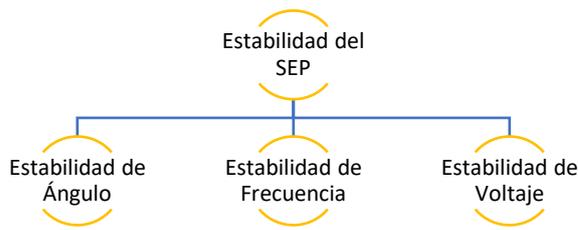


Figura 5. Estabilidad de un sistema eléctrico de potencia

7.1. Estabilidad de Frecuencia

Esta estabilidad está basada en mantener el equilibrio de potencia activa entre generación y demanda, con la finalidad de que la frecuencia se mantenga en su valor nominal [33].

Usualmente los problemas de estabilidad de frecuencia son ocasionados por malas respuestas de equipos, error de coordinación o falta de reserva de generación, debido a esto cualquier variación que exista dentro del SEP afectará al normal funcionamiento del sistema.

El ingreso de sistemas ERNC no aporta mayor impacto a la estabilidad de la frecuencia, principalmente en los sistemas grandes donde el parque generador contiene mayores máquinas sincrónicas.

7.1.1. Control de Frecuencia

Con los cambios que existen dentro de un sistema surge la necesidad de algún tipo de control para mantener a la frecuencia dentro de un rango normal de operación. Para que esto se logre existen tres etapas a cumplirse: control primario, secundario y terciario de frecuencia, donde cada etapa cumple funciones específicas complementando

a la anterior. Previo a estas etapas existe la respuesta inercial, que es el sistema que actúa inmediatamente después de que ocurre una contingencia y evita una caída brusca de frecuencia.

a) Respuesta Inercial

Esta es la primera acción que toma el sistema eléctrico de potencia como respuesta cuando ocurre una contingencia, a fin de evitar un mayor daño en el sistema. Consiste en el aporte de una constante de inercia de cada unidad de generación para que la caída inicial de frecuencia no sea tan profunda, entendiendo que mientras mayor sea la inercia del sistema, menor será la caída, debido a que se tiene mayor tiempo de reacción.

La ecuación (4) presenta los datos que intervienen en el cálculo de esta constante.

$$H = \frac{J\omega_m^2}{2VA_{base}} \quad (4)$$

Donde:

H: Constante de inercia.

J: Momento de inercia de generador y turbina

ω_m : Velocidad angular .

VA: Potencia aparente del generador.

Partiendo de la anterior ecuación, se obtiene la ecuación de oscilación que describe el movimiento de la máquina.

$$2H \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_e \quad (5)$$

Donde:

P_m : Potencia mecánica en la turbina.

P_e : Potencia eléctrica en el generador.

En los sistemas robustos la frecuencia del sistema está dada por

el acoplamiento de los generadores sincrónicos que conforman la red, debido a esto la frecuencia del sistema es la misma en todos los puntos de la red, convirtiéndose en un problema uninodal [39]. Asumiendo esto se puede hallar la tasa de cambio de la frecuencia (ROCOF) en la siguiente ecuación:

$$\Delta f = -\frac{f_0}{2H_{\text{sist}}} \Delta P_L \quad (6)$$

Donde:

f_0 : Frecuencia nominal del sistema.

ΔP_L : Diferencia entre las potencias mecánicas y eléctricas.

Finalmente, integrando la ecuación (6) se obtiene la ecuación de variación de la frecuencia en función de la inercia del sistema.

$$\Delta f = f(td) - f_0 = -\frac{1}{2H_{\text{sist}}} * \Delta P_L \quad (7)$$

Se concluye entonces, que mientras menor sea la inercia de aporte de cada generador, menor será su aporte a la inercia del sistema, incurriendo en caídas más rápidas y valores más bajos de la frecuencia.

En base a esto, el aporte de inercia de cada máquina generadora es importante para lograr una operación con niveles adecuados, cabe mencionar que al no tener partes móviles las plantas fotovoltaicas no inciden en la respuesta inercial.

La siguiente tabla muestra el aporte promedio de unidades de generación con partes móviles.

Tabla 2. Valores de constantes de inercia H

Tipo de unidad generadora	H[s]
Unidad Térmica 3600 r/min (2 polos) 1800 r/min (4 polos)	2.5 a 6.0 4.0 a 10.0
Unidad Hidráulica	2.0 a 4.0
Unidad Fotovoltaica	0.0
Unidad Eólica	0.0

b) Control Primario de Frecuencia

El siguiente paso para restaurar los valores previo a contingencias es el control primario de frecuencia, el mismo que se inicia después de la respuesta inercial de 3 a 5 segundos. Este tipo de control actúa de forma local en cada unidad de generación y está limitado por la inercia propia de cada máquina.

Se debe mencionar que una vez que actúa el valor de frecuencia no vuelve a su valor nominal debido al error que presenta en régimen permanente.

c) Control Secundario de Frecuencia

La siguiente etapa empieza corrigiendo el error de régimen permanente dejado por el control primario de frecuencia, lo que significa que la frecuencia vuelve a valores nominales de operación, reestableciendo los flujos de potencia programados.

Para este tipo de control se tiene un único lazo centralizado que permite reestablecer el valor nominal, si esto no ocurriese así cada unidad impondría un valor y el sistema de control sería inestable.

d) Control Terciario de Frecuencia

Por último, la tercera etapa se encarga de redistribuir las cargas de potencia a las unidades asignadas en función del costo, lo que significa que se reestablece el modelo óptimo técnico económico del sistema, incluyendo las reservas de potencia, dejando al sistema en óptimas condiciones en caso de volver a enfrentar una nueva contingencia.

8. Inercia Sistémica

Es un hecho que el avance tecnológico en el sector eléctrico beneficia la operación del sistema, integrando nuevas tecnologías, mejorando características como: calidad de energía, reducción de costos, aporte ambiental, entre otros. Sin embargo, el incluir ERNC al sistema lo perjudica en cuestión de respuesta inercial, derivando a su vez en el deterioro de la estabilidad de la frecuencia.

La inercia del sistema se la define en la siguiente ecuación.

$$H_{\text{sistema}} = \frac{\sum_{i=1}^n H_i * S_i}{\sum_{i=1}^n S_i} \quad (8)$$

Donde:

H_i : Constante de inercia del generador i .

S_i : Capacidad nominal MVA del generador i .

n : Cantidad de generadores en el sistema.

8.1. Reserva Inercial

Como ya se mencionó, el ingreso de nuevas tecnologías ERNC a un sistema eléctrico convencional repercute en la inercia del sistema, provocando mayor número de caídas de frecuencia, dato que seguirá creciendo a medida que ingresen más unidades ERNC. Por este

motivo se ha propuesto un nuevo tipo de reserva llamada “reserva inercial”.

Esta reserva consiste en definir previamente un número de unidades de generación convencional que deben despachar, teniendo en cuenta la cantidad de ERNC que se va a inyectar y de tener una respuesta inercial adecuada ante posibles contingencias [30].

8.2. Inercia Sintética

Cuando por razones ajenas se pierde potencia, esta será compensada con las reservas de masas rotantes de generadores o también denominada inercia sintética.

La inercia sintética es un método que ayuda a estabilizar el control de frecuencia al momento de ganar o perder carga o cuando se aumenta o disminuye una unidad de generación.

La regulación de frecuencia viene dada por las unidades de generación de tipo convencionales, en cambio las unidades de ERNC no presentan este tipo de aporte, debido a esto se realizan ciertos tipos de control para poder ayudar al sistema a tener un mejor control sobre el cambio de frecuencia.

En [41] se tiene el caso de una central fotovoltaica donde el inversor puede proporcionar una respuesta de inercia sintética al cambio de frecuencia, ya que este tipo centrales no poseen un generador en movimiento (como el caso de una turbina), por tanto, no tienen la capacidad de suministrar energía cinética, sino que el inversor puede emular inercia sintética que causa el mismo efecto.

El control de inercia sintético del inversor fotovoltaico se utiliza para evitar el cambio de frecuencia, lo que

significa que solo actúa en el proceso de subida o bajada de frecuencia [32].

A la par se tiene que mencionar el control primario de frecuencia que le brinda una estabilidad a la operación del sistema, tal como se analiza en [43], la regulación primaria de frecuencia ayuda a la estabilidad de un mercado altamente poblado por unidades no convencionales y que han presentado resultados positivos, esperando que en países de mayores capacidades la generación pueda ser netamente realizada por unidades de tipo renovables.

Con los generadores eólicos la regulación se dará en caso de una baja frecuencia, la potencia mecánica del generador eólico deberá estar por debajo de la potencia disponible del viento, esto es posible cambiando la velocidad del rotor o cambiando el ángulo de la pala.

Los estudios realizados en [43] y [44] muestran que las unidades de generación no convencional de tipo renovable pueden ayudar al control primario de frecuencia, dando como resultados que a una mayor proporción de energías renovables se entrega menos inercia al sistema, la inercia faltante debe ser compensada y para ellos se debe incurrir en el estudio a profundidad de las tecnologías y analizar de qué forma pueden entregar mayor inercia.

8.3. Respuesta Inercial de BESS

Si bien la reserva inercial es un tipo de solución para minimizar el efecto que produce la introducción de ERNC a medida que estas tecnologías aumentan, no se tendrá una cantidad suficiente de unidades generadoras convencionales que puedan aportar la inercia necesaria para que el sistema funcione correctamente. Es por esto que se tiene

dos soluciones para afrontar el problema de inercia.

El primero consiste en que las ERNC operen por debajo del MPPT dejando así una reserva de control primario y puedan aportar inercia al sistema, esta solución es factible a través de lazos de control [36], sin embargo, esta solución no es viable por el punto de vista económico, ya que provoca un aumento en el costo de operación. La segunda opción es el uso de un sistema de almacenamiento de energía capaz de aportar respuesta inercial, esta solución tiene como principales desventajas los esquemas de control y costos de inversión elevados.

Un sistema basado en baterías BESS (Battery Energy Storage System) puede brindarnos ese aporte de inercia a diferencia de las unidades de generación que basan su control en el aumento o reducción de la velocidad de operación. El BESS es capaz de absorber o aportar energía al sistema dependiendo la contingencia que se presente, es así que este sistema tiene una respuesta promedio de 20ms y su aporte se da en la respuesta inercial y en el control primario de frecuencia, contando con una inercia promedio de 0.20 segundos dependiendo el tipo de control que presente el convertidor [35].

Este aplicativo como control de estabilidad, ya ha sido adoptado por entidades buscando mejoras en sus sistemas. Así se tiene el caso del operador de la red de transmisión de Reino Unido, que ha introducido un servicio rápido de respuesta de frecuencia fijándolo en menos de 1 segundo [36].

9. Metodología

Un punto clave en el modelamiento de las diferentes tecnologías son las producciones de los sistemas ERNC, que fluctúan su aporte de demanda en función de los recursos naturales, como la velocidad del viento o el nivel de radiación, para ello se ha tomado acción con una función probabilística que ayuda a dar más o menos producción.

El modelo matemático que se emplea en la resolución del problema consiste en una programación lineal, minimizando el costo en producción de energía.

A continuación, se detalla el modelo teniendo en cuenta que está diseñado para una operación de 5 días.

