



**“ESTADO DEL ARTE SOBRE EL IMPACTO
EN LA CALIDAD DE LA ENERGÍA EN PLANTAS DE
GENERACIÓN ALTERNATIVA”**

Autor:

DIXON ARCINIEGAS CASTRO

Director de trabajo de grado:

ING. JESUS SALAMANCA JAIMES

**PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA,
SITEMAS Y TELECOMUNICACIONES
FACULTAD DE INGENIERIAS Y ARQUITECTURA**

15 de diciembre del 2022

DEDICATORIA

Las personas que fueron pilar fundamental desde un principio, que sin ellos no fuera sido posible los logros que he alcanzado en la vida: Mis padres

Los que me orientaron en mi etapa universitaria y me dieron las bases del conocimiento para cada día profundizar aún más en el: Docentes y compañeros

Los que fueron la motivación, apoyo y estuvieron guiándome, aconsejándome y sobre todo impulsándome a hacer mejor persona y profesional: Familiares y amigos

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a cada una de las personas que directa o indirectamente estuvieron en mi proceso, desde mis primeros pasos hacia el camino intelectual y personal, ellos me ayudaron a labrar el camino para que cada día tuviese mejores bases para seguir escalando en el maravilloso mundo del conocimiento. A mis compañeros y amigos que estuvieron ahí durante todo mi proceso universitario fue de gran motivación para no desfallecer en mi proceso y sacar adelante mi carrera.

Agradecer al gran aporte de la planta docente de ingeniería eléctrica de la universidad de pamplona que, con la enseñanza, aportaron a cada uno de los estudiantes de la carrera el conocimiento y las bases fundamentales, enriqueciéndonos intelectual y personalmente.

No dejando a un lado el gran aporte de mis padres que fueron mi motor y mis ganas de salir adelante, que gracias a ellos fue posible estudiar una carrera universitaria y que estuvieron dándome la motivación necesaria para que cada esfuerzo hecho por ellos haya sido más que suficiente.

RESUMEN

La energía eléctrica se ha convertido en un servicio fundamental desde que comenzaron sus primeros nichos en la generación. La generación eléctrica se ha enfocado en fuentes petrolíferas, hidroeléctricas y termoeléctricas siendo estas fuentes las que han suministrado el mayor porcentaje de la electricidad en el planeta entero, durante este proceso de generación se han presentado diversos fenómenos que afectan el suministro de la energía al consumidor final, enfrentándose a retos de ingeniería e ir busca de alternativas para prestar un servicio confiable al cliente, por esta razón se han venido estableciendo regulaciones en la calidad de la potencia, que rigen a cada empresa generadora de energía eléctrica y al operador de red eléctrico.

Con el aumento de la contaminación por utilizar de forma irresponsable estas fuentes de generación convencional se han venido estableciendo normas para generar electricidad con fuentes de energías limpias que ayuden a bajar esas tasas de contaminación y así ir cambiando la manera de generar la electricidad en nuestro planeta, entre esas fuentes se encuentran la fotovoltaica, eólica, mareomotriz, geotérmica, biomasa, siendo las más implementadas hasta el momento, pero que se ven inmersas igualmente en fenómenos de calidad de la energía con un agregado que son fuentes que dependen especialmente de una fuente que es inagotable pero no es constante durante el tiempo, presentando nuevos desafíos de ingeniería, donde se busca nuevas tecnologías que ayuden a mitigar dichos fenómenos y así seguir prestando un servicio confiable al consumidor final.

Este trabajo se centra en los fenómenos de calidad de la energía que se pueden presentar en fuentes de generación alternativas, buscando estudios que se hallan enfocado en soluciones tecnológicas, donde se puedan mitigar estos fenómenos y que normas o regulaciones rigen este tipo de generación alternativo para que se pueda integrar de forma segura al sistema eléctrico.

ABSTRACT

Electric power has become a fundamental service since its first niches in generation began. Electricity generation has focused on oil, hydroelectric and thermoelectric sources, these sources being the ones that have supplied the highest percentage of electricity for the entire planet. During this generation process, various phenomena have occurred that affect the supply of energy to the consumer. end, facing engineering challenges and looking for alternatives to provide a reliable service to the client, for this reason regulations and standards have been established that must be complied with for each generator and electricity network operator.

With the increase in pollution due to the irresponsible use of these conventional generation sources, standards have been established to generate electricity with clean energy sources that help lower these pollution rates and thus change the way of generating electricity on our planet. , Among these sources are photovoltaic, wind, tidal, geothermal, biomass, the most implemented to date, but they are also immersed in energy quality phenomena with an addition that are sources that depend especially on a source which is inexhaustible but not constant over time, presenting new engineering challenges and searching for technologies that help us mitigate these phenomena and thus continue to provide a reliable service to the end consumer.

This work focuses on the energy quality phenomena that can occur in alternative generation sources, looking for studies that are focused on technological solutions where these phenomena can be mitigated and what rules or regulations have to be governed for said generation and so that it can be integrated into the electrical network system.

Tabla de contenido

	Pág.
1. Introducción	9
1.1. Descripción del problema y justificación	9
2. Objetivos	9
2.1. Objetivo general.....	9
2.2. Objetivos específicos.....	9
3. Identificar los eventos de calidad de la energía en fuentes de generación alternativa.	10
3.1. Energía fotovoltaica	10
3.1.1. Variaciones de corta duración	10
3.1.2. Hundimientos (Sag), Variaciones en la frecuencia y desbalance.....	10
3.1.4. Variaciones de larga duración, Swell y Variaciones de la frecuencia	11
3.2. Energía eólica	11
3.2.1. Variación de la frecuencia.....	12
3.2.2. Variaciones en la frecuencia, Sag, Swell, Armónicos, Flicker Variaciones de corta y larga duración	12
3.2.3. Flicker.....	12
3.2.4. Variaciones de corta y larga duración.....	13
3.3. Energía geotérmica	13
3.3.1. variaciones en la frecuencia, variaciones de corta y larga duración, Sag, Swell, Armónicos, Flicker.....	13
3.4. Energía biomasa.....	14
3.4.1. Variaciones de corta y larga duración, variación de la frecuencia, Sag, Swell.....	14
3.5. Energía mareomotriz	14
3.5.1 Variaciones de corta y larga duración y variación en la frecuencia.....	14
3.6. Fenómenos de mayor incidencia en plantas de generación alternativas.....	15
4. Soluciones tecnológicas para mitigar los fenómenos de calidad de la energía en fuente de generación alternativas	18
4.1. Almacenamiento de energías para fuentes alternativas	18
4.1.1. Diversos tipos de tecnologías de almacenamiento de energía y sus aplicaciones	18
4.1.2. Mitigación de la fluctuación y la incertidumbre	21
4.2. Tecnología de almacenamiento de energía por gravedad sólida	22
4.2.1. características de la tecnología de almacenamiento por gravedad	22
4.2.2. tipos de almacenamiento por gravedad	23

4.2.3. Análisis comparativo del almacenamiento	24
4.3. Solución tecnológica en una fuente de generación fotovoltaica	27
4.3.1 Descripción de los 3 sistemas bajo investigación	28
4.3.3. Simulación y resultados experimentales	29
4.4. Solución tecnológica en generación Eólica	33
4.4.2. Estrategia de control de respuesta de frecuencia rápida	34
4.4.3. Resultados de simulación	35
4.5. Solución tecnológica en generación Geotérmica	38
4.5.1. Configuración del sistema y principio de funcionamiento	39
4.6. Solución tecnológica en generación a partir de Biomasa	41
4.6.1. Metodología del estudio	42
4.6.2. Metodología utilizada en la simulación	45
4.7 Comparación de varios tipos de tecnologías de almacenamiento de energía	48
5. Normativas	50
5.1. Normativas nacionales que regulan las fuentes de generación alternativas	50
5.1.1. Resolución 060-2019 Artículo 1.	50
5.1.2. Creg 060-2019 Artículo 8.	51
5.1.3. Creg 060-2019 Artículo 11.	51
5.1.4. Creg 060-2019 Artículo 12.	52
5.1.5. Creg 060-2019 Artículo 13.	52
5.1.6. Creg 060-2019 Artículo 14.	53
5.1.7. Creg 060-2019 Artículo 15.	56
5.2. Normativas internacionales que regulan las fuentes de generación alternativas	57
5.2.1. Norma: Transmission Code 2007. País: Alemania	57
5.2.2. Norma: ANEXO 40. País: Argentina.....	57
5.2.3. Norma: Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio. País: Chile.....	58
5.2.5. Real Decreto 413/2014. País: España	58
5.2.6. Norma: 661-A de 2005. País: Estados unidos	59
5.2.7. Núm. RES/119/2012. País: México	59
5.2.8. Norma: (Nacional Grid Electricity Transmission, 2015). País: Reino unido	59
5.2.9. Norma: Acuerdo operativo para generadores conectados a instalaciones de transmisión en at. País: Uruguay	60
6. Conclusiones	61
7. Referencias.....	62

Tablas

Tabla 1: Fenómenos de mayor incidencia en plantas de generación alternativas	15
Tabla 2: Aplicación de varias tecnologías ecológicamente racionales en IES.....	18
Tabla 3: Características tecno económicas de las principales tecnologías ecológicamente racionales.	20
Tabla 4: análisis comparativo de los diferentes tipos de almacenamiento por gravedad.	24
Tabla 5: Tabla de valoración cuantitativa de cada vía técnica.....	26
Tabla 6: Diferentes escenarios de esquema de control implementados en el híbrido LAES-WT-BESS.	36
Tabla 7: Resultados de simulación de los transformadores de calor.	40
Tabla 8: Definición de los elementos que conforman la generación de biomasa con la unidad de almacenamiento de aire líquido.	44
Tabla 9: Parámetros del sistema del ciclo combinado de gasificación a partir de biomasa.....	45
Tabla 10: Parámetros de la tecnología de almacenamiento de energía por aire comprimido.	46
Tabla 11: Validación del modelo basado en el sistema del ciclo combinado de gasificación a partir de biomasa.....	46
Tabla 12: Validación del modelo basado en la tecnología de almacenamiento de energía por aire comprimido.....	47
Tabla 13: Varios tipos de almacenamiento.....	48
Tabla 14: Tiempo de respuesta de los relés ante variaciones de frecuencia en generaciones térmicas	51
Tabla 15: Desconexión Automática de Carga por Baja Frecuencia	51
Tabla 16: Parámetros de operación de fuente de generación alternativa del país de Alemania.....	57
Tabla 17: Parámetros de operación de fuente de generación eólica del país de Argentina.....	57
Tabla 18: Parámetros de operación de fuente de generación eólica en el país de Chile.	58
Tabla 21: Parámetros de operación en fuentes de generación en el país de España.	58
Tabla 22: Parámetros de operación en fuentes de generación en el país de EEUU.....	59
Tabla 23: Parámetros de operación en fuentes de generación en el país de México.....	59
Tabla 24: Parámetros de operación en fuentes de generación en el país de Reino unido.	60
Tabla 25: Parámetros de operación en fuentes de generación en el país de Uruguay	60

Tabla de Ilustraciones

Ilustración 1: Eficiencia con respecto a la temperatura del panel fotovoltaico	11
Ilustración 2: Integración de una unidad de almacenamiento de energía con una fuente eólica.	22
Ilustración 3: Tipos de tecnologías de almacenamiento por gravedad.	24
Ilustración 4: Almacenamiento de energía por gravedad en torre de la empresa Gravitricity.	27
Ilustración 5: Microrred con diferentes configuraciones.	29
Ilustración 6: Respuesta de frecuencia ante una perturbación de aumento de potencia	29
Ilustración 7: Respuesta de frecuencia ante una perturbación de aumento de potencia de 0,3 MW.	30
Ilustración 8: Comportamiento de la frecuencia al disminuir la demanda en 0,2 MW.	31
Ilustración 9: Comportamiento de la frecuencia al disminuir la irradiancia solar.	31
Ilustración 10: Comportamiento de la frecuencia ante el aumento de la irradiancia solar.	32
Ilustración 11: Comportamiento de la frecuencia en cortocircuito.	32
Ilustración 12: Esquema de emulación de inercia y control de caída.	35
Ilustración 13: Sistema híbrido integrado de fuentes de generación alternativas, convencional y las tecnologías de almacenamiento de energía como caso de estudio.	36
Ilustración 14: Control de respuesta de frecuencia rápida en la microrred híbrida con fuentes alternativas y unidades de almacenamiento con un aumento de carga de 2 MW.	37
Ilustración 15: Configuración del sistema del ciclo CESHT. (a) proceso de carga, (b) proceso de descarga.	39
Ilustración 16: Esquema del sistema del ciclo combinado de gasificación a partir de biomasa de referencia.	43
Ilustración 17: Esquema del sistema del ciclo combinado de gasificación a partir de biomasa integrado con la tecnología de almacenamiento de energía por aire comprimido.	44
Ilustración 19: Curva de capacidad de plantas eólicas y fotovoltaicas.	53
Ilustración 20: Característica de subtensiones y sobretensiones, en plantas de generación eólicas y fotovoltaicas (No incluye 500kv).	54
Ilustración 21: Característica de subtensiones y sobretensiones, en plantas de generación eólicas y fotovoltaicas con nivel de tensión de 5000 Kv.	55
Ilustración 22: Delta de la corriente reactiva (ΔI_r), ...	55

1. Introducción

1.1. Descripción del problema y justificación

Últimamente con la implementación de energías alternativas, se busca la transición hacia energías limpias sustituyendo las fuentes de generación convencional que han venido dejando un impacto negativo en el ambiente como por ejemplo las termoeléctricas. Estas fuentes de generación alternativas ayudarían bajar sustancialmente las tasas de contaminación siendo amigables con el medio ambiente dejando cero huellas de carbón; pero debido a que son fuentes que tienen poca inercia esto ha conllevado a la disminución de la inercia del sistema de potencia en general, lo cual compromete a su estabilidad. Por otro lado, en muchos casos esta generación alternativa utiliza convertidores de potencia electrónicos, los cuales son dispositivos que introducen eventos de calidad de la energía a la red como: distorsión armónica, muescas de tensión entre otros.

Por lo tanto, es necesario establecer un estado del arte que sintetice la información científica asociada a los efectos que estas fuentes de generación alternativa tienen en los sistemas de potencia y las posibles soluciones tecnológicas que pudieran aplicarse para mitigar esta situación.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Establecer el estado del arte sobre el impacto en la calidad de la energía en fuentes de generación alternativa

2.2 Objetivos específicos

- Identificar los eventos de calidad de la energía en fuentes de generación alternativa.
- Determinar soluciones tecnológicas de ingeniería para la mitigación de los eventos de la calidad de la energía asociados a la operación de generación alternativa.
- Examinar las regulaciones vigentes en aspectos relacionados con eventos de calidad de la energía en la operación de unidades de generación alternativa en el ámbito nacional e internacional.

3. Identificar los eventos de calidad de la energía en fuentes de generación alternativa.

3.1. Energía fotovoltaica

La energía fotovoltaica es una fuente de generación que ha tenido mucho auge a nivel mundial, siendo una energía limpia que promete adaptarse de buena forma al sistema eléctrico, por lo que es una fuente ilimitada de energía. La fuente de la energía fotovoltaica proviene directamente del sol, siendo la radiación solar la responsable de aportarnos dicha energía, adquiriéndola por medio de celdas fotovoltaicas autoalimentadas.

En Colombia se ha venido implementando fuentes de generación de energía eléctrica no convencionales, habiendo un porcentaje significativo en generación fotovoltaica llegando al 19% en el año 2020. En los últimos proyectos que se han implementado en el país de generación de energía que son 314, donde 212 de ellos son de fuentes de generación solar, lo que equivale al (67,52%). La generación fotovoltaica representa aproximadamente el 50% de los proyectos propuestos al estado entre el rango de generación de potencia de 0-10 MW (Pinzón-Quintero et al., 2022).

Las causas que afectan la calidad de la energía eléctrica en fuentes de generación fotovoltaica dependen directamente de factores externos que interfieren en la absorción óptima que puede captar el panel y así se ve afectada la inercia en la generación.

Alguna de estas causas son:

3.1.1. Variaciones de corta duración

- Suciedad y reflexión

En un sistema fotovoltaico la suciedad sobre los paneles fotovoltaicos o una parte de ellos juega un papel importante para la captación de la irradiación del sol sobre los paneles. Donde la suciedad interfiere significativamente en la generación de potencia, donde se pueden presentar fenómenos en calidad de la energía como lo son fluctuaciones en la tensión.

Otro factor que afecta la generación de energía eléctrica ocasionando variaciones en la potencia de los paneles fotovoltaicos son las nubes que se acumulan entre el panel y la fuente de energía solar. Estas causas provocan fenómenos de calidad de la energía, como fluctuaciones en la tensión, en la red eléctrica (Visser et al., 2022).

La reflexión que puede ser captada por el panel muchas de las veces es una reflexión difusa o reflejada.

3.1.2. Hundimientos (Sag), Variaciones en la frecuencia y desbalance

- Condiciones meteorológicas y efecto de sombreado

los sistemas fotovoltaicos dependen de gran medida de los factores externos como lo son las condiciones meteorológicas lo que provoca afectaciones en los parámetros de calidad de la energía esto debido a la nubosidad, condiciones climáticas y sombreado en los paneles ya sea por suciedad, arborización, entre otros.

los anteriores fenómenos afectan el rendimiento en el algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) utilizado en el inversor, por lo que la radiación que puede ser captada no es constante en toda la superficie del panel. Esto lo que ocasiona es que haya varios picos de potencia durante el día en la generación fotovoltaica y sea difícil encontrar el MPPT. La corriente eléctrica es la que se ve más afectada por el efecto del sombreado, lo que ocasiona la reducción en la potencia (Pinzón-Quintero et al., 2022).

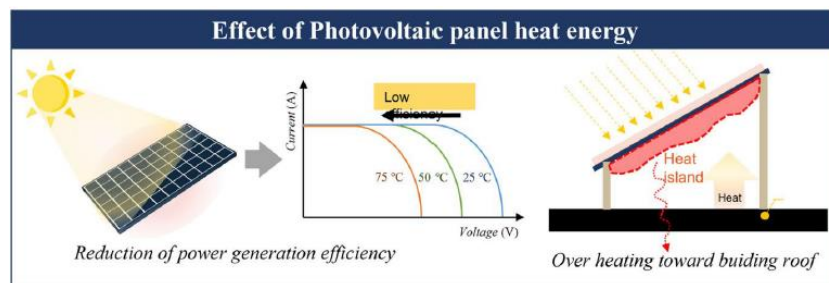
Siendo una fuente de energía que depende 100% de las horas luz provenientes del sol esto provoca que cuando las condiciones atmosféricas no son óptimas se vea reflejado en la generación de energía eléctrica. Otro factor a considerar son la interferencia de árboles, nubes, entre otros factores que obstaculicen la luz hacia el panel fotovoltaico, sin contar con las horas de la nocturnas.

3.1.4. Variaciones de larga duración, Swell y Variaciones de la frecuencia

- Temperatura de funcionamiento del panel fotovoltaico

La operación y la eficiencia de los paneles fotovoltaicos depende directamente de la radiación solar, mientras se mantenga la temperatura de la superficie de los paneles dentro de unos rangos. Cuando la superficie de los paneles excede los límites de temperatura al sobrecalentarse la eficiencia y el voltaje decrece, lo que afecta la generación de electricidad, siendo la temperatura del panel un factor importante a tener en cuenta para la generación de energía eléctrica partir de fuentes fotovoltaicas (Jo et al., 2022).

Ilustración 1: Eficiencia con respecto a la temperatura del panel fotovoltaico



Fuente: (Jo et al., 2022)

Estos fenómenos de sobrecalentamiento de las celdas fotovoltaicas traen consigo repercusión al sistema del suministro eléctrico, donde se presentan eventos de calidad como lo son Sobretensiones transitorias, Swell y variaciones en la frecuencia. La implementación de aparatos electrónicos como convertidores en la generación fotovoltaica pueden afectar el comportamiento de la calidad de la energía como sobretensiones, subtensiones, fluctuaciones de tensión, armónicos de corriente y tensión.

3.2. Energía eólica

La generación de energía eólica consta de un aerogenerador que por medio del viento impulsa las grandes aspas lo que provoca energía cinética que por medio del generador la convierte en energía eléctrica creando una diferencia de potencial. Uno de los parámetros más importantes en la generación de energía eólica es conocer la variabilidad del viento en la zona donde se implemente, para así determinar los factores de funcionalidad de la planta eólica. Para la operación de una planta eólica existen límites en la velocidad del viento para así mantener la estabilidad del sistema. Para mover las aspas del aerogenerador depende de la densidad del aire por lo que la velocidad del viento por sí sola no es suficiente (Syahputra et al., 2022).

En los últimos años se ha venido implementando plantas eólicas para la generación de energía eléctrica por lo que se han presentado fenómenos propios del sistema. La generación a partir de fuentes alternativas tiene una particularidad ya que dependen de una fuente que es variable en el tiempo y la eólica no es la excepción lo que ocasiona inestabilidad en el sistema trayendo fenómenos de calidad de la energía como variación en la tensión, variaciones en la frecuencia, Flicker, variaciones en la potencia, entre otros.

Se ha evaluado diferentes escenarios de plantas eólicas tanto a nivel nacional como internacional donde se han detallado los principales fenómenos de calidad de la energía en la red como lo es:

- El viento al no ser constante durante el tiempo se ve afectada la estabilidad del sistema lo que ocasiona intermitencia en la potencia generada.
- El desequilibrio entre la potencia generada y la carga afecta de manera considerable al sistema lo que ocasiona variabilidad de la frecuencia, siendo la intermitencia del viento la causa de la inestabilidad entre potencia y carga.
- Mantenerse entre los índices de potencia reactiva es fundamental ya que esta correlacionado con la estabilidad del voltaje, pérdida de potencia activa en las líneas de transmisión lo que ocasiona que aparezcan fenómenos de calidad como armónicos y flicker, por lo que es necesario el control de dicha potencia (Hachana et al., 2022).

En la generación eólica es necesario cuidar tres parámetros fundamentales para preservar la calidad de la energía que son la tensión, corriente y frecuencia para así ofrecer una potencia constante al sistema eléctrico.

3.2.1. Variación de la frecuencia

Con la integración de fuentes alternativas a la red se ha venido afectando la estabilidad del sistema por la naturaleza intermitente de estas fuentes, siendo la eólica una de estas fuentes. La principal causa en la generación estable de potencia son los vientos son intermitentes lo que ocasiona variabilidad en la frecuencia siendo volátil para el sistema sino se controla adecuadamente.

3.2.2. Variaciones en la frecuencia, Sag, Swell, Armónicos, Flicker Variaciones de corta y larga duración

En la implementación de generación eólica se pueden encontrar fenómenos que perjudican el suministro de energía por los aparatos eléctricos que se necesitan en dicha generación lo que conlleva a introducción de armónicos a la red, por los convertidores de potencia, bancos de condensadores, tiristores, entre otros aparatos electrónicos. Por otra parte, al ser una fuente dependiente directamente del viento con lleva que cuando hay variaciones del mismo hace que haya problemas como fluctuaciones de tensión, frecuencia, variaciones en la potencia, flicker, entre otros.

En la generación eólica las variaciones en el viento perjudican el giro en las turbinas eólicas lo que conlleva principalmente a fluctuaciones en el voltaje, donde se dividen en el tipo de operación que son la conmutada o continua.

3.2.3. Flicker

Para mantener una velocidad constante en las aspas del aerogenerador es necesario integrar en las plantas eólicas aparatos electrónicos de conmutación controlando el voltaje generado, lo que ocasiona esta serie de conmutación es que aparezcas fenómenos de calidad de la energía como Flicker ya que la forma de la onda sinusoidal del voltaje se distorsiona. Las variaciones en el viento no son tan drásticas en ciertos momentos, lo que no ocasiona un problema de calidad de la energía, pero ya que las aspas del generador están rotando en un generador robusto con distinta velocidad a la velocidad del viento, esto afecta directamente la potencia que hace que sea 3 veces mayor a la velocidad del rotor, denominándose como efecto (3p).

3.2.4. Variaciones de corta y larga duración

Uno de las causas de variaciones en la tensión y flicker son por las ráfagas de vientos que llegan directamente a las aspas del aerogenerador provocando un cambio brusco en la velocidad, donde el sistema de conmutación que controla la velocidad de las turbinas no amortigua este cambio de manera instantánea, lo que trae consigo estos fenómenos de calidad de la energía. Cuando la tensión oscila en un rango de frecuencia de 10-35 Hz, es porque hay una fluctuación en la tensión produciendo un destello incandescente donde puede afectar negativamente a aparatos electrónicos que este conectados a la red (Paper et al., 2020).

La integración de nuevas fuentes de generación ha cambiado el concepto tradicional que se tenía para la gestión del factor de potencia. La generación de energía centralizada utiliza grandes generadores síncronos que le dan la ventaja de regular la potencia real e imaginaria por separado que se está inyectando a la red, donde por medio de pulsos y excitación actúa sobre la máquina, respectivamente.

Algunas de los fenómenos más recurrentes que se pueden aparecer en la generación de energía eólica son:

- En caso de que la potencia generada exceda la carga del sistema el aerogenerador funciona como un motor sin carga ocasionando inestabilidad del sistema como variación de la frecuencia.
- Se puede presentar sobretensión transitoria, cuando no se conecta la compensación de capacitancia necesaria.

3.3. Energía geotérmica

La generación de energía eléctrica a partir de fuente geotérmica se ha venido utilizando desde finales del siglo pasado por ser una fuente ilimitada que nos ofrece la tierra. Al ser una fuente de energía que esta acumulada en grandes proporciones y de manera constante durante el día y la noche destaca entre las otras fuentes de generación alternativas.

Esta fuente de energía está en la capacidad de aportar el 3,5 % del suministro eléctrico y el 3,9 % de calefacción a nivel mundial en años posteriores (Santos et al., 2022).

Uno de los inconvenientes al momento de generar electricidad a partir de fuentes de generación geotérmica son los altos costos en la implementación, partiendo de los altos precios de las turbinas de vapor y el módulo termoeléctrico que rondan entre el precio de 12,51 US\$/h y 3,62 US\$/h respectivamente (Khanmohammadi & Musharavati, 2021).

Para reducir los costos en la implementación están aprovechando recursos geotérmicos a poca profundidad lo que conlleva menor temperatura, ya que otro factor importante en la generación y que conlleva un alto costo es la perforación para llegar a la fuente de este recurso. Donde los costos se elevan a mayor sea la profundidad de perforación.

3.3.1. variaciones en la frecuencia, variaciones de corta y larga duración, Sag, Swell, Armónicos, Flicker

La generación geotérmica en comparación a energías no convencionales como la fotovoltaica, eólica y mareomotriz, cuenta con una importante ventaja ya que esta energía se encuentra almacenada en proporciones ilimitadas sacando provecho de ello de una manera frecuente y no intermitentemente como las ya mencionadas, esto lo que hace es que sea una fuente de generación flexible y confiable para adaptarse a la demanda del sistema.

Este sistema de generación no se ve afectado por factores externos del sistema, sino por los internos del mismo sistema, ya que la eficiencia en el momento de la transformación calorífica a energía eléctrica la pérdida de exergía ocasiona que el flujo de vapor que pueden llegar a las turbinas no sea constante, lo que ocasionaría variaciones en la frecuencia, variaciones de corta y larga duración, Sag, Swell, Armónicos, Flicker.

3.4. Energía biomasa

Esta fuente de generación alternativa destaca frente a la fotovoltaica, eólica y mareomotriz, ya que su fuente para generar electricidad no es intermitente o puede almacenar grandes cantidades de materia orgánica (madera, residuos, orgánicos, entre otros), que se pueda aprovechar para la generación de electricidad, sin embargo, la eficiencia en generación es baja por sus altos índices de pérdida de calor.

Para mantener la generación de potencia en parámetros constantes se controla la tasa de combustión que se inserta en las calderas controlando el flujo del vapor que llega a las turbinas del generador de vapor, para así controlar la potencia generada, previniendo así fenómenos de calidad de la energía como fluctuaciones en la tensión y variaciones de la frecuencia.

3.4.1. Variaciones de corta y larga duración, variación de la frecuencia, Sag, Swell

El sistema de generación no convencional a partir de fuente de biomasa es poco eficiente ya que se necesita muchos recursos para mantener constante la potencia de salida lo que ocasiona pérdidas de vapor en el sistema. Este sistema de generación por medio de la combustión se pierde mucha exergía lo que ocasiona que el sistema sea poco eficiente al momento de la transformación llegando a valores de menos de 30% de eficiencia del sistema.

Ya que la mayoría de generación a partir de biomasa las turbinas trabajan a medio vapor lo que ocasiona que la generación de energía eléctrica en relación a la combustión del sistema sea baja (Y. Wang et al., 2022).

En general estos fenómenos que se presentan de eficiencia con respecto a las turbinas traen consigo ineficiencia en el sistema trayendo consigo pérdidas de vapor y calor, que ocasiona variaciones en la potencia, variaciones en el suministro de tensión, fluctuaciones, entre otros fenómenos de calidad del servicio.

3.5. Energía mareomotriz

La generación de energía alternativa en un principio se implementó ya que los precios del petróleo eran demasiado altos y buscaron otras formas de generar electricidad como lo fue por medio de las fuentes fotovoltaicas y eólicas, a pesar de que la generación de energía a partir de fuente mareomotriz tienen un gran potencial sus altos costos de implementación han hecho que no se explote este gran recurso de las olas del mar y que se centren más en la solar y eólica lo que se ha venido reflejando en el aporte que hoy en día estas fuentes han aportado a la red. El gran potencial de las olas del mar hacen de este recurso una fuente a tener en cuenta para producir y suministrar electricidad a la red (Ghaedi & Gorginpour, 2021).

Como las fuentes fotovoltaicas y eólicas, la mareomotriz también se ve afectada en la calidad del servicio por la intermitencia de su fuente, lo que ocasiona la inestabilidad del sistema (Zia et al., 2022).