9.1. Función objetivo

La función objetivo del modelo de estudio es la minimización de costos en la producción de energía, que busca abastecer la demanda en función de las diferentes tecnologías al menor costo.

Además, contempla la sumatoria de potencias por tecnología en función de parámetros como número de horas y días de la semana. Debido a estos parámetros, la función objetivo se divide en dos secciones para un mejor manejo de datos.

La primera parte consiste en la sumatoria por el número de horas en un día y el tipo de tecnología, dando como resultado los costos de tecnología por los cinco días. Este planteamiento se lo representa en la ecuación (9).

$$\begin{aligned} \text{Costo_Tot}(D) = & \sum_{t=1}^{24} (PH_{t,D} * PE_H) \quad (9) \\ & + \sum_{t=1}^{24} (PT_{t,D} * PE_T) \\ & + \sum_{t=1}^{24} (PFV_{t,D} \\ & * fuFV_t * PE_{FV}) \\ & + \sum_{t=1}^{24} (PFVB_{t,D} \\ & * fuFVB_t * PE_{FVB}) \\ & + \sum_{t=1}^{24} (PEO_{t,D} \\ & * fuEO_t * PE_{EO}) \end{aligned}$$

Donde:

t :	tiempo en horas
D :	tiempo en horas
$PH_{t,D}$:	Potencia hidro en un periodo de tiempo t en un día d.
$PT_{t,D}$:	Potencia térmica en un periodo de tiempo t en un día d.
$PFV_{t,D}$:	Potencia fotovoltaica en un periodo de tiempo t en un día d.
$PFVB_{t,D}$:	Potencia fotovoltaica con batería en un periodo de tiempo t en un día d.
$PEO_{t,D}$:	Potencia eólica en un periodo de tiempo t en un día d.
$PH_{t,D}$:	Potencia hidro en un periodo de tiempo t en un día d.
PE_H :	Precio de generación hidro por MW.
PE_T :	Precio de generación térmica por MW.
PE_{FV} :	Precio de generación fotovoltaica por MW.
PE_{FVB} :	Precio de generación fotovoltaica con batería por MW.
PE_{EO} :	Precio de generación eólica por MW.

- f_{uFV_t} : Factor de uso fotovoltaico en un periodo de tiempo t.
- f_{uFVB_t} : Factor de uso fotovoltaico con batería en un periodo de tiempo t.
- f_{uEO_t} : Factor de uso eólico en un periodo de tiempo t.

La segunda parte consiste en la sumatoria de las potencias de los cinco días que se ha considerado para el caso de estudio. El planteamiento se describe en la ecuación (10).

$$\text{Costo_Tot} = \sum_{D=1}^5 (\text{Costo_Tot}_D) \quad (10)$$

Para el modelamiento se considera precios de acuerdo con el tipo de tecnología, mismos que se manejan por procesos públicos de selección por medio del Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables.

Para el desempeño de los sistemas de ERNC es necesario una probabilidad de disponibilidad en función de la radiación para los sistemas fotovoltaicos, y velocidad del viento en el sistema eólico, debido a que estas tecnologías de generación no producen de manera constante a causa del comportamiento de los recursos naturales.

9.2. Restricciones

En un modelo de optimización las restricciones van en conjunto a la función objetivo y son los parámetros a los que se debe regir la función objetivo y variables que se empleen, así pues, estos parámetros ayudan a obtener datos reales dentro de rangos coherentes y lógicos [45], por ejemplo, en este caso de estudio las restricciones plantean capacidades de producción, energía e inercia.

9.2.1. Capacidad de generación

Esta restricción se basa en las potencias máximas y mínimas que deben brindar al sistema las unidades generadoras según la planificación y las capacidades propias de las unidades.

$$P_{gi_{min}} \leq P_{gi} \leq P_{gi_{max}} \quad (11)$$

Donde:

- P_{gi} : Potencia de la fuente generadora.
- $P_{gi_{min}}$: Potencia mínima que debe entregar la fuente generadora.
- $P_{gi_{max}}$: Potencia máxima que debe entregar la fuente generadora.

9.2.2. Abastecimiento de demanda

El abastecimiento de la demanda considera que la potencia demandada debe ser cubierta por las unidades de generación en cada tiempo t y día D, de modo que la potencia que se genera sea la potencia que se consuma.

$$\begin{aligned} & \sum_{gi=1}^{Ng} PH_{gi} + \sum_{gi=x}^{Ng} PT_{gi} \quad (12) \\ & + \sum_{gi=x}^{Ng} PFV_{gi} + \sum_{gi=x}^{Ng} PFVB \\ & + \sum_{gi=x}^{Ng} PEO_{gi} = PD_{t,D} \end{aligned}$$

Donde:

- Ng : Número de generadores.
- PH_{gi} : Potencia de los generadores hidro
- PT_{gi} : Potencia de los generadores térmicos
- PFV_{gi} : Potencia de los generadores fotovoltaicos
- $PFVB_{gi}$: Potencia de los generadores fotovoltaicos con baterías

PEO_{gi} : Potencia de los generadores eólicos

9.2.3. Restricción de energía

Esta restricción limita la producción de potencia de las unidades de generación de acuerdo con lo establecido, la cual fue delimitada con una producción diaria para la energía hidro y un valor semanal para la energía térmica.

$$\sum_{t=1}^{24} PH_t \leq EH_D \quad (13)$$

$$\sum_{D=1}^5 \sum_{t=1}^{24} PT_{t,D} \leq ET \quad (14)$$

Donde:

PH_t : Potencia hidro en un periodo de tiempo t .

EH_D : Energía hidro en un periodo de tiempo D .

$PT_{t,D}$: Potencia térmica en un periodo de tiempo t y en día D .

EH : Energía térmica en un periodo de cinco días.

9.2.4. Restricción de inercia

Como fue explicado en capítulos anteriores, este tipo de restricción ayuda a la estabilidad de la frecuencia del sistema y puede ser orientado de varias formas, en este caso se considera una constante de inercia que debe ser estable en el tiempo para asegurar una estabilidad ante posibles contingencias.

$$\sum_{gi=1}^{Ng} HH_{gi} + \sum_{gi=x}^{Ng} HT_{gi} \quad (15)$$

$$+ \sum_{gi=x}^{Ng} HFV_{gi}$$

$$+ \sum_{gi=x}^{Ng} HFVB_{gi}$$

$$+ \sum_{gi=x}^{Ng} HEO_{gi} = H$$

Donde:

Ng : Número de generadores.

HH_{gi} : Inercia de los generadores hidro.

HT_{gi} : Inercia de los generadores térmicos.

HFV_{gi} : Inercia de los generadores fotovoltaicos.

$HFVB_{gi}$: Inercia de los generadores fotovoltaicos con baterías.

HEO_{gi} : Inercia de los generadores eólicos.

9.3 Pseudocódigo

En el siguiente apartado se presenta el código de programación empleado para la optimización dentro del entorno GAMS.

Tabla 3. Pseudocódigo del algoritmo del modelo de despacho económico.

Algoritmo de optimización		
Paso 1: Inicio		
Paso 2: Declaración de variables		
G	Generadores	/g1...g126/
FV(G)	Generadores fotovoltaicos	/g1...g24/
FVB(G)	Generadores con batería	/g25/
EO(G)	Generadores eólicos	/g26/
Hidro(G)	Generadores Hidro	/g27...g81/
Term(G)	Generadores Térmicos	/g82...g126/
D	Días de la semana	/d1...d5/
t	Horas	/h1...h24/

Paso 3: Asignación de energías, P_{max} , P_{min} y costos a las variables correspondientes.

Energía térmica semanal →
Energía_Térmica
Energía hidro diaria → D1...D5
Potencia máxima → g1...g126
Potencia mínima → g1...g126
Costos → g1...g126
Factor de uso → g1...g26

Paso 4: Asignación de costos de generación

$$CT_{GEN}(d, t, g) = \sum_{d=1}^l \sum_{t=1}^m \sum_{g=1}^n P_{GEN}(d, t, g) * C_{GEN}(t)$$

Paso 5: Optimización de la función objetivo.

$$FO \rightarrow \min CT_{GEN}(d, t, g)$$

Paso 6: Asignación de restricciones

$$Dem(t, d) = \sum_{d=1}^l \sum_{t=1}^m P_{GEN}(d, t)$$

$$Ener_Hid(t) \leq \sum_{t=1}^m P_{GEN}(t)$$

$$Ener_Ter \leq \sum_{d=1}^l \sum_{t=1}^m P_{GEN}(d, t)$$

$$Ener_Ter \leq \sum_{d=1}^l \sum_{t=1}^m P_{GEN}(d, t)$$

Paso 7: Gráficas de generación y abastecimiento de demanda por tecnología.

Paso 8: Fin

10. Caso de estudio

Para este tema de investigación se ha considerado al parque de generación de Ecuador como campo de estudio, donde se incluye la proyección a futuro de la construcción de la central fotovoltaica “El Aromo”, central que tendrá una capacidad instalada de 200 MW a la que se le considera el acople de un sistema de almacenamiento de energía, que brindará mayor capacidad de producción con beneficio en la entrega de energía en horas pico. Produciendo energía limpia, aprovechando recursos naturales y un aporte en el aspecto técnico al brindar un apoyo a la respuesta inercial del sistema.

El caso de estudio está orientado al sistema de generación y los datos para el modelamiento del sistema fueron tomados del informe anual del CENACE, donde constan las diferentes centrales de producción clasificadas por: tipo de central, potencia y naturaleza jurídica.

La Figura 6 muestra el diagrama unifilar del primer escenario de estudio, en el cual constan 55 hidroeléctricas, 45 térmicas, 24 fotovoltaicas y 1 eólica, dando un total de 125 unidades de generación.

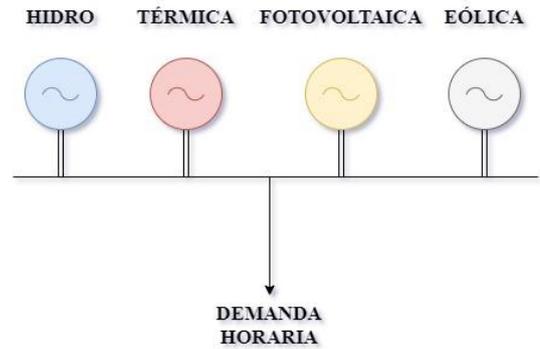


Figura 6. Diagrama unifilar del primer caso.

La Figura 7 representa el diagrama unifilar del segundo escenario, en este se incluye una unidad fotovoltaica con un sistema de almacenamiento de energía, dando un total de 126 unidades de generación, y las regulaciones técnicas ya mencionadas.

Ambos escenarios deben satisfacer la misma demanda eléctrica y de esta manera poder evidenciar los beneficios del modelo desarrollado. La demanda está representada en la Figura 8 y consiste en la potencia promedio del sistema de estudio de los cinco días.