3.5.1 Variaciones de corta y larga duración y variación en la frecuencia

la generación de electricidad a partir de las mareas se desarrolló partiendo de la generación eólica donde el mecanismo de transformación de la energía es el mismo por su particularidad que la energía

eólica su fuente es el viento y la mareomotriz las corrientes marinas. Por un lado, la fuente mareomotriz es más predecible que la fuente eólica debido a que las variaciones en las corrientes en las mareas son bajas. Debido a que las turbulencias en las olas son inestables durante el tiempo se ve afectada la velocidad de las corrientes de las mareas ocasionando inestabilidad en el sistema. En los últimos años se han hecho estudios sobre la estabilidad de una planta mareomotriz para la generación de potencia donde arroja que la altura y el cambio de dirección de las olas afectan de manera significativa el aporte de potencia que puede ser generada por la planta, siendo la altura de las olas el parámetro más importante en la estabilidad del sistema, aunque un cambio en la dirección de la corriente también se verá reflejado en la cantidad de potencia que se pueda generar esto causado por condiciones atmosféricas. Estas causas en la inestabilidad del sistema taren fenómenos de calidad de la energía como lo son variaciones en la tensión, variaciones en la potencia, Flicker, desviación en la frecuencia, entre otros.

La energía mareomotriz tiene una ventaja con respecto a la energía fotovoltaica y eólica ya que no cuenta con largos periodos de recursos bajos o nulo por lo que su naturaleza periódica en las olas la hace una fuente predecible por medio de análisis de datos medidos anteriormente o mediante modelos numéricos (Fituri et al., 2020).

La energía mareomotriz cuenta con una ventaja que puede mantener la estabilidad por su previsibilidad del sistema , bajando los costos de almacenamiento y siendo autosuficiente sin utilizar otro sistema de generación ya se alternativo o convencional (Garcia Novo & Kyozuka, 2021).

Según estudios han demostrado que la energía mareomotriz en comparación a la eólica presenta mayor variación en la frecuencia ya que las fluctuaciones de corto plazo en la corriente de las mareas interfieren negativamente en la calidad de la energía provocando que la frecuencia del sistema fluctué en esos intervalos cortos de segundos o minutos lo que ocasiona inestabilidad del sistema (Jónsdóttir & Milano, 2020).

3.6. Fenómenos de mayor incidencia en plantas de generación alternativas

Para la elaboración de la tabla 1 se toma en cuenta los fenómenos de calidad de la energía que mayor incidencia tienen las plantas de generación alternativas.

Tabla 1: Fenómenos de mayor incidencia en plantas de generación alternativas

	Generación Fotovoltaica	Generación Eólica	Generación Mareomotriz	Generación Geotérmica	Generación biomasa
Fluctuaciones de frecuencia	Si	Si	Si	Si	Si
Armónicos	Si	Si	Si	No	No
Flicker	Si	Si	Si	No	No
Sag	Si	Si	Si	No	Si
Swell	Si	Si	No	No	No
Variaciones de corta duración	Si	Si	Si	No	Si
Variaciones de larga duración	Si	No	No	No	No

Fuente: Propia

De la tabla 1 se analiza lo siguiente:

Las fuentes de generación alternativas, como lo son la fuente de generación fotovoltaica, generación eólica y generación mareomotriz cuentan con poca inercia debido a la naturaleza intermitente de su fuente. La fuente fotovoltaica depende directamente de la irradiación del sol lo que conlleva a que cuando haya interferencia entre los paneles fotovoltaicos y la fuente de luz solar como por ejemplo nubosidad repentina, arborización, suciedad y condiciones meteorológicas adversas puedan afectar el rendimiento en la generación de potencia, lo que conlleva a variaciones de la frecuencia. Por otro lado, la fuente de generación eólica depende de la densidad y la velocidad del viento que golpea las palas del aerogenerador, al haber intermitencia en el viento provoca poco flujo de aire hacia el aerogenerador, lo que ocasiona desbalances en la generación de potencia provocando fenómenos de calidad de la energía como fluctuaciones en la frecuencia. Por último, la generación mareomotriz donde su fuente de energía depende de las corrientes marinas, al haber baja velocidad en las corrientes o no estar presente se ve afectada la generación del sistema mareomotriz, donde la intermitencia en la generación conlleva a variaciones de la frecuencia.

Los sistemas de generación fotovoltaico, eólico y mareomotriz en su implementación utilizan aparatos electrónicos como convertidores de potencia y conmutadores que distorsionan la onda sinusoidal que conlleva a la aparición de fenómenos de calidad de la energía como armónicos de corriente, armónicos de voltaje y flicker que afectan el suministro eléctrico.

La generación fotovoltaica al depender de factores externos del sistema ocasiona intermitencia en la unidad de generación, al haber condiciones atmosféricas desfavorables, nubosidad, arborización o suciedad en los paneles fotovoltaicos afectan la eficiencia, lo que conlleva a variaciones de corta duración afectando la generación de electricidad. La fuente de generación eólica es intermitente, cuando el flujo del viento no llega constantemente a las palas del aerogenerador ocasionando fluctuaciones en la tensión lo que provoca que aparezca fenómenos de calidad de la energía como Sag. Por último las corrientes marítimas para la generación de electricidad son variables con respecto al tiempo, pero con una ventaja que son más predecibles, lo que ayuda a predecir las corrientes de las mareas y así la generación.

Otro factor a tener en cuenta al momento de implementar generación alternativa es que al tener una fuente muy alta de energía no quiere decir que habrá mayor eficiencia en la generación de potencia. En la generación fotovoltaica al haber mucha irradiancia con temperaturas elevadas ocasionan que la superficie de los paneles se sobrecaliente, lo que conlleva a que la eficiencia y la vida útil decrezcan, apareciendo eventos de calidad de la energía como Swell. En la generación eólica las fuertes ráfagas de vientos que azotan las palas del aerogenerador provocan picos en la tensión, apareciendo fenómenos de calidad como Swell.

Las variaciones de larga duración en sistemas de generación fotovoltaico se deben especialmente a que la fuente de luz solar no está disponible las 24 horas del día. En el anochecer, amanecer y atardecer se presentan variaciones de larga duración, sin contar con condiciones atmosféricas adversas.

La generación geotérmica y biomasa cuentan con una particularidad con respecto a las demás fuentes de generación alternativas, ya que no dependen de factores externos sino por el contrario de factores propios. En la generación a partir de biomasa es poco eficiente ya que la relación de entrada de energía de biomasa del gasificador con respecto a la generación de energía eléctrica es baja lo que conlleva a que cuando haya mayor demanda de carga en la red eléctrica, el sistema se quede colgado ante la respuesta rápida de generación, lo que se ve reflejado en la variación de la potencia provocando

fenómenos de calidad de la energía como fluctuaciones de frecuencia y variaciones de corta duración. En el caso de la generación geotérmica es una fuente que es inagotable ya que se encuentra en una especie de almacenamiento de energía térmica en el subsuelo, pero sus altos costos de implementación como la perforación del lecho rocoso la vuelven poco viable económicamente para la generación de electricidad.

4. Soluciones tecnológicas para mitigar los fenómenos de calidad de la energía en fuente de generación alternativas

Una de las soluciones tecnológicas y la más importante que se han venido implementando en la generación alternativas para dar un servicio confiable, seguro y flexible en la calidad del suministro eléctrico para mantener la estabilidad del sistema es el almacenamiento de energía cuando la generación es mayor a la demanda, donde se pueda aprovechar cuando sea necesario. Por esta razón sea venido haciendo estudios de diferentes mecanismos de almacenamiento de energía donde se analizan que sistema se puede adoptar y se acopla de mejor manera a cada tipo de generación alternativa.

4.1. Almacenamiento de energías para fuentes alternativas

La intermitencia de las energías alternativas en especial la fotovoltaica y eólica ha hecho que se busquen mecanismos para solventar potencia cuando la carga exceda la generación y mantener equilibrado el sistema. Cuando la generación está en su máxima generación de potencia y la demanda de carga disminuya, se pueda aprovechar la energía excedente para almacenarla y posteriormente utilizarla cuando la demanda aumente.

A continuación, se detallarán varios sistemas de almacenamiento donde se vera la eficiencia de cada uno de ellos dependiendo de ciertos parámetros.

Aplicación del almacenamiento de energía en sistemas energéticos integrados: una solución a la fluctuación y la incertidumbre de las energías renovables

En busca de hacer una transición energética hacia las energías alternativas para la generación de electricidad sea venido presentando inconvenientes frente a la incertidumbre por la intermitencia de estas fuentes al generar electricidad, enfrentándose con nuevos desafíos al momento de integrarlas a la red eléctrica. Por esta razón se ha venido enfocando en tecnologías de almacenamiento que ayuden a mitigar estas fluctuaciones, aprovechando la energía excedente cuando la generación este al máximo y la demanda sea baja, utilizándola posteriormente cuando sea necesaria.

4.1.1. Diversos tipos de tecnologías de almacenamiento de energía y sus aplicaciones

Aplicaciones de varios tipos de almacenamiento de energía.

La tabla 2 muestra varios mecanismos en tecnologías de almacenamiento de energía que se han venido estudiado para el sistema energético integrado, lo que busca es aliviar las fluctuaciones que se presenta al momento de integrar fuentes de generación alternativas a la red para dar soporte en la tensión, frecuencia y potencia, para mantener la estabilidad del sistema. Las tecnologías de almacenamientos de energía eléctrica son esenciales para dar confiabilidad al suministro eléctrico por ejemplo como lo es el almacenamiento por bombeo que utilizan las hidroeléctricas.

Tabla 2: Aplicación de varias tecnologías ecológicamente racionales en IES.

TECNOLOGÍA	OBJETIVO DE LA APLICACIÓN	ESCENARIOS DE APLICACIÓN FUENTE
Almacenamiento de energía magnética superconductor (SMES)	• Suavizado de energía • Regulación de frecuencia y voltaje • Mejora de la economía de un sistema de energía integrado	• SMES + Energía renovable • SMES + Otro almacenamiento de energía + Energía renovable

	• Nivelación de carga	• SMES + Energía convencional
Almacenamiento de energía del volante (FES)	• Suavizado de potencia • Regulación de frecuencia y tensión • Nivelación de potencia	• FES + Energía renovable • FES + Energía renovable + Otro almacenamiento de energía • FES + Otro almacenamiento de energía + Energía renovable
Baterías de flujo redox (RFB)	• Mejorar la economía de un sistema híbrido de almacenamiento de energía (HESS) • Suavizado de potencia • Regulación de frecuencia y tensión • Nivelación de potencia	• RFB + Energía renovable • Solar RFB • RFB + Energía renovable + Otro almacenamiento de energía
Almacenamiento de Supercondensador	• Regulación de frecuencia y voltaje • Mejora de la economía de un HESS • Suavizado de energía	• Supercondensador + Otro almacenamiento de energía + Energía renovable
Almacenamiento de energía en aire comprimido (CAES)	• Suavizado de energía	• CAES + Energía renovable
Almacenamiento de agua por bombeo en hidroeléctricas (PHS)	• Suavizado de energía • Mejora de la economía de un HESS	• PHS + Energía renovable • PHS + Otro almacenamiento de energía + Energía renovable
Baterías de iones de litio (LIB)	• Suavizado de potencia • Regulación de frecuencia y tensión • Mejora de la economía de un HESS	• LIB + Energía renovable • LIB + + Otro + Energía

Fuente: (W. Wang et al., 2022)

En ese estudio se detalló cada una de las características de los diferentes tipos de almacenamiento como lo es la vida útil, capacidad de almacenamiento, eficiencia, numero de ciclos, precio en la implementación, energía y potencia específica, donde se comparan en la tabla 3 donde se detallan los siguientes resultados:

- La tecnología de almacenamiento con mayor capacidad son las de almacenamiento de agua por bombeo y almacenamiento de energía en aire comprimido donde pueden almacenar energía de hasta GW, donde pueden dar soporte ante variaciones de potencia instantánea muy alta. Por otra parte, lo que son el almacenamiento de energía por medio de baterías, superconductora y almacenamiento de energía magnética tiene una potencia nominal media, donde el almacenamiento por baterías unas se destacan más que otra dependiendo de la sustancia química, mientras que el supercondensador tiene una potencia nominal relativamente baja.
- La tecnología de almacenamiento con mayor energía específica destacan las baterías de sulfuro de sodio y las baterías de iones de litio, con una energía específica de 200 Wh/kg, donde las siguen las demás baterías y el almacenamiento por supercondensadores con más de 10 Wh/kg, quedando por último con una energía específica baja de menos de 10 Wh/kg el almacenamiento de energía por superconductora y almacenamiento de energía de agua por bombeo.

- La tecnología de almacenamiento que tiene la mayor potencia específica es el almacenamiento por supercondensador, seguido del almacenamiento por superconductora, almacenamiento de energía por volante y las baterías de iones de litio, las otras baterías tienen una potencia específica alrededor de los 200 W/kg. Lo que es el almacenamiento de energía por aire comprimido, almacenamiento de energía de agua por bombeo y la batería de zinc y bromo no tienen una potencia específica fija ya que dependen de su masa y volumen siendo estas dos variables.
- Las tecnologías de almacenamiento que tienen la mayor eficiencia son el almacenamiento por superconductora, almacenamiento de energía por volante y las baterías de iones de litio la que mayor eficiencia tienen con un porcentaje del 95% con respecto a las otras baterías. Le siguen las baterías de flujo de redox de vanadio y las baterías de azufre de sodio, por último, el almacenamiento de agua por bombeo, almacenamiento de aire comprimido y la batería de zinc tienen una eficiencia alrededor del 75%.
- La tecnología de almacenamiento que cuenta con la mayor vida útil con más de 20 años de vida útil es el almacenamiento por supercondensador, almacenamiento de energía por aire comprimido, almacenamiento de agua por bombeo ya que estos sistemas de almacenamiento su estructura está hecha de materiales resistentes y duraderos con respecto al desgaste del tiempo, en cambio las baterías no pasan de los 20 años de vida útil ya que el químico que las componen se degrada y pierde su eficiencia durante el tiempo.

Tabla 3: Características técnico económicas de las principales tecnologías ecológicamente racionales.