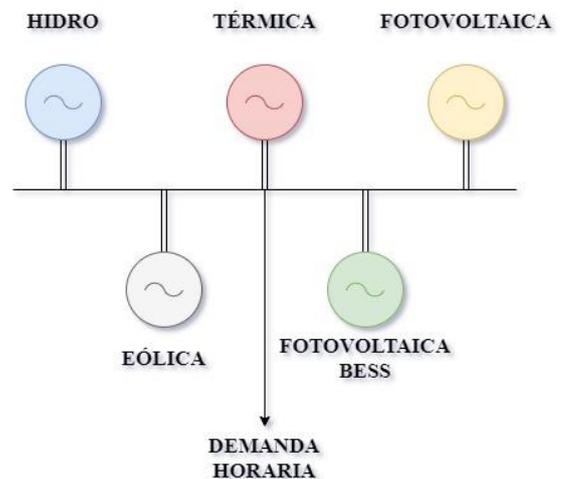


Figura 7. Diagrama unifilar del segundo escenario.

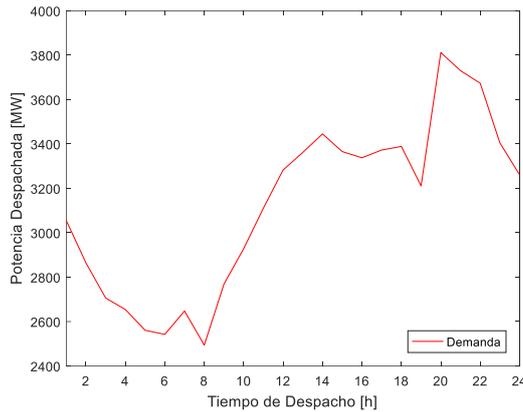


Figura 8. Demanda eléctrica horaria.

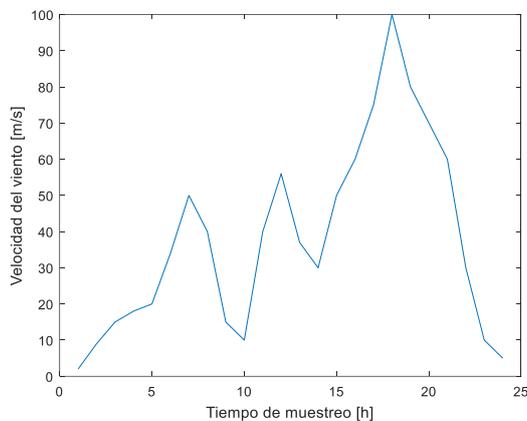


Figura 9. Curva de viento Villonaco

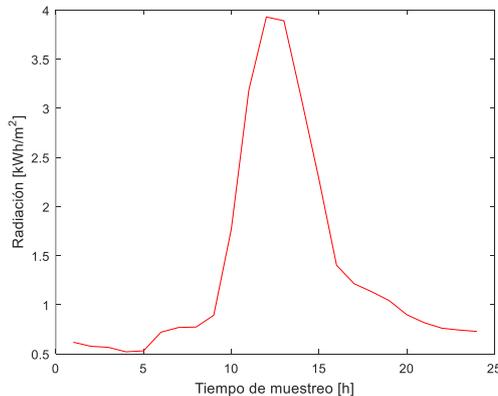


Figura 10. Niveles de irradiancia El Aromo

La Figura 9 muestra los niveles de viento en el cerro Villonaco de acuerdo con las mediciones obtenidas de la página del Inamhi, en ella se describen los puntos más altos de aporte del viento, siendo así que entre las horas 18 y 19 se registra el punto más elevado.

La Figura 10 representan la irradiancia del lugar de construcción de la central fotovoltaica el Aromo, se registra alto nivel de irradiancia entre las horas 11 y 12, este nivel de irradiancia será almacenado para su distribución correspondiente.

Los datos de velocidad del viento y nivel de irradiancia son interpretados como datos probabilísticos para determinar un factor de uso al momento de realizar el despacho.

Tabla 4. Precio de generación renovable.

CENTRALES	PRECIO (cUSD/kWh)
Eólicas	9.39
Fotovoltaicas	52.04
Biomasa y Biogás	9.67
Geotérmicas	9.28
Hidroeléctricas hasta 5MW	5.80
Hidroeléctricas mayores a 5MW hasta 10MW	5.00

La

Tabla 4 presenta los costos de producción de las ERNC, estos precios referenciales se los obtuvo de la resolución de 009/06 de Arconel.

Tabla 5. Unidades de generación que intervienen en el modelo de despacho.

Central de Generación	Potencia (MW)
C.H. Agoyán	154
C.H. Coca Codo Sinclair	1500
C.H. Delsitanisagua	180
C.H. Manduriacu	65
C.H. Mazar	170
C.H. Marcel Laniado de Wind	213
C.H. Minas San Francisco	270
C.H. Paute	1100
C.H. San Francisco	224
C.H. Sopladora	487
C.T. Aníbal Santos Diesel	101
C.T. Esmeraldas	128

C.T. Esmeraldas 2	48
C.T. Guangopolo	24
C.T. Guangopolo 2	48
C.T. Gonzalo Zevallos	140
C.T. Jaramijó	123
C.T. Machala Gas	132
C.T. Trinitaria	134
C.F. Electrisol	1
C.F. Lojaenergy	1
C.F. Paragachi	1
C.F. Renovaloja	1
C.F. Salinas	2
C.E. Villonaco	17
C.F.B. El Aromo	200

La

Tabla 5 muestra las unidades de generación que intervinieron en el modelo de despacho económico, así como su potencia instalada.

11. Análisis de resultados

Una vez ejecutado el modelo de optimización se presentan los resultados obtenidos y su interpretación.

Para el análisis se consideró dos escenarios, sobre los cuales se realizó una evaluación de la potencia que despachan las unidades de generación y su respectivo costo, la representación gráfica de las curvas de demanda y la variación de la inercia del sistema, antes y después de aplicar un sistema de almacenamiento.

Los resultados se basan en el despacho de cinco días que forman el caso de estudio, de aquí se obtienen las curvas de demanda acumuladas, aporte porcentual de las tecnologías al despacho y finalmente la comparación de los costos de producción de los dos escenarios.

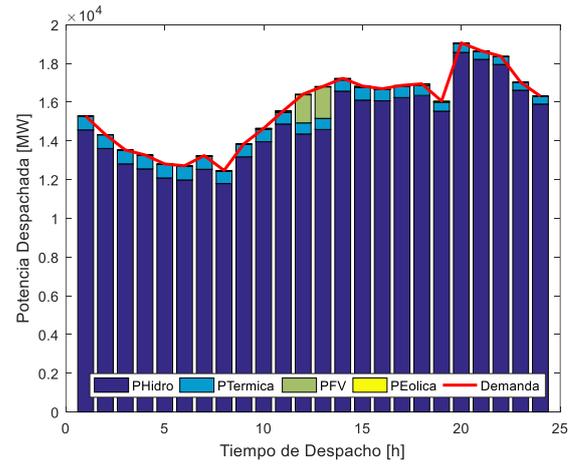


Figura 11. Demanda y potencia total del sistema del escenario 1.

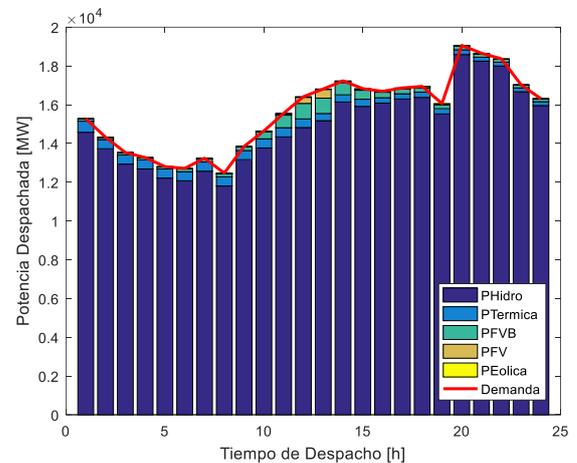


Figura 12. Demanda y potencia total del sistema del escenario 2.

La Figura 11 y la Figura 12 representan el despacho realizado por los diferentes tipos de tecnologías para los dos escenarios, que cubren la misma demanda horaria.

El modelo de despacho original que se aprecia en la Figura 11, evidencia en las horas 13 y 14 un aporte importante de las fuentes fotovoltaicas, reduciendo costos de tecnologías con mayores precios.

De igual manera se aprecia a lo largo de todas las horas un aporte de la energía térmica, que es la encargada de cubrir los bloques de demanda, para

finalmente dejar a la energía eólica completar las demandas restantes.

En este punto el optimizador emplea los recursos que se le presentan obteniendo el mejor escenario en la parte técnica y económica.

En la Figura 12 se presenta el modelo de despacho que se desarrolló con implementación de nuevas tecnologías, siendo la inserción de la central fotovoltaica con sistema de almacenamiento, uno de los objetivos a cumplirse, por otro lado, existe la regulación de despacho en base a la inercia del sistema aplicada como restricción dentro del modelo.

En base a las nuevas implementaciones al modelo, se evidencian notables cambios en el despacho, al igual que en el primer escenario en las horas 13 y 14 se tiene la participación de un tipo de ERNC, esta vez de la nueva central fotovoltaica con BESS. Este nuevo aporte influye también a lo largo del despacho horario reduciendo el uso de energía térmica y reemplazando por otro tipo de energía más económica.

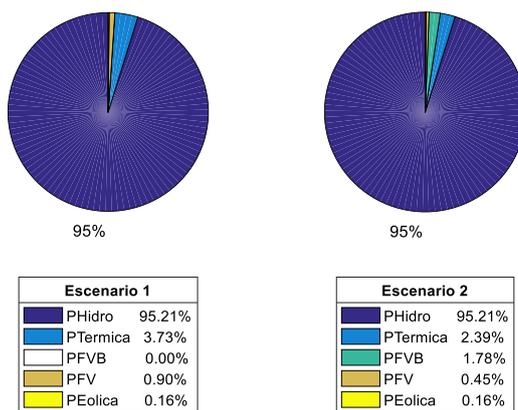


Figura 13. Participación porcentual de los dos escenarios.

Las energías despachadas son presentadas en la Figura 13 de manera porcentual, de esta manera, se evidencia

mejor el aporte de cada tecnología al despacho. Al ingresar la nueva tecnología existe una redistribución del despacho entre las ERNC y la energía térmica.

Se aprecia que la energía base del despacho se mantiene en 95.21% correspondiente a la energía hidro, sin embargo, la energía térmica presenta una reducción de aporte del 1.34%, que representa 5017.45 MWh y la energía fotovoltaica una reducción de 0.45% equivalente a 1672.48 MWh. Esto implica que esta energía es asumida por la nueva unidad fotovoltaica con BESS.

La energía que aporta la nueva unidad de generación obedece a temas técnicos, al tener alta concentración de radiación esta es captada y almacenada en el BESS, creando una unidad de respaldo que esta lista para entregar energía al sistema, cuando otro tipo de generación no esté disponible.

En el caso de la energía eólica, esta es despachada de acuerdo con la disponibilidad del viento como recurso natural, abasteciendo exactamente igual en los dos escenarios, evidenciando que su aporte se encuentra en un punto óptimo.

La unidad fotovoltaica con BESS asume 6689.93MWh provenientes de la energía térmica y fotovoltaica y representan un aporte de 1.78% del despacho del escenario 2. Este aporte energético se traduce en costos de despacho y se representan en las siguientes figuras.