TECNOLOGÍA	POTENCIA NOMINAL	ENERGÍA ESPECÍFICA/DENSIDAD DE ENERGÍA Wh/Kg o (Wh/L)	POTENCIA ESPECÍFICA / DENSIDAD DE POTENCIA WH/KG O (WH/L)	EFICIENCIA DE IDA Y VUELTA (%)	VIDA ÚTIL (AÑOS)	TIEMPOS DE CICLO (CICLOS)	COSTO DE CAPITAL (USD/KWH)
PYMES	0.1–10 [58]	0.5–5 (0.2–2.5)	500–2000 (1000–4000)	90–99	20+	100,000 +	1000–10,000
FES	0–10 [58,63]	10–80	400–1500 (1000–2000)	85–95	~20	20,000+	1000–5000
Almacenamiento de supercondensador	0–0.3	2.5–1530	500–10,000 23,600	85–98	4–12	100,000 +	300–2000 20,000
CAES	5–3000	30–60 (3–6)	–	41–89	20–60	10,000–30,000	2–100
PHS	100–5000	0.5–1.5 (0.5–1.5)	–	65–87	30–60	20,000–50,000	5–100
Baterías de flujo redox de vanadio (VRFB)	0.03–3	10–35	166	85–90	5–20	12,000–18,000	600–1500
Baterías de azufre de sodio (Na-S)	0.05–34	150–240 (150–250)	150–230	75–90	12–20	2500–4000	1000–3000
Baterías de plomo-ácido (Pb-ácido)	0–20	30–50	75–300	60–95	3–15	500–1500	300–600

Baterías de níquel y cadmio (Ni-Cd)	0–40	45–80	150–300	60–91	5–20	2000–2500	400–2400
Baterías de iones de litio (LIB)	0–50	75–200 (200–500)	400–1200	85–95	5–15	1000–10,000+	1200–4000
Baterías de flujo de zinc y bromo (Zn-Br)	0.05–2	30–50 (30–60) 60	–	65–85	5–10	2000+	150–1000

Fuente: (W. Wang et al., 2022)

4.1.2. Mitigación de la fluctuación y la incertidumbre

Configuración de un sistema energético integrado

En el caso de los sistemas de generación alternativos es necesario integrarlos con tecnologías de almacenamiento que ayuden a mantener la estabilidad del sistema ya sea cuando la demanda de electricidad suba o por la naturaleza en la intermitencia de estas fuentes.

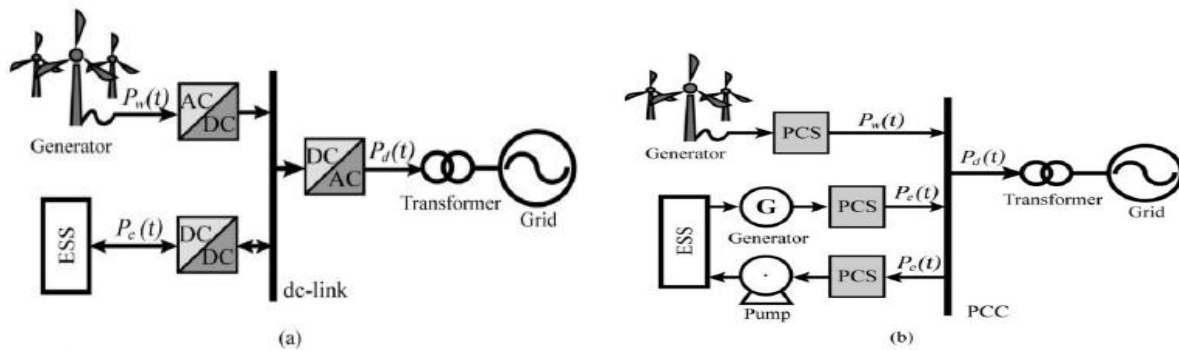
Hay 2 tipos de formas en que se pueden integrar estas tecnologías de almacenamiento en la red eléctrica con fuentes alternativas como se observa en la ilustración 2.

1. Conectar estas dos fuentes mediante un enlace de corriente directa, donde por medio de un convertidor bidireccional de corriente directa a corriente directa pueda cargar y descargarse la unidad de almacenamiento manteniendo el sistema eléctrico estable. Cuando la generación supera la demanda el sistema de almacenamiento se carga independientemente del que se esté implementando y con ello utilizar esta energía cuando la generación se vuelva intermitente y la carga la requiera, quedando descargado el sistema de almacenamiento, listo para volver a cargarse.
2. Este otro mecanismo híbrido de generación alternativa con fuente de almacenamiento, se logra a partir de la integración de la red eléctrica en el punto de conexión común. Donde se conectan de manera independiente la unidad de almacenamiento y la generación alternativa que a través de un sistema de conversión de energía se integra a la red.

La ilustración 2 muestra un ejemplo de la integración de una fuente de generación eólica con un sistema de almacenamiento de energía donde se observa la potencia generada por la planta eólica, la potencia inyectada por la tecnología de almacenamiento y por último la potencia que demanda el sistema eléctrico.

El funcionamiento general de este sistema integrado se basa en que cuando la potencia que pueda ser generada por la planta eólica sobrepasa la potencia que demanda el sistema, la energía que se encuentra en la tecnología de almacenamiento absorbe potencia de la generación eólica por medio del convertidor bidireccional. Por otro lado cuando la generación eólica se vuelva intermitente, la unidad de almacenamiento inyecta potencia anteriormente almacenada equilibrando el sistema.

Ilustración 2: integración de una unidad de almacenamiento de energía con una fuente eólica.



Fuente: (W. Wang et al., 2022)

4.2. Tecnología de almacenamiento de energía por gravedad sólida

Hoy en día se han venido estudiando los diferentes tipos de almacenamiento de energía ya que se ha visto la necesidad de integrarlos con los sistemas de generación alternativos, siendo de gran soporte de energía cuando el sistema lo requiera, para así mantener el sistema eléctrico equilibrado, por esta razón se han enfocado especialmente en un sistema de almacenamiento que es nuevo y que da buenos índices de eficiencia en la integración con fuentes alternativas, aunque todavía están en etapas tempranas de estudios e investigaciones, esta tecnología de almacenamiento brinda buenos resultados.

Hay una tecnología innovadora de almacenamiento donde consta en subir grandes bloques por medio de una torre y después hacerlos descolgar liberando energía eléctrica, este sistema es conocido como almacenamiento de energía por gravedad. Esta unidad tiene la particularidad que puede almacenar gran cantidad de potencia, vida útil alta, eficiente, se adapta a diferentes zonas geográficas donde estén instaladas las fuentes de generación alternativos y contribuye al medio ambiente lo que es indispensable.

4.2.1. características de la tecnología de almacenamiento por gravedad

Esta tecnología funciona a partir de una estructura inclinada o alta donde su principal función es subir por medio de poleas grandes bloques ya sean de hormigón o materiales reciclables que al momento de que la generación alternativa exceda la demanda, la estructura haga subir los grandes bloques almacenándolos en lo alto, donde al momento de ser requerida la energía, se hagan descolgar estos bloques que por medio de un generador que se encuentra en la polea transforme esa energía cinética en energía eléctrica inyectando así a la red.

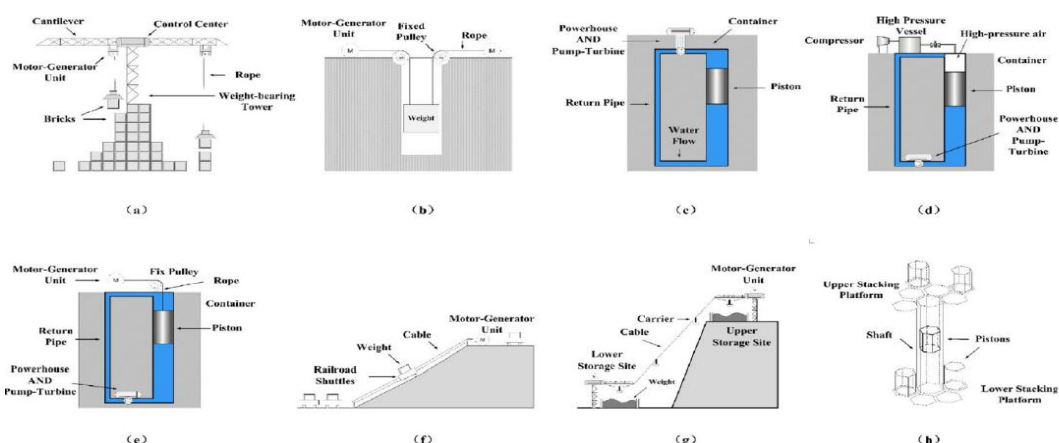
Esta fuente de almacenamiento ha entrado en vigor captando la atención de varias personas celebres que buscan una transición de fuentes convencionales a alternativas. Una de estas personas que le ha interesado esta forma de almacenamiento llamando así su atención es el actor Leonardo di Caprio ya que es una manera sostenible de generar electricidad dándole confiabilidad al sistema. El 14 de febrero del año 2022 la empresa Energy Vault Holdings, Inc, ha dado el primer paso para que varios inversionistas se fijen en esta nueva forma de almacenar energía por lo que comenzó a cotizar en la bolsa de valores de la ciudad de new york creando sociedad con otra gran empresa Novus Capital Corporation II apostándole a esta forma de almacenamiento por gravedad; recaudando un capital de 235 millones de dólares (O'Neill, 2022).

4.2.2. tipos de almacenamiento por gravedad

Existen varios tipos de almacenamiento por gravedad donde se detallan en la ilustración 3:

- Almacenamiento de energía por gravedad sólida en torre: Este sistema de almacenamiento consta en una estructura fija de gran altura donde pueda subir bloques pesados de hasta 35 toneladas y posteriormente descolgarlos para así generar electricidad, alcanzando una capacidad de almacenamiento de hasta 35MWh.
- Almacenamiento de energía por gravedad sólida en eje: Este sistema de almacenamiento consta de un cabrestante y una perforación a ras del suelo donde por medio del cabrestante hace subir bloques pesados y los hace descolgar, que por medio de la energía potencial y la gravedad la transforman en energía eléctrica. El tamaño y peso del bloque depende directamente del diámetro del pozo
- Almacenamiento de energía por gravedad sólida por medio de un pistón: Este sistema de almacenamiento consta de un gran pistón que se encuentra conectado internamente con un recipiente gigante, que por medio de una turbina hidráulica hace entrar agua dentro del recipiente haciendo que el pistón se eleve y posteriormente se deje descolgar liberando energía.
- Almacenamiento de energía por gravedad sólida con pistón de aire comprimido: Este sistema de almacenamiento se basa en el almacenamiento de energía por gravedad sólida por medio de un pistón, con la particularidad que la fuente de energía que utiliza para elevar el pistón es por medio de aire comprimido
- Almacenamiento de energía por gravedad sólida con pistón de elevación por cable: Este sistema de almacenamiento se basa a partir del almacenamiento de energía por gravedad sólida por medio de un pistón, con la particularidad que la fuente que utiliza para elevar el pistón es un motor que por medio de un cable o guaya lo eleva.
- Almacenamiento de energía por gravedad sólida en vagones de mina de montaña: Este sistema de almacenamiento se basa en una pendiente que por medio de vagones sube los bloques a la parte más alta, que posteriormente se dejan descolgar para liberar dicha energía cuando sea pertinente.
- Almacenamiento de energía por gravedad sólida en vagones de montaña por cable: este sistema de almacenamiento utiliza una pendiente como soporte donde por medio de rieles, algo parecido a los teleféricos sube estos grandes bloques en la parte más alta, donde posteriormente se dejan descolgar para liberar esta energía cuando se requiera.
- Almacenamiento de energía por gravedad sólida basado en máquinas: este sistema se relaciona mucho con S-SGES donde su sistema de almacenamiento se basa en subir grandes bloques hasta la superficie, donde consta de un motor lineal y varias cuerdas para hacerlo.

Ilustración 3: Tipos de tecnologías de almacenamiento por gravedad.



Fuente: (Tong et al., 2022)

4.2.3. Análisis comparativo del almacenamiento

A continuación, se hacen una serie de pruebas de funcionalidad, adaptabilidad, vida útil, seguridad, adaptabilidad a diferentes zonas geográficas, entre otros.

La tabla 4 muestra diferentes variables a tener en cuenta ante la implementación de una unidad de almacenamiento por gravedad, donde depende especialmente de la topología constructiva de cada tipo de almacenamiento. Donde el sistema de medida es alto, medio o bajo según la variable que se tomó en cuenta para el análisis.

Tabla 4: análisis comparativo de los diferentes tipos de almacenamiento por gravedad.

Tipo de almacenamiento por gravedad	Capacidad	Seguridad	Eficiencia por ciclo	Adaptabilidad geográfica	Tiempo de vida	Tiempo de respuesta	Modularidad
Almacenamiento de energía por gravedad sólida en torre.	Alta	Alta	Alta	Alta	Media	Media	Expandible
Almacenamiento de energía por gravedad sólida en eje.	Baja	Alta	Alta	Baja	Media	Alta	No ampliable
Almacenamiento de energía por gravedad sólida por medio de un pistón.	Alta	Alta	Media	Alta	Alta	Alta	Ampliables
Almacenamiento de energía por gravedad sólida con pistón de aire comprimido.	Alta	Media	Media	Alta	Alta	Alta	Ampliables

Almacenamiento de energía por gravedad sólida con pistón de elevación por cable.	Alta	Media	Media	Alta	Alta	Alta	Ampliables
Almacenamiento de energía por gravedad sólida en vagones de mina de montaña.	Media	Alta	Baja	Media	Baja	Alta	Expandible
Almacenamiento de energía por gravedad sólida en vagones de montaña por cable.	Media	Alta	Baja	Media	Baja	Media	Expandible
Almacenamiento de energía por gravedad sólida basado en máquinas.	Alta	Baja	Alta	Baja	Alta	Baja	Expandible

Fuente: (Tong et al., 2022)

De la tabla 4 se tomó las siguientes apreciaciones:

- La capacidad de almacenamiento de energía depende de que tanto pueda escalarse cada tipo de almacenamiento por gravedad, dependiendo principal de su sistema y que tan ampliable sea dependiendo de la geografía.
- Se evalúa la seguridad dependiendo de que tantos equipos utilice para el almacenamiento de energía.
- La eficiencia por cada ciclo depende de las pérdidas por fricción de cada sistema.
- La adaptabilidad geográfica de cada sistema de almacenamiento depende directamente de su configuración.
- El tiempo de vida de cada uno de estos almacenamientos dependen del desgaste por fricción dependiendo de su analogía.
- El tiempo de respuesta depende de que tan rápido puede responder la unidad de almacenamiento en el aporte de energía cuando el sistema lo requiera y también de que tanto demore recuperándose en la carga.
- El modularidad depende de que tan flexible sea el sistema de almacenamiento.

Puntuación cuantitativa

Para la puntuación cuantitativa se utiliza el siguiente sistema de evaluación: 12 es la calificación más alta, 6 medio y 3 normal.

La tabla 5 muestra la calificación que se le dieron a los distintos sistemas de almacenamiento por gravedad en los diferentes parámetros, donde la puntuación más alta es 12. Por ejemplo, la unidad de almacenamiento que cuenta con mayor capacidad de almacenamiento de energía es el almacenamiento de energía por gravedad sólida en torre y almacenamiento de energía por gravedad sólida basado en máquinas, siendo este último el que cuenta con el peor tiempo de respuesta. Se evaluaron otras variables como la adaptabilidad geográfica, vida útil, eficiencia por ciclo, seguridad y modularidad arrojando diferentes valores dependiendo del tipo de almacenamiento por gravedad.

Tabla 5: Tabla de valoración cuantitativa de cada vía técnica.