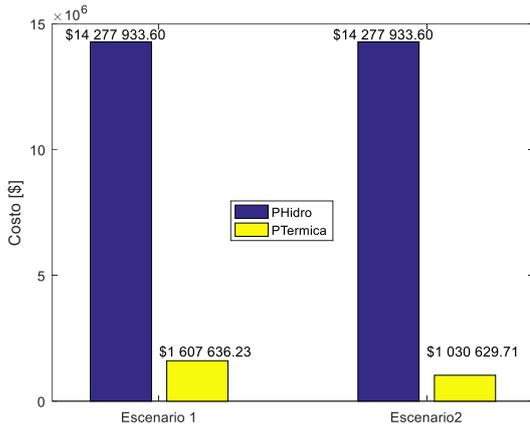


Figura 14. Costos de generación de energía convencional.

Igual que en el análisis anterior, la energía hidro no se ve afectada y su costo de producción permanece igual en los dos escenarios, por otro lado, el costo que presenta la Figura 14 con respecto a la energía térmica tiene una reducción de \$577006.52.

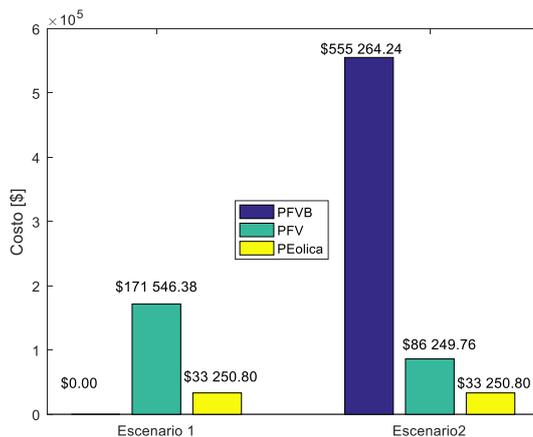


Figura 15. Costos de generación de ERNC.

La Figura 15 compara los costos de despacho de las ERNC que intervienen en el abastecimiento de la demanda, la energía fotovoltaica tiene un decremento de \$85296.62, esta diferencia junto con el costo de energía térmica es asumida por la unidad de generación fotovoltaica con BESS, economizando el despacho. Por último, la energía eólica no presenta cambios en su costo de despacho.

Esto demuestra el cambio que existe entre cada escenario, ya que el optimizador redistribuyó el despacho, empleando unidades de generación más económicas que pueden cubrir la misma demanda.

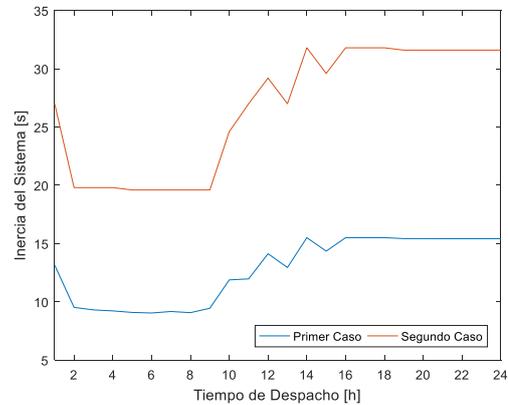


Figura 16. Inercia del sistema en los casos analizados.

El otro aporte que se incluye en el segundo escenario es la restricción de inercia, la Figura 16 muestra el aporte inercial de las unidades de generación al sistema.

El primer escenario (línea azul) presenta una baja inercia, la misma que está dada por las unidades participantes en el despacho, considerando que existe un 0.9% de aporte por parte de unidades fotovoltaicas que no contribuyen inercia.

El segundo escenario (línea naranja) muestra una inercia mayor, esto debido a factores técnicos como la reducción de aporte de energía de las unidades fotovoltaicas, la inserción de un BESS al modelo de despacho, que, si bien no presenta una constante de inercia, aporta inercia sintética que produce el mismo efecto y brinda robustez al sistema.

Al igual que en [37] se puede evidenciar una diferencia en los escenarios de despacho, así en los dos casos propuestos de demanda alta y baja, la inserción de ERNC altera el comportamiento inercial del sistema,

como sucede en los resultados obtenidos en este caso de estudio.

En [36] se evidencia el buen aporte inercial que presentan los dispositivos BESS, sus resultados se ajustan de mejor manera a los obtenidos al incorporar un sistema de almacenamiento y conseguir los resultados esperados.

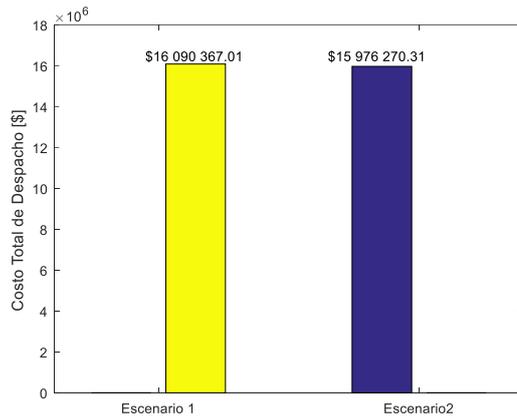


Figura 17. Costos de producción de los escenarios.

Finalmente, la Figura 17 compara los costos totales de producción de los dos escenarios. El primero da un total de \$16,090,367.01 por el abastecimiento de la demanda con las tecnologías disponibles. El segundo presenta un valor de \$15,976,270.31 por el abastecimiento de la misma demanda.

La diferencia de costos es de \$114,096.70, este dato ya es observado en las figuras anteriores, debido a la redistribución de la demanda y la operación de generadores más económicos.

Tanto en este caso de estudio, como en [47] el desempeño económico que se aprecia al utilizar estrategias de despacho en base a la central fotovoltaica, evidenciando una disminución de costos, que es uno de los objetivos a alcanzar, comprobando que las ERNC son viables si se requiere mejorar la operación.

12. Conclusiones

Un modelo de despacho óptimo precisa buscar el mejor escenario que solvente las condiciones planteadas. El modelo desarrollado en el optimizador GAMS cumple con las características iniciales, logrando el abastecimiento de la demanda al ingresar una unidad de generación fotovoltaica, acoplada con un sistema de almacenamiento y con la consideración de la restricción de inercia.

El modelo logra una reducción del costo en cuanto a la generación de cada unidad, evidenciado al contrastar los dos escenarios planteados.

En términos económicos los valores pasaron de \$16,090,367.01 en el primer escenario a \$15,976,270.31 en el segundo. Indicando el impacto que ha tenido el sistema de almacenamiento, dando una reducción del 0.7% en los costos de producción, generando un ahorro de \$114,096.70.

Los resultados gráficos indican que el escenario elegido, evidencia un mejor comportamiento diario del primer escenario con respecto al segundo, cumpliendo un mejor despacho con la intervención de fuentes más económicas y prescindiendo de otras.

Tal es el caso, que se llega a tener una reducción de aporte en el despacho de la energía térmica, dato que aporta a la disminución de costos en la producción y también al cuidado del ambiente aprovechando recursos naturales.

En cuanto a lo técnico y económico, se concluye que la restricción de inercia le da al sistema mayor robustez ante posibles contingencias, al establecer tiempo de respuesta inercial en base a la inercia de las máquinas del sistema, obligando a que una mayor cantidad de

unidades de generación ingresen a operar, lo cual indica que mientras mayor sea la robustez del sistema, mayor será el costo del despacho.

Se debe tomar en cuenta que los sistemas de generación fotovoltaico y de almacenamiento de energía están modelados en base a un factor de uso, en el cual se puede tener mayor o menor aprovechamiento de la radiación y de eso influirá los costos por producción, ya que estos factores también determinan el valor para el despacho una vez almacenada la energía.

Los resultados obtenidos son probabilísticos, ya que fueron planteados con datos obtenidos en un muestreo de 24 horas en cinco días, pues se necesitan datos de seis meses para tener datos netamente reales.

Concluyendo, el escenario desarrollado para cinco días da un indicio de la eficacia que puede ser proyectado a escenarios de mayor tiempo, con la posibilidad de replicarse a un mes completo y posteriormente a un año, tomando en cuenta la disponibilidad de los recursos que necesitan las ERNC.

13. Trabajos Futuros

En base a los resultados obtenidos este documento puede ser tomado como referencia para realizar futuras investigaciones, comprobando el buen rendimiento que se obtiene de un sistema de almacenamiento de energía, considerando lo siguiente:

Acoplar un sistema de almacenamiento de energía a otros tipos de ERNC, que considere los factores naturales y su comportamiento, como la velocidad del viento en la energía eólica. Esto con el fin de poder aprovechar al máximo el

almacenamiento de energía y ser distribuido cuando sea necesario.

Abarcar más de un sistema de almacenamiento en lugares estratégicos tomando en cuenta el tamaño, la capacidad de almacenamiento y el aporte a la regulación primaria de frecuencia.

Obtener mayor cantidad de datos para observar el comportamiento de un escenario más real y obtener datos de costos de un presupuesto anual.

14. Referencias

- [1] CENACE, "Operador Nacional de Electricidad," Quito, Mar. 2019.
- [2] J. M. Lujano-Rojas, R. Dufo-López, and J. L. Bernal-Agustín, "Technical and economic effects of charge controller operation and coulombic efficiency on stand-alone hybrid power systems," *Energy Conversion and Management*, vol. 86, pp. 709–716, 2014, doi: 10.1016/j.enconman.2014.06.053.
- [3] "Qué es ERNC – Mainstream Renewable Power Chile." [Online]. Available: <http://mainstreamrp.cl/tecnologia/que-es-ernc/>. [Accessed: 03-Feb-2020].
- [4] "Pequeñas centrales hidroeléctricas - Ramiro Ortiz Flórez - Google Libros." [Online]. Available: https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=HSejDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA1&dq=generaci%C3%B3n+hidroel%C3%A9ctrica&ots=7iGV_SULPG&sig=73VU1jt8l64OFHn8RIAt4QBvX_U#v=onepage&q=generaci%C3%B3n%20hidroel%C3%A9ctrica&f=false. [Accessed: 07-Feb-2020].