	Almacena miento de energía por gravedad sólida en torre	Almacena miento de energía por gravedad sólida en eje	Almacena miento de energía por gravedad sólida por medio de un pistón	Almacena miento de energía por gravedad sólida con pistón de aire comprimi do	Almacena miento de energía por gravedad sólida con pistón de elevación por cable	Almacena miento de energía por gravedad sólida en vagones de mina de montaña	Almacena miento de energía por gravedad sólida en vagones de montaña por cable	Almacena miento de energía por gravedad sólida basado en máquinas
Capacidad de almacena miento de energía	12	4	10	11	11	8	6	12
Eficiencia por Ciclo	11	12	8	8	8	4	6	8
Seguridad	6	6	4	3	3	2	2	6
Adaptabili dad geográfica	6	2	5	5	5	4	3	5
Tiempo de respuesta	2	3	3	3	3	2	2	1
Tiempo de vida	3	3	3	3	3	1	1	3
Modularid ad	3	1	2	2	2	3	3	3
Calificació n general	43	31	35	35	35	24	23	38

Fuente: (Tong et al., 2022)

Se observa de la tabla 5 que el sistema de almacenamiento que mejor puntuación tiene con respecto a los parámetros anteriormente hablados es el almacenamiento de energía por gravedad sólida en torre (T-SGES), sobresaliendo por encima de los otros tipos de almacenamiento por gravedad.

Este tipo de almacenamiento por gravedad es un almacenamiento de energía que hasta el momento no es tan conocido y por consiguiente es poco implementado a nivel mundial. La ilustración 4 muestra una de las tecnologías de almacenamiento de energía por gravedad en torre que ha se ha implementado en el año 2021 por el país de Reino unido en la ciudad de Edimburgo que consta de una torre de 15 metros de altura que por medio de poleas suben bloques de 25 toneladas almacenando esta energía para aprovecharla cuando sea necesaria, donde puede inyectar a la red hasta 250 kW (O'Neill, 2022).

A continuación, se observa la implementación de esta unidad de almacenamiento por gravedad.

Ilustración 4: Almacenamiento de energía por gravedad en torre de la empresa Gravitricity.



Fuente: (O'Neill, 2022).

Este tipo de almacenamiento se llama almacenamiento de energía por gravedad sólida en torre. Donde fue el sistema de almacenamiento por gravedad que mejor resultados arrojó en la comparación con los demás tipos de almacenamiento.

4.3. Solución tecnológica en una fuente de generación fotovoltaica

Para mitigar la intermitencia de las fuentes de generación fotovoltaica se han recurrido a sistema de almacenamiento de energía, para mantener el sistema equilibrado.

Una tecnología de almacenamiento de energía es el supercondensador que aporta beneficios al integrarlo a una fuente de generación fotovoltaica para compensar la potencia de la red en un determinado momento, cuando la generación fotovoltaica no pueda con la demanda de potencia, dándole a la red eléctrica confiabilidad, flexibilidad y seguridad.

Soporte de frecuencia de microrred AC con alta penetración fotovoltaica mediante supercondensador.

Con la integración en la última década de energías alternativas en especial fuentes de generación fotovoltaica a la red ha traído consigo desafío e inconvenientes de calidad de la energía donde el principal fenómeno es que conduce al desequilibrio de la estabilidad del sistema, lo que puede concurrir a cambios en la frecuencia, lo que es fatal para el sistema eléctrico interconectado. Por esta razón se han venido integrado diferentes tipos de almacenamiento de energía para solventar dichos fenómenos.

Un estudio que se realizó con la integración de un supercondensador, directamente conectado en el enlace de corriente continua en un inversor fotovoltaico. Este sistema funciona controlando la tensión en el supercondensador por medio de la variación en la frecuencia que pueda presentarse en el sistema de conexión común de la red, para así dar una respuesta instantánea a cualquier desviación, manteniendo la fuente de generación fotovoltaica en el punto de máxima potencia.

Este estudio abarca un sistema híbrido de una fuente convencional (térmica) y la fuente alternativa (fotovoltaica) conectadas a una Microrred.

Se hacen diferentes simulaciones donde se simulan aumento y disminución de la potencia al lado de la carga y cuando la irradiancia no sea constante o ideal sobre los paneles fotovoltaicos.

Para desarrollar este estudio de la manera más real posible se introduce a la Microred la inercia virtual artificial donde utilizan diferentes mecanismos como:

- Técnicas de control
- Rangos de los convertidores de potencia
- Características propias de la generación
- Características propias del almacenamiento de energía

Para simular el almacenamiento de energía se utiliza un sofisticado modelo electromecánico de generador síncrono mediante un convertidor que controla el sistema de almacenamiento de energía del sistema. Por otro lado para equilibrar la inercia del sistema después de las perturbaciones se utiliza un convertidor que reemplaza o imita al generador síncrono llamado synchronverter, donde se utiliza en este caso el control de generador síncrono virtual (VSG) (Mosa, Yousef, El, et al., 2022).

Al implementar este sistema de almacenamiento en una fuente de generación alternativa como la fotovoltaica traerá consigo beneficios para el sistema como lo son:

- Mejorar la frecuencia ante perturbaciones
- Aporta la máxima potencia al sistema que puede generar la planta fotovoltaica

La técnica que se utiliza en este estudio es la emulación de la inercia de la masa en rotación directa.

Al momento de las perturbaciones el sistema de almacenamiento está en la capacidad de soportar la variación de la frecuencia mediante el control de voltaje de corriente directa, ya después de ser restablecida la frecuencia del sistema el voltaje vuelve a su valor nominal utilizando controladores secundarios.

Se utiliza un sistema de derivación de ecuaciones matemáticas donde especifica los siguientes parámetros:

- la relación que existe entre el controlador propuesto y la inercia de la fuente de generación fotovoltaica.
- La inercia de la red eléctrica.
- Nivel de carga en que se encuentra el supercondensador y que tanta energía puede aportar al sistema.

El control que se propone en la capacidad de ampliarse para lograr una cierta cantidad en la inercia del sistema, incluso para estar en la capacidad de proporcionar la inercia que aporta la planta térmica (Mosa, Yousef, El Masry, et al., 2022).

4.3.1 Descripción de los 3 sistemas bajo investigación

En el estudio se propusieron 3 sistemas, para así evaluar el modelo de control propuesto para cada uno de estos escenarios como se observa en la ilustración 5.

Cada uno de los escenarios constas de dos fuentes de generación conectadas a la Microred.

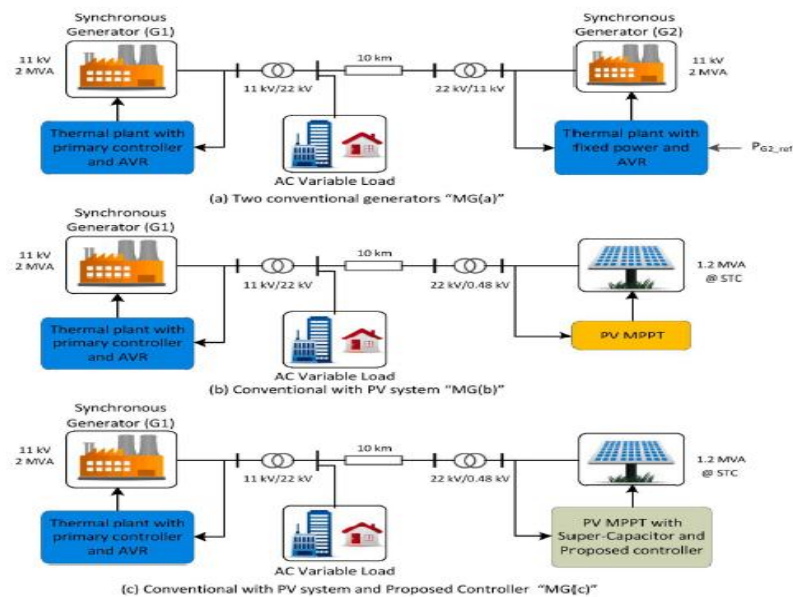
- En el primer escenario MG(a) consta dos fuentes de generación convencionales (térmicas) con unos parámetros nominales de 11 KV y 2 MVA, mientras que una trabaja mediante un bus Slack y la otra aporta un control de potencia constante a la red.
- En el segundo escenario MG(b) consta de la integración a la Microred de una fuente de generación convención (térmica) con parámetros nominales de 11 KV Y

2MVA y una fuente de generación alternativa (Fotovoltaica) donde entrega una potencia a la red de 1.2 MVA trabajando en el punto de máxima potencia aporrandando potencia constante a la red dependientemente de las condiciones meteorológicas.

- En el tercer escenario MG(c), se observa una integración a la Microred de una fuente de generación convención (térmica) con parámetros nominales de 11 KV Y 2MVA y una fuente de generación alternativa (Fotovoltaica) de 1.2 MVA con un supercondensador integrado para el almacenamiento de energía. El supercondensador entra en operación al haber una perturbación en la Microred, cuando halla intermitencia en la planta fotovoltaica (Mosa, Yousef, El, et al., 2022).

En la siguiente ilustración se observa los tres escenarios anteriormente mencionados.

Ilustración 5: Microrred con diferentes configuraciones.

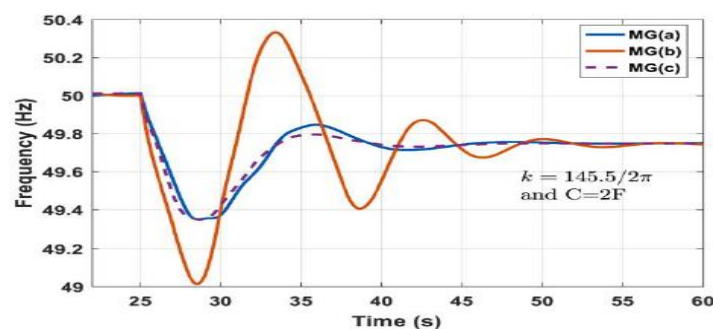


Fuente: (Mosa, Yousef, El, et al., 2022)

4.3.3. Simulación y resultados experimentales

- Al simular una perturbación en los tres escenarios con un aumento en la potencia de 0,2 MW se observa:

Ilustración 6: Respuesta de frecuencia ante una perturbación de aumento de potencia



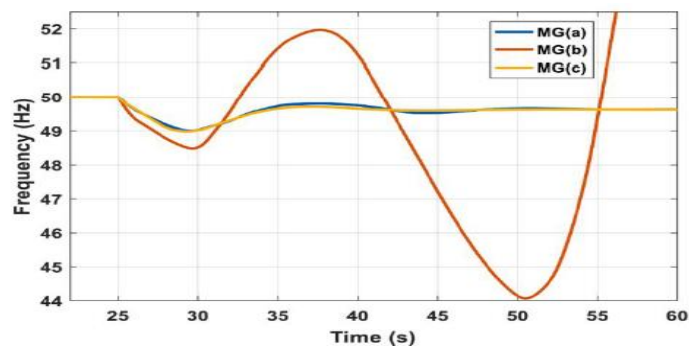
Fuente: (Mosa, Yousef, El, et al., 2022)

De la ilustración 6 se detalla que la perturbación se origina a los 25 segundos donde el escenario de las fuentes de generación híbrida (térmica y Fotovoltaica), es el que mayor variación en la frecuencia sufre. El escenario que más rápido se estabilizo y que tuvo menos variación en los índices de la frecuencia fue el escenario fuente de generación híbrida (térmica y Fotovoltaica) con un supercondensador integrado para el almacenamiento de energía, donde se mantuvo entre los rangos de 49,4-50 Hz, estando dentro de los límites de operación establecidos por los diferentes países europeos.

El escenario con fuentes de generación híbrida (térmica y Fotovoltaica) que no contiene sistema de almacenamiento sufren variaciones en la frecuencia considerables que según las regulaciones en el suministro eléctrico se activaría el control ante variaciones de frecuencia, hasta que vuelva a estabilizarse dentro rangos permitidos.

- Al simular una perturbación en los tres escenarios con un aumento en la potencia de 0,2 MW se observa:

Ilustración 7: Respuesta de frecuencia ante una perturbación de aumento de potencia de 0,3 MW.



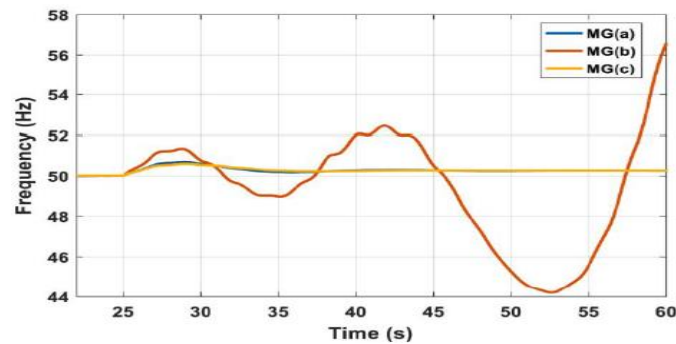
Fuente: (Mosa, Yousef, El, et al., 2022)

De la ilustración 7 se observa que el escenario con fuentes de generación híbrida (térmica y Fotovoltaica) que no contiene sistema de almacenamiento sufre variaciones en la frecuencia fatales que según las regulaciones en el suministro eléctrico saldría instantáneamente de la red eléctrica, por medio del control de la frecuencia ya que sobrepasa los rangos establecidos de cualquier normativa regulatoria en la calidad de la potencia.

Las fuentes convencionales (térmicas) y las fuentes híbridas (Térmicas y fotovoltaica con el sistema de almacenamiento) sufren una variación en la frecuencia de aproximadamente 1 Hz que después de 15 segundos logra estabilizar la frecuencia dentro los rangos óptimos, manteniendo el sistema estable y la generación de potencia continua ante estos cambios en la carga.

- Al simular una perturbación en los tres escenarios con una disminución en la carga de 0,2 MW se observa:

Ilustración 8: Comportamiento de la frecuencia al disminuir la demanda en 0,2 MW.



Fuente: (Mosa, Yousef, El, et al., 2022)

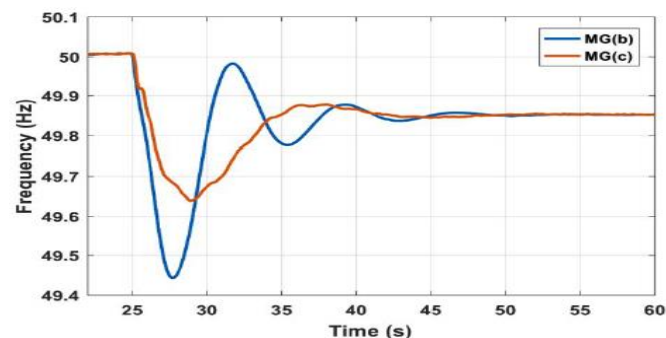
De la ilustración 8 el escenario con fuentes de generación híbrida (térmica y Fotovoltaica) que no contiene sistema de almacenamiento sufre variaciones en la frecuencia fatales que según las regulaciones en el suministro eléctrico saldría instantáneamente de la red eléctrica, por medio del control de la frecuencia ya que sobrepasa los rangos establecidos de cualquier normativa regulatoria en la calidad de la potencia.

Los escenarios con fuentes de generación convencionales (térmicas) y las fuentes híbridas (Térmicas y fotovoltaica con el sistema de almacenamiento) sufren una variación en la frecuencia que no afectan en si el sistema eléctrico, ya que logra equilibrar la frecuencia antes de los 10 segundos, manteniéndose en los rangos óptimos de operación.