- [5] “ΑΣΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗ, ΠΟΛΥΚΑΤΟΙΚΙΑ ΚΑΙ ΟΙ ΘΕΣΜΟΙ ΤΗΣ ΑΝΤΙΠΑΡΟΧΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑΣ ΙΔΙΟΚΤΗΣΙΑΣ. | Enhanced Reader.” [Online]. Available: [moz-extension://bb739cdf-6ca5-4271-aa3f-cd62aee041ce/enhanced-reader.html?openApp&pdf=https%3A%2F%2Fpergamos.lib.uoa.gr%2Fuoa%2Fd%2Ffrontend%2Ffile%2Flib%2Fdefault%2Fdata%2F2018238%2FtheFile%2F2027461](https://bb739cdf-6ca5-4271-aa3f-cd62aee041ce/enhanced-reader.html?openApp&pdf=https%3A%2F%2Fpergamos.lib.uoa.gr%2Fuoa%2Fd%2Ffrontend%2Ffile%2Flib%2Fdefault%2Fdata%2F2018238%2FtheFile%2F2027461). [Accessed: 07-Feb-2020].
- [6] “Ventajas y desventajas | Centrales Termoelectricas.” [Online]. Available: <https://centrales-termoelectricas.wordpress.com/centrales-termoelectricas/ventajas-y-desventajas-2/>. [Accessed: 07-Feb-2020].
- [7] J. Moragues and A. Rapallini, “Instituto Argentino de la Energía,” *Energía Eólica*, p. 22, 2003.
- [8] “Energía solar fotovoltaica. - Google Libros.” [Online]. Available: https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=GZh1DGUQoOUC&oi=fnd&pg=PA13&dq=energ%C3%ADa+fotovoltaica&ots=m6soG_M_Hi&sig=bp9ri9Etkw_EOAMIj5KUFhi6eNs#v=onepage&q=energ%C3%ADa%20fotovoltaica&f=false. [Accessed: 07-Feb-2020].
- [9] O. Perpiñan Lamigueiro, *E S Fotovoltaica*, 1st ed., vol. 1. España: Creative Common, 2012.
- [10] J. Mírez, “Sistemas de Almacenamiento de Energía,” @ *Railway Systems by CAF Power & Automation.*, vol. 1, no. November 2012, pp. 2–10, 2019.
- [11] E. Reliability, “Electric power industry needs for grid-scale storage applications,” *Lightning in a Bottle: Electrical Energy Storage*, no. December, pp. 231–260, 2011.
- [12] G. J. Martín Chicharro, “PPT: Sistemas De Almacenamiento De Energía,” *Presentation*, pp. 1–133, 2016.
- [13] A. Muñoz Diez de la Cortina, “Almacenamiento de aire mediante aire comprimido: Plantas CAES,” Sevilla, 2015.
- [14] “Tecnologías de Almacenamiento de Energía y Factibilidad en Chile.” [Online]. Available: http://hrudnick.sitios.ing.uc.cl/alumno12/almacena/Almacenamiento_Pneumatic.html. [Accessed: 10-Feb-2020].
- [15] L. R. Masferrer, “Análisis Y Diseño De Volantes De Inercia De Materiales Compuestos,” p. 254, 2005.
- [16] J. G. Bitterly, “Flywheel technology: Past, present, and 21 st century projections,” *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, vol. 13, no. 8, pp. 13–16, 1998, doi: 10.1109/62.707557.
- [17] “Energy Storage Technologies for Electric Applications.” [Online]. Available: http://www.sc.ehu.es/sbweb/energias-renovables/temas/almacenamiento_1/almacenamiento_1.html. [Accessed: 11-Feb-2020].
- [18] H. Yang, “Evaluation of Cell Balancing Circuits for Supercapacitor-Based Energy Storage Systems,” *ITEC 2019 - 2019 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo*, pp. 1–5, 2019, doi: 10.1109/ITEC.2019.8790485.

- [19] M. Miletic *et al.*, "A Review of Energy Storage Systems Applications," *2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*, pp. 94 (6 pp.)-94 (6 pp.), 2019, doi: 10.1049/cp.2018.1926.
- [20] S. Kim and P. H. Chou, "Size and topology optimization for supercapacitor-based sub-Watt energy harvesters," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 4, pp. 2068–2080, 2013, doi: 10.1109/TPEL.2012.2203147.
- [21] H. Yang and Y. Zhang, "Analysis of supercapacitor energy loss for power management in environmentally powered wireless sensor nodes," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 11, pp. 5391–5403, 2013, doi: 10.1109/TPEL.2013.2238683.
- [22] H. Yang and Y. Zhang, "Modeling and analysis of a solar powered wireless sensor node," *2012 International Conference on Computing, Networking and Communications, ICNC'12*, pp. 970–974, 2012, doi: 10.1109/ICCNC.2012.6167570.
- [23] H. Yang and Y. Zhang, "Evaluation of supercapacitor models for wireless sensor network applications," *5th International Conference on Signal Processing and Communication Systems, ICSPCS'2011 - Proceedings*, pp. 1–6, 2011, doi: 10.1109/ICSPCS.2011.6140856.
- [24] C. T. Wentz, J. G. Bernstein, P. Monahan, A. Guerra, A. Rodriguez, and E. S. Boyden, "A wirelessly powered and controlled device for optical neural control of freely-behaving animals," *Journal of Neural Engineering*, vol. 8, no. 4, p. 46021, 2011, doi: 10.1088/1741-2560/8/4/046021.
- [25] T. Ming, W. Deng, J. Wu, and Q. Zhang, "A hierarchical energy management strategy for battery-supercapacitor hybrid energy storage system of electric vehicle," *IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, ITEC Asia-Pacific 2014 - Conference Proceedings*, pp. 1–5, 2014, doi: 10.1109/ITEC-AP.2014.6941167.
- [26] E. N. Leal Canté, "Despacho económico de carga considerando restricciones en la red de transporte con el uso de técnicas de programación lineal," Guatemala, 2005.
- [27] C. Díaz, "Despacho Económico de cargas en sistemas eléctricos de potencia modelado simulación y análisis," Oviedo, 2017.
- [28] R. Lv, Z. Lv, and Z. Cao, "Economic Dispatch of Off-Grid Photovoltaic Generation System with Hybrid Energy Storage," *2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration, EI2 2018 - Proceedings*, pp. 1–6, 2018, doi: 10.1109/EI2.2018.8581933.
- [29] J. Meng, G. Li, and Y. Du, "Economic dispatch for power systems with wind and solar energy integration considering reserve risk," *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, APPEEC*, no. 1, pp. 1–5, 2013, doi: 10.1109/APPEEC.2013.6837207.
- [30] F. Carrasco, "Determinación De Reservas En Presencia De Tecnologías De Generación Variable," Chile, 2014.
- [31] A. Castillo, "Determinación De Reservas En Presencia De

- Tecnologías De Generación Variable,” Colombia, 2013.
- [32] N. Yesid, “Determinación De Reservas En Presencia De Tecnologías De Generación Variable,” Colombia, 2017.
- [33] B. Jimenez, “Determinación De Reservas En Presencia De Tecnologías De Generación Variable,” Cuba, 2016.
- [34] E. M. García Torres, A. Águila, I. Isaac, J. W. González, and G. López, “Analysis of Voltage Profile to determine Energy Demand using Monte Carlo algorithms and Markov Chains (MCMC),” in *Power Engineering Conference (UPEC), 2016 51st International Universities*, 2016, no. Mcmc, pp. 1–6, doi: 10.1109/UPEC.2016.8114092.
- [35] M. del R. Álvarez, “Comparación de estrategias de control de sistemas de almacenamiento de energía para aportar a la regulación de frecuencia,” Sevilla, 2016.
- [36] P. G. Inostroza, “Planificación de la expansión de la generación renovable considerando sistemas de almacenamiento,” Santiago de Chile, 2019.
- [37] P. Tielens and D. van Hertem, “Grid Inertia and Frequency Control in Power Systems with High Penetration of Renewables,” no. 2, pp. 1–6.
- [38] R. Larrea, “Análisis De La Respuesta En Frecuencia En Sistemas De Potencia Con Altos Niveles De Generación Variable Sin Inercia,” Santiago de Chile, 2015.
- [39] V. Marabolí, “Análisis de la incorporación de capacidad de respuesta inercial en centrales fotovoltaicas mediante bess,” Santiago de Chile, 2019.
- [40] C. Gallardo, “Análisis de Estabilidad Angular del Sistema Eléctrico Ecuatoriano,” vol. 33, no. 3, 2014.
- [41] C. Bernardi, “Estudio de la contribución de la generación renovable al control frecuencia potencia Christian,” no. October, pp. 0–60, 2018.
- [42] Z. Jietan, Q. Linan, R. Pestana, L. Fengkui, and Y. Libin, “Dynamic frequency support by photovoltaic generation with ‘synthetic’ inertia and frequency droop control,” *2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration, EI2 2017 - Proceedings*, vol. 2018-Janua, pp. 1–6, 2017, doi: 10.1109/EI2.2017.8245445.
- [43] M. Schmidt, G. Lammert, T. Hess, and P. Schegner, “Case study on primary frequency control with wind-turbines and photovoltaic plants,” *Proceedings - 2014 Power Systems Computation Conference, PSCC 2014*, pp. 1–7, 2014, doi: 10.1109/PSCC.2014.7038112.
- [44] B. Etg-studie, “Systemdienstleistungen unter besonderer Berücksichtigung von Wechselrichtereinspeisungen Fachhochschule Frankfurt am Main,” pp. 1–26, 2020.
- [45] P. Sánchez, A. Ramos, J. Ferrer, J. Barquín, and P. Linares, “Modelos matemáticos de optimización,” *Universidad Pontificia Comillas*, p. 55, 2010.
- [46] ARCONEL, “Regulación Nro. ARCONEL - OO3/18,” *Regulaciones*, 2018.

- [47] E. Marín Molina, "Análisis de estrategias de despacho de una central fotovoltaica con almacenamiento a través de bombeo hidráulico con agua de mar," 2017.
- [48] V. Orejuela, D. Arias, and A. Aguila, "Response of Residential Electricity Demand Against Price Signals in Ecuador," in *PROCEEDINGS of the 2015 IEEE Thirty Fifth Central American and Panama Convention*, 2015, no. Concapan XXXV, pp. 373–378.
- [49] A. Aguila and J. Wilson, "Technical and Economic Assessment of the Implementation of Measures for Reducing Energy Losses in Distribution Systems," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 73, no. 1, p. 12018, Jul. 2017, doi: 10.1088/1755-1315/73/1/012018.
- [50] F. A. Castillo Munoz, A. Aguila Tellez, and J. W. Gonzalez Sanchez, "Analysis of Stability of Tension and Losses of Electric Power in Distribution Networks with Distributed Generation," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 14, no. 11, pp. 4491–4498, 2016, doi: 10.1109/TLA.2016.7795819.
- [51] A. A. Tellez, D. F. C. Galarza, and L. O. Matos, "Analysis of power losses in the asymmetric construction of electric distribution systems," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 13, no. 7, pp. 2190–2194, 2015, doi: 10.1109/TLA.2015.7273776.

15. Estado del Arte

15.1. Matriz de estado del arte

MODELO ÓPTIMO DE DESPACHO ECONÓMICO DE SISTEMAS DE GENERACIÓN CONSIDERANDO RESTRICCIONES DE INERCIA																											
DATOS					TEMÁTICA					FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETIVO			RESTRICCIONES DEL PROBLEMA				PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA							
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	PAÍS	CITAS	TIPOS DE GENERACIÓN	TECNOLOGÍAS DE ALMACENAMIENTO	DESPACHO ECONÓMICO	CONFIABILIDAD	RESPUESTA INERCIAL	INERCIA SINTETICA	CASO DE ESTUDIO	MINIMIZAR COSTO	COSTO DE GENERACIÓN POR TECNOLOGÍA	DESPACHO EN BASE A LA RADIACIÓN	CAPACIDAD DE GENERACIÓN	ABASTECIMIENTO DE DEMANDA	RESTRICCIÓN DE INERCIA	RESTRICCIÓN DE ENERGÍA	DESPACHO ECONÓMICO	GENERACIÓN FOTOVOLTAICA	INERCIA DEL SISTEMA	ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA	PROBABILIDAD DE USO DEL SOL	MINIMIZAR EL COSTO DE PRODUCCIÓN	ESTABLECER INERCIA DEL SISTEMA	ENTREGA DE ENERGÍA	
1	2019	Operador Nacional de Electricidad	Ecuador		X		X						X						X	X				X			
2	2014	Technical and economic effects of charge controller operation ad coulombic efficiency on stand-alone hybrid power systems	España	14		X	X																				
3	2020	Qué es ERNC	Chile		X						X	X												X		X	
4	2011	Pequeñas Centrales Hidroeléctricas	Colombia	80	X																						
5	2002	Perfil ambiental de la generación termoeléctrica en la Argentina en el cuatrienio 1997-2000	Argentina	2	X																						
6	2012	Ventajas y desventajas Centrales Termoeléctricas	Chile		X		X				X																
7	2003	Energía Eólica	Argentina	203	X																						

MODELO ÓPTIMO DE DESPACHO ECONÓMICO DE SISTEMAS DE GENERACIÓN CONSIDERANDO RESTRICCIONES DE INERCIA

MODELO ÓPTIMO DE DESPACHO ECONÓMICO DE SISTEMAS DE GENERACIÓN CONSIDERANDO RESTRICCIONES DE INERCIA																											
DATOS					TEMÁTICA					FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETIVO			RESTRICCIONES DEL PROBLEMA				PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA				SOLUCIÓN PROPUESTA						
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	PAÍS	CITAS	TIPOS DE GENERACIÓN	TECNOLOGÍAS DE ALMACENAMIENTO	DESPACHO ECONÓMICO	CONFIABILIDAD	RESPUESTA INERCIAL	INERCIA SINTETICA	CASO DE ESTUDIO	MINIMIZAR COSTO	COSTO DE GENERACIÓN POR TECNOLOGÍA	DESPACHO EN BASE A LA RADIACIÓN	CAPACIDAD DE GENERACIÓN	ABASTECIMIENTO DE DEMANDA	RESTRICCIÓN DE INERCIA	RESTRICCIÓN DE ENERGÍA	DESPACHO ECONÓMICO	GENERACIÓN FOTOVOLTAICA	INERCIA DEL SISTEMA	ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA	PROBABILIDAD DE USO DEL SOL	MINIMIZAR EL COSTO DE PRODUCCIÓN	ESTABLECER INERCIA DEL SISTEMA	ENTREGA DE ENERGÍA	
8	2002	Energía solar fotovoltaica	España	74	X						X			X	X					X			X				
9	2013	E S Fotovoltaica	España	41	X						X	X		X			X			X			X				
10	2012	Sistemas de Almacenamiento de Energía	Perú	1		X					X	X			X	X			X			X		X		X	
11	2011	Electric power industry needs for grid-scale storage applications	EE. UU.	13		X						X				X						X		X		X	
12	2016	PPT: Sistemas De Almacenamiento De Energía	España	4		X						X	X			X						X		X		X	
13	2015	Almacenamiento de aire mediante aire comprimido: Plantas CAES	España	1		X						X	X			X						X		X		X	
14	2013	Tecnologías de Almacenamiento de Energía y Factibilidad en Chile	Chile	2		X		X				X	X			X						X		X		X	
15	2005	Análisis Y Diseño De Volantes De Inercia De Materiales Compuestos	Italia	7		X		X				X	X			X						X		X		X	
16	1998	Flywheel technology: Past, present, and 21 st century projections	EE. UU.	229		X										X						X		X		X	
17	2011	Energy Storage Technologies for Electric Applications	EE. UU.	84		X										X						X		X		X	

MODELO ÓPTIMO DE DESPACHO ECONÓMICO DE SISTEMAS DE GENERACIÓN CONSIDERANDO RESTRICCIONES DE INERCIA

DATOS		TEMÁTICA								FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETIVO			RESTRICCIONES DEL PROBLEMA				PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA							
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	PAÍS	CITAS	TIPOS DE GENERACIÓN	TECNOLOGÍAS DE ALMACENAMIENTO	DESPACHO ECONÓMICO	CONFIABILIDAD	RESPUESTA INERCIAL	INERCIA SINÉTICA	CASO DE ESTUDIO	MINIMIZAR COSTO	COSTO DE GENERACIÓN POR TECNOLOGÍA	DESPACHO EN BASE A LA RADIACIÓN	CAPACIDAD DE GENERACIÓN	ABASTECIMIENTO DE DEMANDA	RESTRICCIÓN DE INERCIA	RESTRICCIÓN DE ENERGÍA	DESPACHO ECONÓMICO	GENERACIÓN FOTOVOLTAICA	INERCIA DEL SISTEMA	ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA	PROBABILIDAD DE USO DEL SOL	MINIMIZAR EL COSTO DE PRODUCCIÓN	ESTABLECER INERCIA DEL SISTEMA	ENTREGA DE ENERGÍA	
18	2019	Evaluation of Cell Balancing Circuits for Supercapacitor-Based Energy Storage Systems	EE. UU.	5	X											X						X		X			X
19	2018	A Review of Energy Storage Systems Applications	EE. UU.	2	X											X						X		X			X
20	2012	Size and topology optimization for supercapacitor-based sub-Watt energy harvesters	EE. UU.	52	X											X						X					
21	2013	Analysis of supercapacitor energy loss for power management in environmentally powered wireless sensor nodes	EE. UU.	77	X																	X					
22	2012	Modeling and analysis of a solar powered wireless sensor node	EE. UU.	9	X						X			X		X				X		X					
23	2011	Evaluation of supercapacitor models for wireless sensor network applications	EE. UU.	11	X											X						X					
24	2011	A wirelessly powered and controlled device for optical neural control of freely behaving animals	Inglaterra	211	X											X						X					

MODELO ÓPTIMO DE DESPACHO ECONÓMICO DE SISTEMAS DE GENERACIÓN CONSIDERANDO RESTRICCIONES DE INERCIA

DATOS		TEMÁTICA	FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETIVO			RESTRICCIONES DEL PROBLEMA				PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA															
ITEM	AÑO		TÍTULO DEL ARTÍCULO	PAÍS	CITAS	TIPOS DE GENERACIÓN	TECNOLOGÍAS DE ALMACENAMIENTO	DESPACHO ECONÓMICO	CONFIABILIDAD	RESPUESTA INERCIAL	INERCIA SINTETICA	CASO DE ESTUDIO	MINIMIZAR COSTO	COSTO DE GENERACION POR TECNOLOGÍA	DESPACHO EN BASE A LA RADIACIÓN	CAPACIDAD DE GENERACIÓN	ABASTECIMIENTO DE DEMANDA	RESTRICCIÓN DE INERCIA	RESTRICCIÓN DE ENERGÍA	DESPACHO ECONÓMICO	GENERACIÓN FOTOVOLTAICA	INERCIA DEL SISTEMA	ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA	PROBABILIDAD DE USO DEL SOL	MINIMIZAR EL COSTO DE PRODUCCIÓN	ESTABLECER INERCIA DEL SISTEMA	ENTREGA DE ENERGÍA	
25	2014	A hierarchical energy management strategy for battery-supercapacitor hybrid energy storage system of electric vehicle	China	15		X							X									X						
26	2005	Despacho económico de carga considerando restricciones en la red de transporte con el uso de técnicas de programación lineal	Guatemala	2			X	X		X	X	X	X		X	X		X	X						X			
27	2017	Despacho Económico de cargas en sistemas eléctricos de potencia modelado simulación y análisis	España	1			X	X		X	X	X	X		X	X		X	X						X			
28	2018	Economic Dispatch of Off-Grid Photovoltaic Generation System with Hybrid Energy Storage	China	1		X	X	X		X	X	X		X	X	X		X	X				X	X	X		X	
29	2013	Economic dispatch for power systems with wind and solar energy integration considering reserve risk	China	7		X	X	X		X	X	X	X		X	X		X	X				X	X	X			
30	2018	Máster en Energías Renovables en Sistemas Eléctricos Integración de energías renovables en sistemas eléctricos Trabajo práctico de asignatura	España	1				X		X	X	X	X							X				X	X			

MODELO ÓPTIMO DE DESPACHO ECONÓMICO DE SISTEMAS DE GENERACIÓN CONSIDERANDO RESTRICCIONES DE INERCIA

DATOS		TEMÁTICA								FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETIVO			RESTRICCIONES DEL PROBLEMA				PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA						
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	PAÍS	CITAS	TIPOS DE GENERACIÓN	TECNOLOGÍAS DE ALMACENAMIENTO	DESPACHO ECONÓMICO	CONFIABILIDAD	RESPUESTA INERCIAL	INERCIA SINTETICA	CASO DE ESTUDIO	MINIMIZAR COSTO	COSTO DE GENERACIÓN POR TECNOLOGÍA	DESPACHO EN BASE A LA RADIACIÓN	CAPACIDAD DE GENERACIÓN	ABASTECIMIENTO DE DEMANDA	RESTRICCIÓN DE INERCIA	RESTRICCIÓN DE ENERGÍA	DESPACHO ECONÓMICO	GENERACIÓN FOTOVOLTAICA	INERCIA DEL SISTEMA	ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA	PROBABILIDAD DE USO DEL SOL	MINIMIZAR EL COSTO DE PRODUCCIÓN	ESTABLECER INERCIA DEL SISTEMA	ENTREGA DE ENERGÍA
31	2017	Dynamic frequency support by photovoltaic generation with 'synthetic' inertia and frequency droop control	China	5			X		X	X							X						X			
32	2014	Case study on primary frequency control with wind-turbines and photovoltaic plants	Polonia	6			X		X	X										X			X			
33	2007	Systemdienstleistungen unter besonderer Berücksichtigung von Wechselrichtereinspeisungen Fachhochschule Frankfurt am Main	Alemania	3					X																	
34	2018	Regulación Nro. ARCONEL - 003/18	Ecuador		X						X	X														
35	2010	Modelos matemáticos de optimización	España	77							X	X												X		
36	2014	Determinación De Reservas En Presencia De Tecnologías De Generación Variable	Chile	5	X		X	X		X	X	X			X	X				X	X			X	X	
37	2013	Respuesta Inercial De Sistemas De Potencia Con Grandes Inyecciones De Generación Fotovoltaica	Chile	2	X				X	X	X						X				X				X	