- Al simular una perturbación en la irradiancia que puede captar la planta fotovoltaica pasando de 1000 W/m² a 900 W/m² se observa en los dos escenarios que tienen integrados este sistema de generación alternativo lo siguiente:

Ya que las fuentes de generación convencionales (térmicas) no se ve afectada ante la variación de la irradiancia no se tiene en cuenta para este caso de estudio.

Ilustración 9: Comportamiento de la frecuencia al disminuir la irradiancia solar.



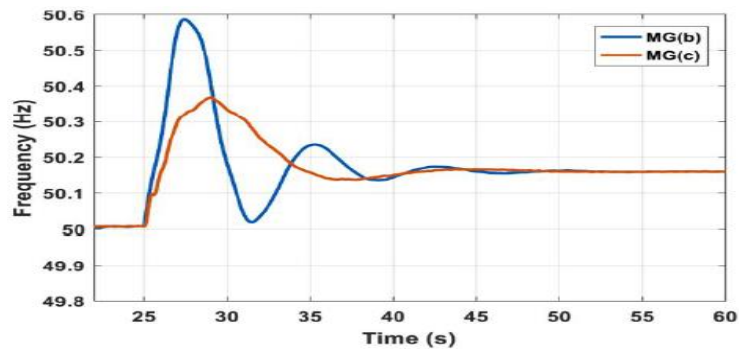
Fuente: (Mosa, Yousef, El, et al., 2022)

En la ilustración 9 se detalla que el escenario de la fuente de generación híbrida (térmica y Fotovoltaica) que no tiene ningún tipo de almacenamiento de energía, se observa que sufre variaciones en la frecuencia dentro de unos rangos de 49,45-50 Hz, aun así, logra equilibrarse después de 15 segundos manteniéndose dentro de los parámetros de operación según lo establecido por las

regulaciones. Mientras que en el escenario de las fuentes híbridas (Térmicas y fotovoltaica con el sistema de almacenamiento) sufre variaciones más tenues gracias al almacenamiento de energía del Supercondensador, manteniéndose dentro de unos rangos de 49,65-50 Hz, logrando estabilizar la frecuencia en un tiempo de 15 segundos, manteniéndose así en operación.

- Al simular una perturbación en la irradiancia que puede captar la planta fotovoltaica pasando de 1000 W/m² a 1100 W/m² se observa en los dos escenarios que tienen integrados este sistema de generación alternativo lo siguiente:

Ilustración 10: Comportamiento de la frecuencia ante el aumento de la irradiancia solar.

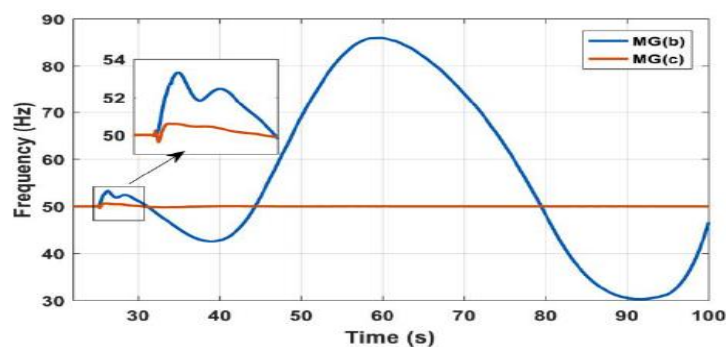


Fuente: (Mosa, Yousef, El, et al., 2022)

Se observa en la ilustración 10 que el escenario de la fuente de generación híbrida (térmica y Fotovoltaica) que no cuenta con una tecnología de almacenamiento de energía, se observa que sufre variaciones en la frecuencia de 50-50,6 Hz ante la alta irradiancia, aun así, se logra reestablecer de una manera óptima después de 20 segundos mantiene entre los rangos de operación según las regulaciones, donde se logra estabilizar después de 15 segundos. Mientras que en el escenario con fuentes híbridas (Térmicas y fotovoltaica con el sistema de almacenamiento), sufre variaciones un poco más tenues gracias al almacenamiento de energía (Supercondensador) donde la variación de la frecuencia se mantiene dentro de 50,35-50 Hz, durante 20 segundos logrando después de ese tiempo equilibrar su frecuencia.

- Para esta perturbación de falla, se simula un cortocircuito trifásico en el bus de la planta fotovoltaica, donde la falla tiene un tiempo de 100ms de duración donde se puede observar lo siguiente:

Ilustración 11: Comportamiento de la frecuencia en cortocircuito



Fuente: (Mosa, Yousef, El, et al., 2022)

La ilustración 11 muestra que la fuente de generación híbrida (térmica y Fotovoltaica) que no cuenta con una tecnología de almacenamiento de energía, la falla ocasiona variaciones en la frecuencia considerables donde la frecuencia de ese sistema se descontrola por completo donde según la regulación en el suministro eléctrico el control de frecuencia la obligarían a salir del sistema de red eléctrico. Por otro lado, el escenario con fuentes híbridas (Térmicas y fotovoltaica con el sistema de almacenamiento) se observa que la tecnología de almacenamiento responde bien ante esta perturbación de falla no llegando a sobrepasar los 1 Hz en la variación de la frecuencia ni por encima ni por debajo respecto a su frecuencia nominal, lo que conlleva a que la generación en este escenario siga operando en el sistema eléctrico.

Esta tecnología de almacenamiento que utiliza como fuente de almacenamiento un supercondensador se integra eficientemente a plantas de generación fotovoltaica integradas con otras fuentes convencionales, lo que aporta al sistema confiabilidad en el suministro de potencia, donde se pudo detallar que el sistema responde de manera óptima ante alguna perturbación que se pueda presentar en la calidad del servicio.

4.4. Solución tecnológica en generación Eólica

En el caso de la generación eólica sufre de igual manera intermitencia en la entrega de potencia constante a la red, por lo que se han implementado tecnologías de almacenamiento de energía para amortiguar las variaciones que se puedan presentar en la red para que así el sistema de generación siga inyectando potencia durante largos periodos de tiempo. Lo que en caso contrario ocasionaría frecuencias fatales en la red eléctrica obligando a salir de operación.

Se han estudiado diferentes tipos de almacenamiento de energía que se pueden aplicar a plantas eólicas como lo es el almacenamiento por aire líquido. Esta tecnología de almacenamiento de energía por medio de aire líquido es una alternativa que se ha venido utilizando por su practicidad, bajo costo de implementación, ampliable y no depende de zonas geográficas ideales.

Este sistema de almacenamiento se ha visto por medio de investigaciones que es eficiente al momento de integrarlo a fuentes de generación de energía, pero no se ha detallado a fondo la eficiencia que puede ofrecer ante variaciones de la frecuencia en una fuente de generación eólica.

- ✓ Sea estudiado un mecanismo en particular, donde se basa en el soporte de la frecuencia mediante una unidad de almacenamiento por aire líquido para el control de la frecuencia. Este mecanismo utiliza una unidad de almacenamiento por baterías, tecnología de almacenamiento por aire comprimido y una planta eólica donde utiliza un aerogenerador con velocidad variable. Este sistema desarrolla una respuesta de frecuencia rápida basado en Fuzzy, donde el almacenamiento de energía por aire líquido se integra con el fin de controlar la frecuencia del sistema manteniéndola entre los rangos permisibles, por otra parte, también se utiliza un sistema de almacenamiento de baterías y el aerogenerador de velocidad variable donde se desarrolla un sistema de control inercial independiente, lo que contribuye de igual manera al control de la frecuencia. Para el control de la tecnología de almacenamiento por aire líquido se utiliza un control fuzzy donde será la respuesta del sistema de almacenamiento frente a variaciones en la frecuencia. El controlador Fuzzy funciona a partir de la variación de la frecuencia en la red y la tasa de cambio en la frecuencia recopilando estos datos en la entrada del control. Estando a la salida del control Fuzzy la energía almacenada del aire comprimido. (Kheshti et al., 2022).

Al implementar este sistema de almacenamiento en una fuente de generación alternativa como la eólica traerá consigo beneficios para el sistema como:

- ✓ Mejorar las variaciones en la frecuencia al momento en que la planta eólica no brinde potencia constante al sistema.

El proceso de carga se origina al aprovechar el exceso de energía eléctrica cuando la potencia generada supera la demanda, donde esta energía es utilizada primeramente para purificar el ambiente, luego comprimir el aire y posteriormente convertirlo en aire líquido enfriando a muy bajas temperaturas. Después de ese mecanismo el aire líquido es almacenado en un recipiente aislado. Cuando la carga sea mayor a la potencia generada, el aire que anteriormente estaba almacenado se bombea a presiones altas, donde se calienta para convertirse en vapor, lo que por medio de conductos llegan a las turbinas generando electricidad para inyectarla a la red, equilibrando de nuevo el sistema.

En el proceso de compresión del aire el calor que es generado se almacena otro tanque, que más adelante puede utilizarse para sobrecalentar el vapor que sale en el proceso de descarga dándole mayor flujo de vapor y con esto más potencia al sistema. Al momento de la descarga el porcentaje de vapor que se convierte en exergía fría se recupera almacenándose de nuevo en un recipiente de almacenamiento en frío, utilizándose posteriormente en el proceso de enfriamiento del aire, ahorrando consumo de energía al momento de carga. Este sistema de recuperación de vapor y exergía fría en el sistema de carga y descarga de la unidad de almacenamiento por aire líquido ofrece una mayor eficiencia en la generación.

4.4.2. Estrategia de control de respuesta de frecuencia rápida control de caída inercial

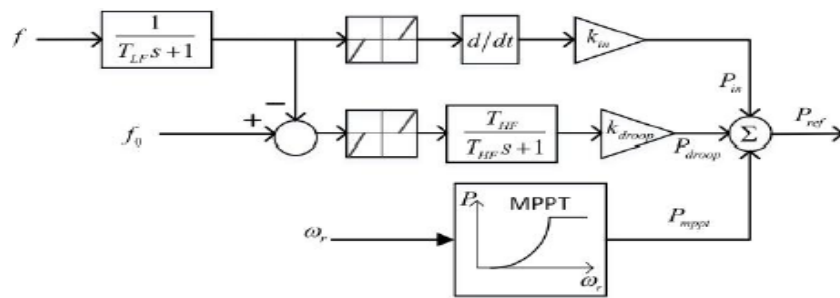
La metodología que se utilizó en ese estudio en particular para la inyección de potencia a la red eléctrica por medio de la fuente de almacenamiento por aire líquido se basa en un método paso a paso o rampa, donde el sistema de almacenamiento toma la energía de las masas rotatorias en este caso la fuente de generación eólica para cargarse, pero de una manera progresiva sin ir a descompensar el sistema de modo que no afecte la frecuencia.

- ✓ El control de caída en la inercia se aplica en el aerogenerador de velocidad variable y en el almacenamiento por baterías para estar en afinidad con la respuesta de frecuencia rápida.
- ✓ El anterior control se aplica a una fuente de generación renovable que consta de una fuente de generación eólica, fotovoltaica, almacenamiento de energía en baterías, almacenamiento de energía en aire líquido, generación por medio de una planta diésel y la carga del sistema a estudiar.
- ✓ Para ese estudio se utilizó una plataforma experimental que valida los datos en tiempo real con un bucle de hardware (Kheshti et al., 2022).

El método que se utilizó en ese estudio se basa en observar cambios en la frecuencia de las fuentes de generación, analizando estos cambios con el esquema de control, para así por medio por medio de la fuente de almacenamiento inyectar potencia, sin ir a afectar la estabilidad de la red eléctrica.

En la ilustración 12 se observa el esquema de control de la frecuencia que se utilizó.

Ilustración 12: Esquema de emulación de inercia y control de caída.



Fuente: (Kheshti et al., 2022)

Ya que este esquema de control está propenso a ruidos del sistema que pueden interferir con la medición de la frecuencia por esta razón se adiciona un filtro de paso bajo. En otro caso para pequeñas variaciones de carga que no sea considerable para el sistema se utiliza una banda muerta, para así evitar que se active el esquema de control inercial.

A parte del bucle de respuesta inercial se inserta un término de caída, similar a la variación de la frecuencia ($\Delta f = f - f_0$). Para evitar que al momento de presentarse la perturbación por la intermitencia de la planta eólica la caída no trabaje en estado estable, se agrega un filtro de paso alto para que la generación de la planta eólica vuelva a su punto de máxima transferencia de potencia, siendo este filtro de paso alto (THF) fundamental para el esquema de control (Kheshti et al., 2022).

Respuesta de frecuencia rápida de base difusa por almacenamiento de energía por aire líquido

El control por base difusa Fuzzy ha sido ampliamente estudiado, debido a sus grandes aportes al control, siendo independiente y simple, donde utiliza modelos matemáticos para analizar el sistema a estudiar. Este sistema de control utiliza un parámetro Si- entonces tanto en las entradas y salidas del sistema a evaluar donde según los parámetros dados activa mecanismos de control. Consta de tres pilares fundamentales para el control que son:

- Fuzzificación: utiliza señales de entrada y salida, utilizando parámetros lingüísticos. Negativo(N), Positivo(P) y cero(Z). los parámetros de entrada del control fuzzy consta de la variación de frecuencia del sistema y la deriva del mismo. Por otra parte, la salida del control es la inyección de potencia por parte de la tecnología de almacenamiento por aire líquido.

- Sistema de inferencia difusa: se utiliza el tipo de controlador Mamdani-type, donde las reglas de control se presentan en la siguiente tabla.

- Defuzzificación: Utiliza parámetros lingüísticos de números ejecutables nítidos

Lo que es el almacenamiento de energía por aire líquido utiliza el controlador Fuzzy, mientras que el sistema de almacenamiento de energía por baterías y el sistema de generación eólica utilizan el control inercial. Lo que los dos sistemas de control ayudan al soporte en la variación de frecuencia (Kheshti et al., 2022).

4.4.3. Resultados de simulación

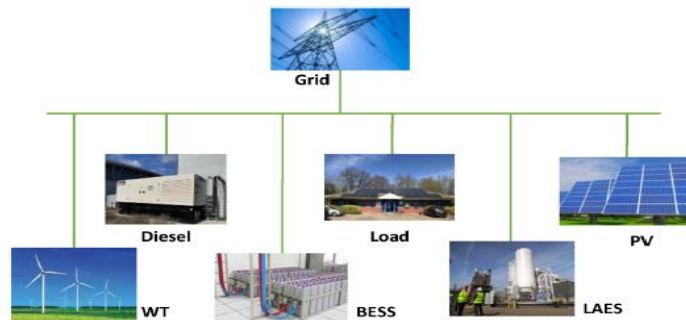
Para la simulación se analiza una Microred, para poner a prueba el control mediante el almacenamiento por aire comprimido ante una perturbación de frecuencia. La ilustración 13 muestra la Microred que consta de una fuente de generación fotovoltaica con capacidad de entregar potencia a la red de 8MW, una fuente de generación eólica con capacidad de 10 MW, la tecnología de

almacenamiento de energía por aire líquido con capacidad de 10 MW, una fuente de almacenamiento de energía por baterías con capacidad de 5MW y por último la generación a partir de una fuente convencional diésel con capacidad de 15 MW. La carga o demanda de la Microred eléctrica es de 50 MW.

La Microred que se escogió para la simulación se encuentra conectada al suministro eléctrico de alta tensión, donde en un tiempo igual a 5 segundos se desconecta de la red eléctrica, para simular la perturbación en el desequilibrio de potencia.

En primera medida los dos sistemas de almacenamiento de energía y el sistema de generación eólica, su esquema de control es mediante la respuesta inercial. La metodología de operación mediante el control inercial consta de 3 variables. Operar solo con termino de inercia, operar solo con el termino de caída o inercia y caída. Sabiendo que los tres sistemas de respuesta son las dos fuentes de almacenamiento y la generación eólica se tendría 27 posibles escenarios de respuesta en el control como lo muestra la tabla 5 (Kheshti et al., 2022).

Ilustración 13: Sistema híbrido integrado de fuentes de generación alternativas, convencional y las tecnologías de almacenamiento de energía como caso de estudio.



Fuente: (Kheshti et al., 2022)

Tabla 6: Diferentes escenarios de esquema de control implementados en el híbrido LAES-WT-BESS.

# CASO	WT	LAES	BESS	NADIR DE FRECUENCIA
1	Inercia	Inercia	Inercia	59.526
2	Inercia	Inercia	Caída	59.526
3	Inercia	Inercia	Inercia-caída	59.526
4	Inercia	Caída	Inercia	59.754
5	Inercia	Caída	Caída	59.754
6	Inercia	Caída	Inercia-caída	59.754
7	Inercia	Inercia-caída	Inercia	59.754
8	Inercia	Inercia-caída	Caída	59.754
9	Inercia	Inercia-caída	Inercia-caída	59.754
10	Caída	Inercia	Inercia	59.685
11	Caída	Inercia	Caída	59.685
12	Caída	Inercia	Inercia-caída	59.685
13	Caída	Caída	Inercia	59.524
14	Caída	Caída	Caída	59.521
15	Caída	Caída	Inercia-caída	59.521
16	Caída	Inercia-caída	Inercia	59.577
17	Caída	Inercia-caída	Caída	59.574
18	Caída	Inercia-caída	Inercia-caída	59.574

19	Inercia-caída	Inercia	Inercia	59.701
20	Inercia-caída	Inercia	Caída	59.702
21	Inercia-caída	Inercia	Inercia-caída	59.702
22	Inercia-caída	Caída	Inercia	59.543
23	Inercia-caída	Caída	Caída	59.544
24	Inercia-caída	Caída	Inercia-caída	59.544
25	Inercia-caída	Inercia-caída	Inercia	59.587
26	Inercia-caída	Inercia-caída	Caída	59.585
27	Inercia-caída	Inercia-caída	Inercia-caída	59.585

Fuente: (Kheshti et al., 2022)

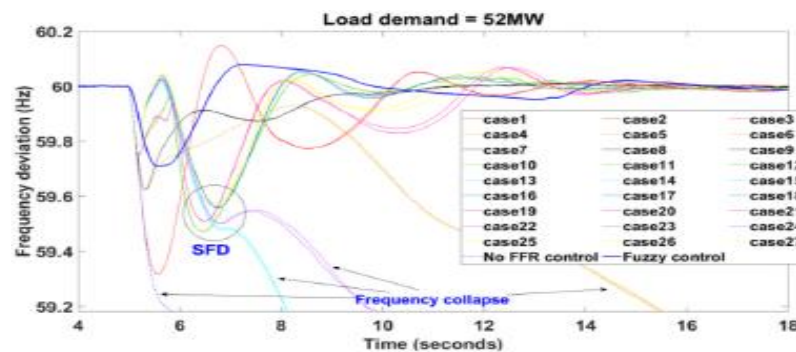
El sistema de control inercial de la tabla 6 muestra que los casos que tuvieron una mejor respuesta ante la variación de frecuencia que otros. Sin embargo, la variación más pronunciada de la frecuencia fue de más o menor 0,5 Hz por debajo de la frecuencia nominal.

Tomando los mejores casos ante la caída de la frecuencia, se observa que en el escenario 4-9 la frecuencia baja a 59.754 Hz y los que tuvieron peor índice en la variación de frecuencia fueron los casos 14 y 15, donde el parámetro de control inercial de la generación eólica es solo inercia. Algunas de las ventajas al utilizar la unidad de almacenamiento por aire líquido es:

- Ampliable
- Ocupa menos espacio
- Ofrece una tasa de almacenamiento alta
- Densidad de energía alta

Al momento de implementar alguna tecnología de almacenamiento es importante buscar el controlador más preciso y rápido ante la variación de la frecuencia del sistema, ya que de esto depende mantener la inercia de la red eléctrica para dar una respuesta rápida ante la perturbación, por consiguiente, se debe tener en cuenta los rangos permitidos de cada normativas o regulaciones vigentes de cada país para dar confiabilidad, flexibilidad y seguridad al sistema.

Ilustración 14: Control de respuesta de frecuencia rápida en la microrred híbrida con fuentes alternativas y unidades de almacenamiento con un aumento de carga de 2 MW.



Fuente: (Kheshti et al., 2022)

Para la siguiente prueba se analiza la respuesta de frecuencia rápida de los diferentes escenarios de control inercial y control Fuzzy, donde se simula un escenario en que la demanda de carga aumenta en 2 MW, donde la Microrred se encuentra fuera de operación antes del tiempo de los 5 segundos, tiempo donde se produce la perturbación y el sistema de Microrred entra para compensar la variación de potencia y así ajustar la frecuencia a su valor nominal que es de 60 Hz. Se observa en la ilustración 14 lo siguiente:

- Los escenarios 4,5,6,13,14,15,22,23,24 del control inercial tuvieron respuesta de frecuencia rápida fatales, saliéndose de los rangos de operación, mientras que el escenario 7,8,9 respondió bien frente a la caída de frecuencia manteniendo el sistema en operación y equilibrado
- En el control Fuzzy se observa que tuvo la mejor respuesta de frecuencia rápida donde pudo establecer la caída de frecuencia secundaria dentro de unos límites óptimos para la red eléctrica.
- El control Fuzzy combinado con el sistema de almacenamiento y las fuentes de energía alternativas ofrece los mejores resultados ante la frecuencia, sobresaliendo ante los 27 escenarios presentados por el control inercial.

La tecnología de almacenamiento por aire líquido responde bien ante el control Fuzzy ya que le permite dar una respuesta rápida ante la desviación de la frecuencia del sistema. La principal función del control difuso (Fuzzy) es dar una respuesta oportuna ante las variaciones de frecuencia del sistema manteniéndola entre los rangos establecidos por las regulaciones vigentes de cada país en el suministro eléctrico.

Método experimental que se utilizó

Para la simulación de estas perturbaciones se utilizó un equipo de prueba de hardware en bucle Opal-RT que se valida en tiempo real, donde pone a prueba la respuesta de las unidades de almacenamiento de aire líquido y baterías con la integración de la generación eólica para la respuesta rápida ante un nadir de frecuencia. La microrred se modela en RT-LAB. Donde utiliza cuatro mecanismos de emulación el primero lo compone la generación eólica, dos más las tecnologías de almacenamiento y por último uno que emula la red eléctrica. Los datos obtenidos se analizan mediante un protocolo de comunicación Modbus (Kheshti et al., 2022).

4.5. Solución tecnológica en generación Geotérmica

Este sistema de generación alternativo destaca ante los otros sistemas generación como lo son la eólica, fotovoltaica y mareomotriz, ya que su fuente de generación no es intermitente en el tiempo lo que puede brindar un flujo constante de potencia a la red. Sin embargo, hay otros factores que hacen que esta fuente de generación geotérmica no sea tan explotada, ya que sus altos costos de implementación, tener que perforar a mucha profundidad para encontrar temperaturas altas y con esto tener un mejor flujo de vapor hacen que sus costos incrementen. Por lo que se ha venido realizando una serie de estudios a pocas profundidades en la perforación para aprovechar este recurso sin que los costos sean tan elevados, pero esto conlleva a que el flujo de vapor que llega a las turbinas del generador no sea el más óptimo trayendo consigo problemas de calidad en la energía.

Novedoso transformador de calor de almacenamiento de energía asistido por compresión.

Se han buscado mecanismos tecnológicos para la solución de los problemas que se presentan al generar electricidad con fuente de generación geotérmica a bajas temperaturas. por esta razón se ha venido estudiando un novedoso transformador de calor que funciona similar a un transformador elevador de potencia, pero donde su entrada de energía es el vapor a bajas temperaturas y su salida es vapor a temperaturas más elevadas.

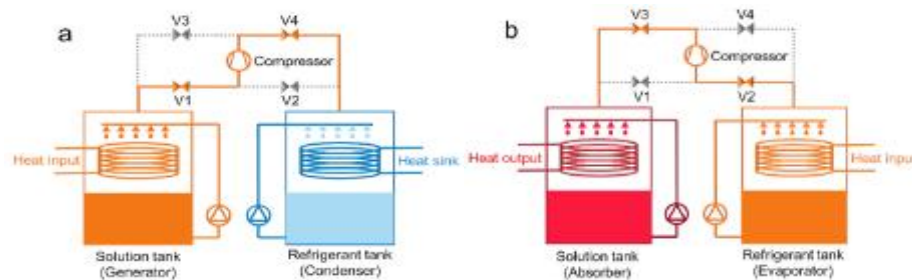
Anteriormente se habían enfocado en un sistema de almacenamiento de energía basado en un transformador de calor por absorción, lo que ayuda a mejorar los índices de temperatura, dando un mayor rendimiento al sistema de generación geotérmico. En busca de mejorar la eficiencia de esta

tecnología, se ha venido estudiando nuevos sistemas de almacenamiento de calor como lo es el almacenamiento de energía basado en absorción asistido por compresión.

4.5.1. Configuración del sistema y principio de funcionamiento

Para analizar los sistemas de almacenamiento se utiliza un modelo matemático donde analiza los dos sistemas de almacenamiento de calor, haciendo una comparación de ellos donde se detallan los siguientes aspectos: Proceso de carga, proceso de descarga, eficiencia, rendimiento en el almacenamiento de la energía calorífica, temperaturas en los disipadores (Ding et al., 2023).

Ilustración 15: Configuración del sistema del ciclo CESHT. (a) proceso de carga, (b) proceso de descarga.



Fuente: (Ding et al., 2023)

La ilustración 15 muestra la configuración de un transformador de calor donde consta de dos etapas que son:

Proceso de carga: En el proceso de carga se encuentran dos recipientes una de ellos con una solución que contiene bromuro de litio ($\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$) y que hace la función de generador, que es el recipiente donde recibe la entrada de calor a cierta temperatura del sistema que a su vez cuenta con un intercambiador de calor conectado en su interior que constan de un serpentín. El segundo recipiente consta de una solución refrigerante que este caso hace la función de disipador de calor que puede ser agua o aire y que hace la función de un condensador, que a su vez cuenta con un intercambiador de calor que se encuentra en su interior que consta de un serpentín. Estos dos recipientes están conectados por medio de 4 válvulas y entre ellas se encuentra un compresor donde el flujo del vapor se controla por las válvulas. Esa diferencia de temperatura que se crea entre los dos recipientes crea un proceso de generación, esta generación impulsa el vapor que contiene el recipiente con la solución hacia el recipiente refrigerante, para posteriormente ser condensado por el disipador de calor, esto hace que el recipiente que contiene la solución $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$ se concentre cada vez más quedando una mayor porcentaje de bromuro de litio que de agua, lo que genera que la energía térmica de este recipiente se cargue cada vez más.

Para dar eficiencia en el proceso de generación de carga térmica entra en operación el compresor que por medio de la apertura de las válvulas 1 y 4 y el cierre de las válvulas 2 y 3, se garantiza que el vapor se genere de manera uniforme reduciendo la presión del generador, aun con temperaturas de entrada bajas.

Proceso de descarga: en el proceso de descarga se utilizan los mismos equipos con la diferencia que el tanque que tiene la solución de bromuro de litio no se comporta como generador sino como absorbente del vapor que proviene del otro recipiente refrigerante que ya no se comporta como

condensador sino como evaporador donde se le inyecta energía de bajo grado para así calentar y posteriormente evaporar el refrigerante y que fluya hacia el recipiente de la solución donde este vapor es absorbido por la solución concentrada de bromuro de litio por medio del calor que este ha liberado, por consiguiente la temperatura al lado del recipiente de la solución aumenta para posteriormente ser liberado. Para ser más eficiente el proceso se hace apertura de las válvulas 2 y 3 y se cierran las válvulas 1 y 4, para así el compresor entre en funcionamiento y controle el vapor absorbido por la solución, manteniendo un flujo constante haciendo el sistema más eficiente e incrementado la temperatura de salida.

Resultados de simulación

La comparación en la eficiencia de los dos sistemas de almacenamiento de calor por absorción y almacenamiento de calor en absorción asistido por compresión arrojaron los siguientes resultados:

En la tabla 7 se muestran los resultados de simulación donde se utilizó un modelo matemático validado donde se obtienen los siguientes datos:

Tabla 7: Resultados de simulación de los transformadores de calor.

La descarga en almacenamiento de calor en absorción asistido por compresión disminuye progresivamente de 4,72 kW a 4,33 kW.
La descarga en almacenamiento de calor en absorción disminuye progresivamente de 2,26 kW a 0,33 kW.
Bajo parámetros de temperatura de la entrada del transformador de 60 °C y el disipador de calor de 25 °C, se tiene como resultado una salida en la temperatura de 125 °C en el almacenamiento de calor en absorción asistido por compresión.
Bajo parámetros de temperatura de la entrada del transformador de 60 °C y el disipador de calor de 25 °C, se tiene como resultado una salida en la temperatura de 90 °C en el almacenamiento de calor en absorción.
La eficiencia en el almacenamiento y la densidad de almacenamiento de energía se ven reducidas en los dos ciclos de almacenamiento, al aumentar la temperatura de salida del transformador de calor. Donde el almacenamiento de calor en absorción asistido por compresión obtiene una eficiencia de almacenamiento máxima de 0,44 y una densidad de almacenamiento de energía de 283,0 kWh/m³.
La eficiencia exergética de los sistemas de almacenamiento en un inicio se incrementa, posteriormente disminuyendo. Donde el almacenamiento de calor en absorción asistido por compresión tiene una mayor eficiencia exergética cuando la temperatura en la salida del transformador de calor es mayor a 80 °C. por ejemplo con una salida en la temperatura de 110 °C su eficiencia exergética es de 0,58.
Bajo parámetros de temperatura de la entrada del transformador de 60 °C y el disipador de calor de 25 °C, se tiene como resultado una salida en la temperatura de 90 °C en el almacenamiento de calor en absorción, Con el aumento de la temperatura de entrada la densidad en el almacenamiento de energía mejora de 35,2 kWh/m³ a 278,0 kWh/m³ y la eficiencia de almacenamiento mejora de 0,24 a 0,43.
Bajo parámetros de temperatura de la entrada del transformador de 45 °C y el disipador de calor de 25 °C, se tiene como resultado una salida en la temperatura de 90 °C en el almacenamiento de calor en absorción asistido por compresión, la densidad en el almacenamiento de energía mejora de 35,2 kWh/m³ a 278,0 kWh/m³ y la eficiencia de almacenamiento mejora de 0,24 a 0,43 y la eficiencia exergética de 0,57 se logra mediante una temperatura de entrada de 50 °C donde después disminuye.