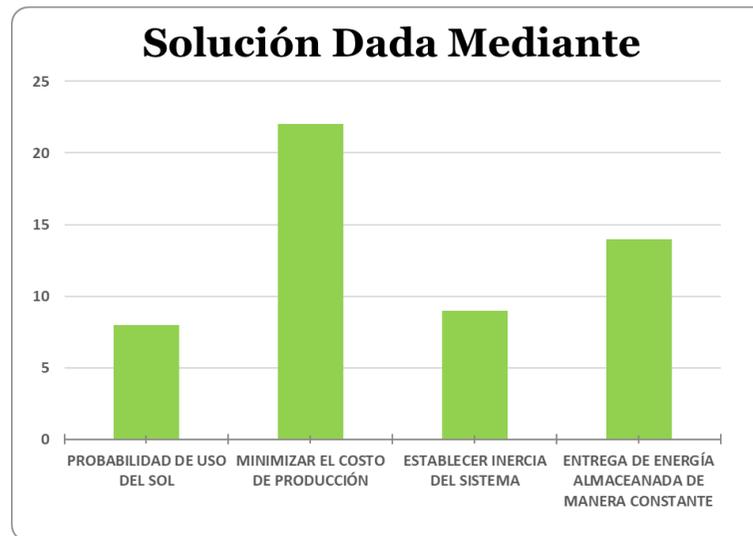
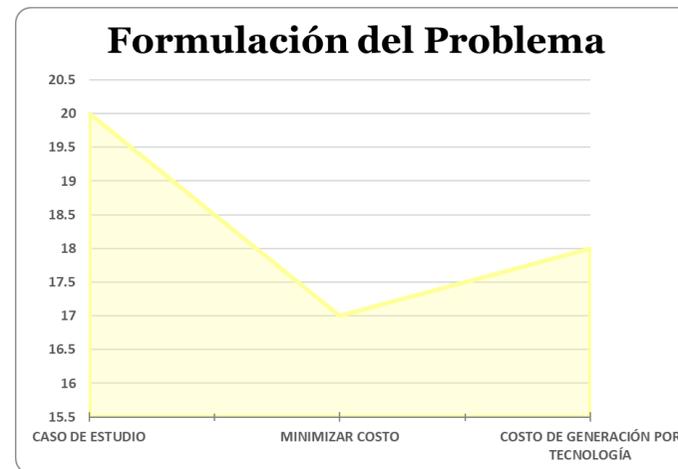
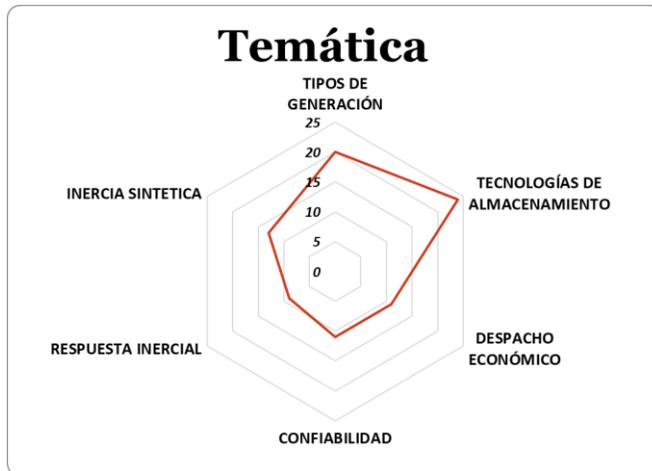
MODELO ÓPTIMO DE DESPACHO ECONÓMICO DE SISTEMAS DE GENERACIÓN CONSIDERANDO RESTRICCIONES DE INERCIA

DATOS		TEMÁTICA								FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETIVO			RESTRICCIONES DEL PROBLEMA				PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA							
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	PAÍS	CITAS	TIPOS DE GENERACIÓN	TECNOLOGÍAS DE ALMACENAMIENTO	DESPACHO ECONÓMICO	CONFIABILIDAD	RESPUESTA INERCIAL	INERCIA SINTETICA	CASO DE ESTUDIO	MINIMIZAR COSTO	COSTO DE GENERACIÓN POR TECNOLOGÍA	DESPACHO EN BASE A LA RADIACIÓN	CAPACIDAD DE GENERACIÓN	ABASTECIMIENTO DE DEMANDA	RESTRICCIÓN DE INERCIA	RESTRICCIÓN DE ENERGÍA	DESPACHO ECONÓMICO	GENERACIÓN FOTOVOLTAICA	INERCIA DEL SISTEMA	ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA	PROBABILIDAD DE USO DEL SOL	MINIMIZAR EL COSTO DE PRODUCCIÓN	ESTABLECER INERCIA DEL SISTEMA	ENTREGA DE ENERGÍA	
38	2017	Regulación de frecuencia en sistemas de potencia que integran fuentes de energía renovables, mediante un controlador PI e imitación inercial	Colombia	1	X				X								X				X				X		
39	2016	Análisis de la estabilidad de frecuencia del Sistema Eléctrico de Potencia de la Isla de la Juventud Eléctrico	Cuba	2	X				X		X										X				X		
40	2016	Comparación de estrategias de control de sistemas de almacenamiento de energía para aportar a la regulación de frecuencia	España	2	X	X			X	X							X				X	X			X		
41	2019	planificación de la expansión de la generación renovable considerando sistemas de almacenamiento	Chile	1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
42	2012	Grid Inertia and Frequency Control in Power Systems with High Penetration of Renewables	Bélgica	185	X				X				X				X				X				X		
43	2015	Análisis De La Respuesta En Frecuencia En Sistemas De Potencia Con Altos Niveles De Generación Variable Sin Inercia	Chile	1	X	X			X												X						

MODELO ÓPTIMO DE DESPACHO ECONÓMICO DE SISTEMAS DE GENERACIÓN CONSIDERANDO RESTRICCIONES DE INERCIA

MODELO ÓPTIMO DE DESPACHO ECONÓMICO DE SISTEMAS DE GENERACIÓN CONSIDERANDO RESTRICCIONES DE INERCIA																											
DATOS					TEMÁTICA					FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETIVO			RESTRICCIONES DEL PROBLEMA				PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA				SOLUCIÓN PROPUESTA						
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	PAÍS	CITAS	TIPOS DE GENERACIÓN	TECNOLOGÍAS DE ALMACENAMIENTO	DESPACHO ECONÓMICO	CONFIABILIDAD	RESPUESTA INERCIAL	INERCIA SINTETICA	CASO DE ESTUDIO	MINIMIZAR COSTO	COSTO DE GENERACIÓN POR TECNOLOGÍA	DESPACHO EN BASE A LA RADIACIÓN	CAPACIDAD DE GENERACIÓN	ABASTECIMIENTO DE DEMANDA	RESTRICCIÓN DE INERCIA	RESTRICCIÓN DE ENERGÍA	DESPACHO ECONÓMICO	GENERACIÓN FOTOVOLTAICA	INERCIA DEL SISTEMA	ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA	PROBABILIDAD DE USO DEL SOL	MINIMIZAR EL COSTO DE PRODUCCIÓN	ESTABLECER INERCIA DEL SISTEMA	ENTREGA DE ENERGÍA	
44	2019	Análisis De La Incorporación De Capacidad De Respuesta Inercial En Centrales Fotovoltaicas Mediante Bess	Chile	1	X	X	X		X	X	X	X	X		X	X	X	X	X		X	X		X	X	X	
45	2014	Análisis de Estabilidad Angular del Sistema Eléctrico Ecuatoriano	Ecuador	2	X				X								X				X				X		
46	2017	Análisis de Estrategias de Despacho de una Central Fotovoltaica con Almacenamiento a Través de Bombeo Hidráulico con Agua de Mar	Chile	2	X	X	X				X	X	X						X	X	X		X		X		
CANTIDAD:					20	24	11	11	9	13	20	17	18	6	9	23	8	9	9	12	10	22	8	22	9	14	

15.2. Resumen e Indicadores del estado del arte



16. Anexos

Unidades de generación

EMPRESA	NATURALEZA JURÍDICA EMPRESA DE GENERACIÓN	CENTRAL DE GENERACIÓN	POTENCIA EFECTIVA CENTRAL (MW)
CORPORACIÓN ELÉCTRICA DEL ECUADOR CELEC EP	PÚBLICA	C. H. AGOYÁN	154
EMPRESA ELÉCTRICA RIOBAMBA S.A.	PRIVADA	C. H. ALAO	11
ALTERNATIVAS DE GENERACION ALTGENOTEC S.A.	PRIVADA	C. F. ALTGENOTEC	1
EMPRESA ELÉCTRICA REGIONAL NORTE S.A.	PRIVADA	C. H. AMBI	8
CNEL CORPORACION NACIONAL DE ELECTRICIDAD E.P.	PÚBLICA	C. T. ANÍBAL SANTOS FOIL	25
CNEL CORPORACION NACIONAL DE ELECTRICIDAD E.P.	PÚBLICA	C. T. ANÍBAL SANTOS DIESEL	101
CNEL CORPORACION NACIONAL DE ELECTRICIDAD E.P.	PÚBLICA	C. T. ÁLVARO TINAJERO	68
CORPORACIÓN ELÉCTRICA DEL ECUADOR CELEC EP	PÚBLICA	C. H. ALAZÁN	3
CORPORACIÓN ELÉCTRICA DEL ECUADOR CELEC EP	PÚBLICA	C. H. BABA	42
EMPRESA ELÉCTRICA REGIONAL NORTE S.A.	PRIVADA	C. H. LA MERCED DE BUENOS AIRES	1
BRINEFORCORP S.A. -CABAL ENERGY-	PRIVADA	C. F. BRINEFORCORP	1
ENERMAX S. A.	PRIVADA	C. H. CALOPE	18
EMPRESA METROPOLITANA DE AGUA POTABLE Y ALCANTARILLADO DE QUITO EMAAP-Q	PÚBLICA	C. H. EL CARMEN	8
EMPRESA ELÉCTRICA REGIONAL DEL SUR S.A.	PRIVADA	C. T. CATAMAYO	15

CORPORACIÓN ELÉCTRICA DEL ECUADOR CELEC EP	PÚBLICA	C. T. CELSO CASTELLANOS	8
CORPORACIÓN ELÉCTRICA DEL ECUADOR CELEC EP	PÚBLICA	C. H. COCA CODO SINCLAIR	1.500
EMPRESA ELÉCTRICA QUITO S.A.	PRIVADA	C. H. LOS CHILLOS	2
EMPRESA ELÉCTRICA REGIONAL DEL SUR S.A.	PRIVADA	C. H. CARLOS MORA CARRIÓN	3
HIDALGO E HIDALGO S. A.	PRIVADA	C. H. CORAZON	1
EMPRESA ELÉCTRICA QUITO S.A.	PRIVADA	C. H. CUMBAYÁ	40
CORPORACIÓN ELÉCTRICA DEL ECUADOR CELEC EP	PÚBLICA	C. T. DAYUMA	2
CORPORACIÓN ELÉCTRICA DEL ECUADOR CELEC EP	PÚBLICA	C. H. DELSITANISAGUA	180
ELECTRO GENERADORA DEL AUSTRO S.A.	PÚBLICA	C. T. EL DESCANSO	18
HIDROALTO GENERACIÓN DE ENERGÍA S.A	PRIVADA	C. H. DUE	50
ECOELECTRIC S.A.	PRIVADA	C. T. ECOELECTRIC	37
CORP. AZUCARERA ECUATORIANA	PRIVADA	C. T. ECUDOS	37
CORPORACIÓN ELÉCTRICA DEL ECUADOR CELEC EP	PÚBLICA	C. T. ENRIQUE GARCÍA	96
ELECTRISOL S.A.	PRIVADA	C. F. ELECTRISOL	1
CORPORACIÓN ELÉCTRICA DEL ECUADOR CELEC EP	PÚBLICA	C. T. ESMERALDAS	128
CORPORACIÓN ELÉCTRICA DEL ECUADOR CELEC EP	PÚBLICA	C. T. ESMERALDAS 2	48
ALTERNATIVAS DE GENERACION GENRENOTEC S.A.	PRIVADA	C. F. GENRENOTEC	1
EMPRESA ELÉCTRICA QUITO S.A.	PRIVADA	C. T. GUALBERTO HERNÁNDEZ	32
GASGREEN S.A	PRIVADA	C. T. EL INGA	5

GENERADORA ROCAFUERTE S. A.	PRIVADA	C. T. GENEROCA	35
ELECTRO GENERADORA DEL AUSTRO S.A.	PÚBLICA	C. H. GUALACEO	1
EMPRESA ELÉCTRICA QUITO S.A.	PRIVADA	C. H. GUANGOPOLO	20
CORPORACIÓN ELÉCTRICA DEL ECUADOR CELEC EP	PÚBLICA	C. T. GUANGOPOLO	24
CORPORACIÓN ELÉCTRICA DEL ECUADOR CELEC EP	PÚBLICA	C. T. GUANGOPOLO 2	48
GONZAENERGY S.A.	PRIVADA	C. F. GONZAENERGY	1
CORPORACIÓN ELÉCTRICA DEL ECUADOR CELEC EP	PÚBLICA	C. T. GONZALO ZEVALLOS	140
HIDROABANICO S.A.	PRIVADA	C. H. ABANICO	39
SOCIEDAD HIDROELECTRICA IMBABURA HIDROIMBABURA S.A	PRIVADA	C. H. HIDROCAROLINA	1
HIDROVICTORIA S.A.	PRIVADA	C.H. HIDROVICTORIA	10
EMPRESA ELÉCTRICA PROVINCIAL COTOPAXI S.A.	PRIVADA	C. H. ILLUCHI I	4
EMPRESA ELÉCTRICA PROVINCIAL COTOPAXI S.A.	PRIVADA	C. H. ILLUCHI II	5
EMPRESA ELÉCTRICA REGIONAL DEL SUR S.A.	PRIVADA	C. H. ISIMANCHI	2
CORPORACIÓN ELÉCTRICA DEL ECUADOR CELEC EP	PÚBLICA	C. T. JARAMIJÓ	123
CORPORACIÓN ELÉCTRICA DEL ECUADOR CELEC EP	PÚBLICA	C. T. JIVINO 1	6
CORPORACIÓN ELÉCTRICA DEL ECUADOR CELEC EP	PÚBLICA	C. T. JIVINO 2	10
CORPORACIÓN ELÉCTRICA DEL ECUADOR CELEC EP	PÚBLICA	C. T. JIVINO 3	46
Unión Andina de Cementos UNACEM	PÚBLICA	C. T. LAFARGE	13
EMPRESA ELÉCTRICA AMBATO REGIONAL CENTRO NORTE S.A.	PÚBLICA	C. T. LLIGUA	3

LOJAENERGY S.A.	PRIVADA	C. F. LOJAENERGY	1
ECOLUZ S.A.	PRIVADA	C. H. LORETO	2
CORPORACIÓN ELÉCTRICA DEL ECUADOR CELEC EP	PÚBLICA	C. T. LORETO	2
EMPRESA ELÉCTRICA REGIONAL NORTE S.A.	PRIVADA	C. H. LA PLAYA	1
EMPRESA ELÉCTRICA QUITO S.A.	PRIVADA	C. T. LULUNCOTO	8
CORPORACIÓN ELÉCTRICA DEL ECUADOR CELEC EP	PÚBLICA	C.T. MACAS PROVISIONAL	2
CORPORACIÓN ELÉCTRICA DEL ECUADOR CELEC EP	PÚBLICA	C. H. MANDURIACU	65
CORPORACIÓN ELÉCTRICA DEL ECUADOR CELEC EP	PÚBLICA	C. T. MANTA 2	19
CORPORACIÓN ELÉCTRICA DEL ECUADOR CELEC EP	PÚBLICA	C. H. MAZAR	170
CORPORACIÓN ELÉCTRICA DEL ECUADOR CELEC EP	PÚBLICA	C. T. MÉNDEZ	2
CORPORACIÓN ELÉCTRICA DEL ECUADOR CELEC EP	PÚBLICA	C. T. MIRAFLORES	44
CORPORACIÓN ELÉCTRICA DEL ECUADOR CELEC EP	PÚBLICA	C. H. MARCEL LANIADO DE WIND	213
CORPORACIÓN ELÉCTRICA DEL ECUADOR CELEC EP	PÚBLICA	C. H. MINAS SAN FRANCISCO	270
EMPRESA ELÉCTRICA QUITO S.A.	PRIVADA	C. H. NAYÓN	29
HIDRONORMANDIA	PRIVADA	C. H. NORMANDIA	50
ELECTRO GENERADORA DEL AUSTRO S.A.	PÚBLICA	C. H. OCAÑA	26
CEM IPNEGA	PRIVADA	C. H. PALMIRA	10
ECOLUZ S.A.	PRIVADA	C. H. PAPALLACTA	6
VALSOLAR ECUADOR S.A.	PÚBLICA	C. F. PARAGACHI	1

EMPRESA ELÉCTRICA QUITO S.A.	PRIVADA	C. H. PASOCHOA	5
CORPORACIÓN ELÉCTRICA DEL ECUADOR CELEC EP	PÚBLICA	C. H. PAUTE	1.100
CORPORACIÓN ELÉCTRICA DEL ECUADOR CELEC EP	PÚBLICA	C. T. PAYAMINO	2
EMAC-BGP ENERGY COMPAÑIA DE ECONOMIA MIXTA CEM	PRIVADA	C. T. PICHACAY	1
EMPRESA ELÉCTRICA AMBATO REGIONAL CENTRO NORTE S.A.	PÚBLICA	C. H. PENÍNSULA	3
CORPORACIÓN ELÉCTRICA DEL ECUADOR CELEC EP	PÚBLICA	C. T. LA PROPICIA	6
GENERACIÓN SOLAR MANABITA S.A.	PRIVADA	C. F. PREDIO 1	1
CORPORACIÓN ELÉCTRICA DEL ECUADOR CELEC EP	PÚBLICA	C. H. PUCARÁ	72
CORPORACIÓN ELÉCTRICA DEL ECUADOR CELEC EP	PÚBLICA	C. T. ISLA PUNÁ	3
ELITENERGY GENERACION ELECTRICA S.A.	PRIVADA	C. H. PUSUNO 1	19
CORPORACIÓN ELÉCTRICA DEL ECUADOR CELEC EP	PÚBLICA	C. T. QUEVEDO 2	41
EMPRESA ELÉCTRICA RIOBAMBA S.A.	PRIVADA	C. H. RÍO BLANCO	3
CNEL CORPORACION NACIONAL DE ELECTRICIDAD S.A.	PÚBLICA	C. H. RÍO CHIMBO	1
EMPRESA METROPOLITANA DE AGUA POTABLE Y ALCANTARILLADO DE QUITO EMAAP-Q	PÚBLICA	C. H. RECUPERADORA	15
RENOVALOJA S.A.	PRIVADA	C. F. RENOVALOJA	1
CORPORACIÓN ELÉCTRICA DEL ECUADOR CELEC EP	PÚBLICA	C. T. SISTEMAS AISLADOS	9
GRANSOLAR S.A.	PRIVADA	C. F. SALINAS	2
SANSAU S.A.	PRIVADA	C. F. SANSAU	1

SOCIEDA AGRICOLA E INDUSTRIAL SAN CARLOS S.A.	PRIVADA	C. T. SAN CARLOS	32
ELECTRO GENERADORA DEL AUSTRO S.A.	PÚBLICA	C. H. SAUCAY	24
ELECTRO GENERADORA DEL AUSTRO S.A.	PÚBLICA	C. H. SAYMIRÍN	14
ELECTRO GENERADORA DEL AUSTRO S.A.	PÚBLICA	C. H. SAYMIRÍN 5	8
HIDROSANBAROLO S.A.	PRIVADA	C. H. SAN BAROLO	50
SABIANGO SOLAR S.A.	PRIVADA	C. F. SABIANGO	1
SOLCHACRAS S.A.	PRIVADA	C. F. SOLCHACRAS	1
CORPORACIÓN ELÉCTRICA DEL ECUADOR CELEC EP	PÚBLICA	C. T. SANTA ELENA 2	81
CORPORACIÓN ELÉCTRICA DEL ECUADOR CELEC EP	PÚBLICA	C. T. SANTA ELENA 3	36
EMPRESA PUBLICA DE SERVICIOS MUNICIPALES ANTONIO ANTE SERMAA EP	PRIVADA	C. H. SERMAA	1
CORPORACIÓN ELÉCTRICA DEL ECUADOR CELEC EP	PÚBLICA	C. H. SAN FRANCISCO	224
SOLHUAQUI S.A.	PRIVADA	C. F. SOLHUAQUI	1
HIDALGO E HIDALGO S. A.	PRIVADA	C. H. SIBIMBE	15
HIDROSIGCHOS C.A.	PRIVADA	C. H. SIGCHOS	19
CORPORACIÓN ELÉCTRICA DEL ECUADOR CELEC EP	PÚBLICA	C. T. SISTEMAS INSULARES	24
FMA TAMBO	PRIVADA	C. H. SAN JOSÉ DE TAMBO	7
SOLSANTROS S.A.	PRIVADA	C. F. SOLSANTROS	1
EMPRESA ELÉCTRICA REGIONAL NORTE S.A.	PRIVADA	C. H. SAN MIGUEL DE CAR	3
ENERGÍA PLANTA FOTOVOLTAICA EP FOTOVOLTAICA S.A.	PRIVADA	C. F. SUNCO MULALÓ	1

SANERSOL S.A	PRIVADA	C. F. SANERSOL	1
SOLSANTONIO S.A.	PRIVADA	C. F. SOLSANTONIO	1
CORPORACIÓN ELÉCTRICA DEL ECUADOR CELEC EP	PÚBLICA	C. H. SOPLADORA	487
ENERGÍA PLANTA FOTOVOLTAICA EP FOTOVOLTAICA S.A.	PRIVADA	C. F. SUNCO PASTOCALLE	1
SAN PEDRO SOLAR ENERGY S.A.	PRIVADA	C. F. SAN PEDRO	1
SURNERGY S.A.	PRIVADA	C. F. SURENERGY	1
CORPORACIÓN ELÉCTRICA DEL ECUADOR CELEC EP	PÚBLICA	C. T. SANTA ROSA	50
SARACAYSOL S.A.	PRIVADA	C. F. SARACAYSOL	1
EMPRESA PÚBLICA METROPOLITANA DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO	PRIVADA	MICROCENTRAL TANQUE ALTO CARCELÉN	0
CORPORACIÓN ELÉCTRICA DEL ECUADOR CELEC EP	PÚBLICA	C. T. MACHALA GAS	132
CORPORACIÓN ELÉCTRICA DEL ECUADOR CELEC EP	PÚBLICA	C. T. MACHALA GAS 2	125
PROYECTOS ENERGETICOS ECUAGESA S. A.	PRIVADA	C. H. TOPO	28
CORPORACIÓN ELÉCTRICA DEL ECUADOR CELEC EP	PÚBLICA	C. T. TRINITARIA	134
GRANSOLAR S.A.	PRIVADA	C. F. TREN SALINAS	1
HIDALGO E HIDALGO S. A.	PRIVADA	C. H. URAVÍA	1
CORPORACIÓN ELÉCTRICA DEL ECUADOR CELEC EP	PÚBLICA	C. E. VILLONACO	17
WILDTECSA S.A.	PÚBLICA	C. F. WILDTECSA	1
INTERVISA TRADE S.A.	PRIVADA	C. T. VICTORIA II	102