- Al analizar el sistema con temperatura de entrada en el transformador de calor de 60 °C y salida de 90 °C, se vio que la eficiencia de almacenamiento de energía, la densidad en el almacenamiento de energía y la eficiencia exergética se ven reducida al aumentar la temperatura del disipador de calor en ambos ciclos de almacenamiento. Donde el almacenamiento de calor en absorción asistido por compresión arroja resultados de:
 - Eficiencia de almacenamiento de energía: 0,47
 - Densidad en el almacenamiento de energía: 294,3 kWh/m³
 - Eficiencia exergética: 0,62
 - Con una temperatura promedio de 5 °C en el disipador de calor

Fuente: (Ding et al., 2023).

De la tabla 7 se puede observar que los resultados del transformador de calor por absorción asistido por compresión generan mayor temperatura de salida de hasta 35 °C en relación al transformador de calor por absorción, dependiendo de la temperatura de entrada, lo que se ve reflejado en el vapor que se genera en la salida del transformador, lo que conlleva a mejorar la densidad del mismo, aportando una mayor eficiencia al sistema. El flujo de vapor que llega a las turbinas del generador es más espeso lo que resulta en una mayor generación de electricidad. Comparando los dos sistemas. El sistema propuesto aumenta la generación de electricidad en 242,8 kWh/m³, con relación al transformador de calor por absorción que es del 35,2 kWh/m³, con una temperatura de entrada del transformador de 60 °C. esto se debe a que el vapor se concentra aumentando considerablemente su densidad por la integración de la compresión. Por otra parte, el proceso de carga y descarga del transformador de calor por absorción asistido por compresión es más eficiente, donde en el proceso de descarga pasa de 4,72 kW a 4,33 kW mejorando el ciclo del sistema. Este sistema de almacenamiento brinda muy buenos resultados lo que se vuelve una tecnología de almacenamiento atractiva para implementar en sistemas de generación geotérmicos, reduciendo los costos de perforación y aumentando circunstancialmente la generación de electricidad.

4.6. Solución tecnológica en generación a partir de Biomasa

El sistema de generación a partir de biomasa tiene grandes ventajas en comparación a las demás fuentes de generación alternativas, ya que su fuente de energía se puede almacenar por grandes periodos de tiempos y grandes cantidades, siendo flexible a cualquier cambio en la carga que demanda la red eléctrica, pero debido a ciertos fenómenos como la pérdida de exergía en la generación, crea la necesidad de buscar soluciones tecnológicas que ayuden a mejorar el rendimiento en la generación de potencia. Por esta razón se han integrado demás sistemas a esta generación, como lo es el almacenamiento de energía por aire comprimido como se presenta a continuación.

Almacenamiento de energía de aire comprimido integrado a una fuente de generación a partir de Biomasa

En un estudio que se realiza mediante la integración de una tecnología de almacenamiento para mejorar la eficiencia en un ciclo combinado de gasificación de biomasa, donde su principal objetivo es evaluar la eficiencia en la entrega de energía a esta fuente de generación cuando sea necesaria. El funcionamiento de este sistema de almacenamiento consta primeramente de aprovechar todo ese vapor que escapa del proceso de generación de biomasa donde por medio de un recipiente se enfría para posteriormente comprimirlo, donde sería la etapa de carga del sistema de almacenamiento. Por otro lado, en el proceso de descarga este aire que anteriormente se había comprimido se calienta por medio del mismo sistema de combustión del ciclo combinado de biomasa donde por medio de conductos derivados del mismo sistema se inyecta este vapor, creando un mayor flujo de vapor que

llega a las turbinas del generador. Con este principio hace a la unidad de almacenamiento y generación más eficiente.

Para poder medir el desempeño de esta tecnología de almacenamiento integrado con el ciclo combinado de gasificación a partir de biomasa se evalúan 4 parámetros que son: La energía, exergía, economía y sensibilidad (Xue et al., 2022).

4.6.1. Metodología del estudio

Partiendo de un sistema de ciclo combinado de gasificación a partir de biomasa, en ese estudio se propone la integración de la tecnología de almacenamiento de energía mediante aire comprimido.

Sistema del ciclo combinado de gasificación a partir de biomasa

Los sistemas de almacenamiento se componen principalmente de tres estados que son: Carga, almacenamiento y descarga. Ya que cuando la demanda de energía es baja por parte de la carga los precios relacionados al Kw/h bajan significativamente, lo que ocasiona que la generación excedente a partir de biomasa se puede almacenar en la tecnología de almacenamiento por aire comprimido. Este sistema consta en almacenar el aire a alta presión con una alta densidad de energía, donde posteriormente es aprovechada para generar electricidad impulsando una turbina de vapor cuando la demanda de la red eléctrica se encuentre en los índices más altos.

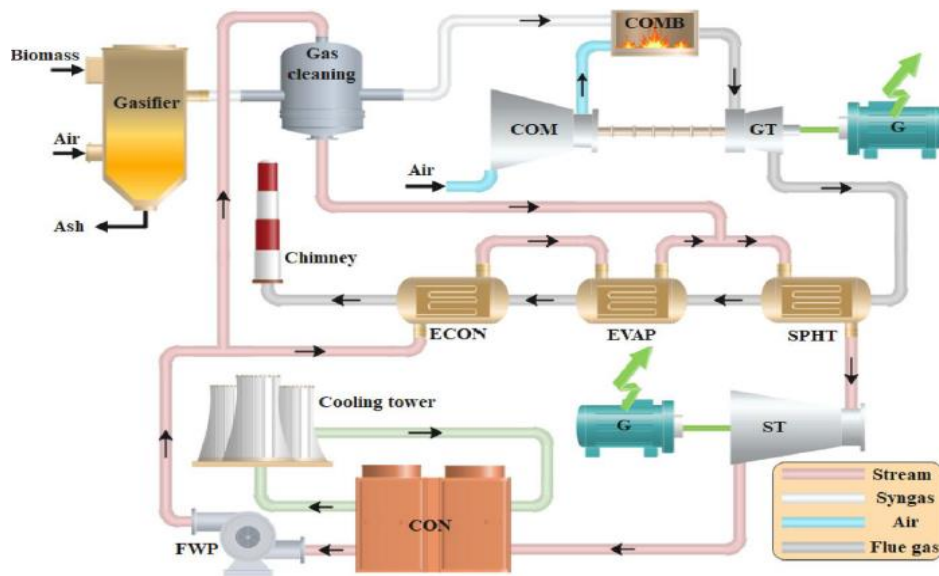
El sistema que se analiza en el estudio es una generación de electricidad de ciclo combinado de gasificación a partir de biomasa tradicional donde su principal funcionamiento es primeramente la gasificación (Vapor), segundo la limpieza de residuos que puedan contener ese gas y por último generar electricidad por medio del gas impulsen las turbinas de un generador de vapor.

Gasificación: Este proceso consta en hacer una reacción a partir de la fuente de biomasa con el aire por medio de un gasificador, provocando la generación de gas, lo que todavía está revuelto con partículas de cenizas y demás residuos.

Limpieza de residuos: Este proceso consta en dejar el gas lo más puro posible quitándole todos los residuos que pueda tener a partir de la reacción anterior, por lo que, por medio de una caldera de calor residual, conectados con subsistemas de limpieza, lo que hacen es disminuir la temperatura del gas extraerle todas las impurezas que este pueda contener, dejando en esta etapa un gas de síntesis limpio.

Generación de energía eléctrica: este proceso consta en hacer una combustión a partir del gas limpio con una fuente de aire comprimido en la cámara de ignición, donde conlleva que el gas eleve circunstancialmente su temperatura y su presión, donde posteriormente es utilizado para que por medio de una turbina impulse el gas hacia un generador de vapor que se encuentra dentro del sistema. Por otro lado, el calor que se escapa en el proceso de generación es reciclado por un generador de vapor donde recupera el calor (vapor) no utilizado en el proceso de generación de electricidad, para que después este calor ayuda a calentar tanto el agua que sale de la bomba que alimenta el sistema y el vapor a alta temperatura, donde se repite el proceso una vez más que por medio de la turbina impulse el gas a alta temperatura hacia el generador de vapor generando electricidad, el vapor que no es aprovechado en el proceso de generación, una vez más se recicla pero para ser almacenado en un condensador enfriándolo. Al enfriar el vapor, hace una transformación de estado gas a líquido (agua), donde esta agua es inyectada al generador de vapor de recuperación de calor para ser calentada, terminando así el proceso. En la ilustración 16 se detalla el proceso de generación de electricidad de referencia (Xue et al., 2022).

Ilustración 16: Esquema del sistema del ciclo combinado de gasificación a partir de biomasa de referencia.



Fuente: (Xue et al., 2022)

Funcionamiento del sistema de ciclo combinado de gasificación a partir de biomasa integrado con la tecnología de almacenamiento.

En la ilustración 17 se muestra la integración del sistema de almacenamiento de aire comprimido en la generación de biomasa donde su funcionamiento radica primeramente en la carga de la unidad de almacenamiento cuando la generación exceda la demanda de la carga. Se utiliza dos intercambiadores de calor, donde su función es enfriar el aire comprimido que se encuentran en el compresor 1 y 2 por medio de la integración del sistema hace que la energía que no se utilice se recicle en estos intercambiadores de calor. El aire que es comprimido en el compresor 1 es enfriado por medio del intercambiador de calor 1, donde el agua en la salida de la bomba del sistema de referencia sirve como refrigerante para el intercambiador de calor. Posteriormente el aire anteriormente enfriado se comprime aún más por el compresor 2, donde el aire libera energía térmica que es aprovechada por el agua que se encuentra en el intercambiador de calor 2. El aire que se encuentra en el intercambiador de calor 2, se envía a un recipiente de almacenamiento de aire a muy bajas temperaturas.

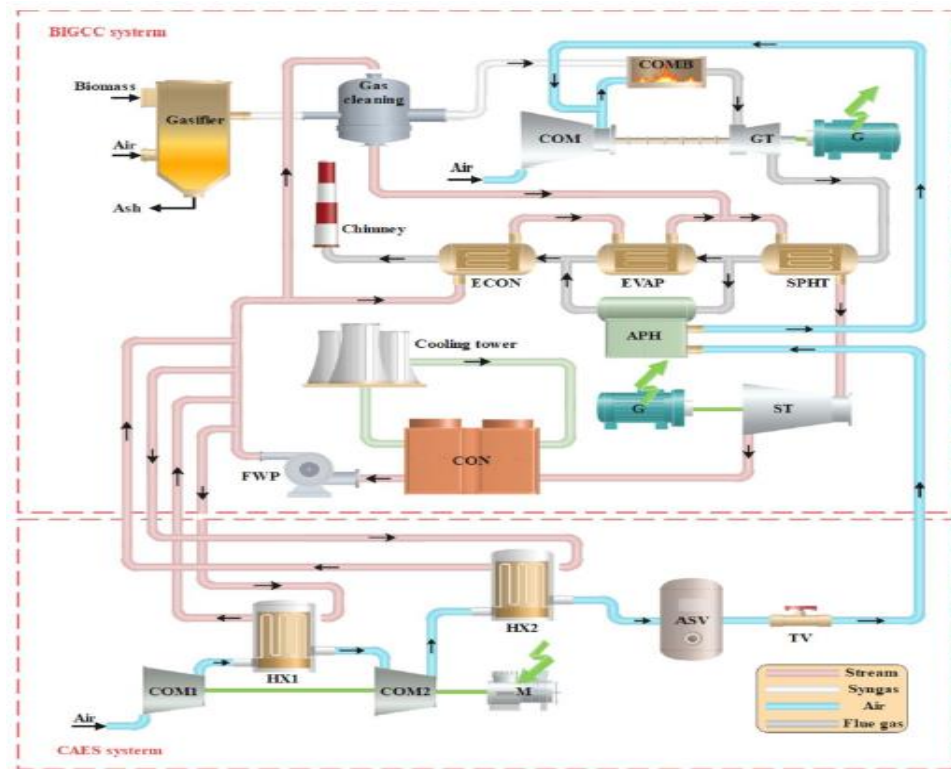
El sistema de compresión transforma la energía del aire comprimido almacenada en un recipiente en energía eléctrica, que por medio de los intercambiadores de calor ayudan a la eficiencia del sistema integrado ya que la energía térmica que emana al comprimir el aire por medio del refrigerante que es agua, ayuda a enfriar a un más el aire, donde resulta en una potencia de salida aún mayor.

En el proceso de descarga se libera la energía que se encuentra dentro del recipiente de aire comprimido, donde la presión que sale de dicho recipiente es controlada mediante una válvula, para equilibrarla con la presión del gas que se encuentra en el compresor de aire del sistema de referencia.

En paralelo al generador de vapor se encuentra un evaporador que aprovecha la energía exegética que se disipa en el sistema de referencia, donde este gas recuperado sirve para calentar el aire que sale de la válvula, para así equilibrar la temperatura del compresor de aire del sistema de referencia con la temperatura que sale de la unidad de almacenamiento. El aire que salen del compresor de

referencia y de la tecnología de almacenamiento llegan a la cámara de ignición por medio de conductos, lo que ayuda a bajar la potencia que generada el compresor del sistema de referencia e incrementa la potencia de salida hacia la red. Con la integración de estos dos sistemas se incrementa la eficiencia en la generación de electricidad, siendo flexible en el aporte de potencia cuando la red eléctrica lo requiera.

Ilustración 17: Esquema del sistema del ciclo combinado de gasificación a partir de biomasa integrado con la tecnología de almacenamiento de energía por aire comprimido.



Fuente: (Xue et al., 2022)

Tabla 8: Definición de los elementos que conforman la generación de biomasa con la unidad de almacenamiento de aire líquido.

Sigla	Definición
COM1	Compresor 1
COM2	Compresor 2
HX1	Intercambiador de calor 1
HX2	Intercambiador de calor 2
M	Motor
ASV	Recipiente de aire comprimido
TV	Válvula mariposa
FWP	Bomba de agua de alimentación
COM	Compresor
ST	Turbina de vapor
G	Generador
APH	Precalentador de aire
ECON	Economizador
EVAP	Evaporador

SPHT	Sobrecalentador
CON	Condensador
COMB	Combustión
GT	Turbina de gas

Fuente: Propia

4.6.2. Metodología utilizada en la simulación

Este estudio se realizó mediante el software EBSILON Professional (Versión 14.01, STEAG Energy Services GmbH), donde fue implementado y posteriormente simulado el sistema del ciclo combinado de gasificación a partir de biomasa y tecnología de almacenamiento de energía por aire comprimido. La particularidad de este software son la universalidad del enfoque y los altos grados de fidelidad. EBSILON Professional tiene variedad de modelos y componentes estandarizados, que tiene la capacidad de emular varios sistemas de generación térmicos, que con la ayuda del software otorga un modelo equilibrado que con un sistema de solución cerrada. Los datos que se utilizaron, se escogieron de acuerdo al balance de energía y balance de masas del sistema (Xue et al., 2022).

Tabla 9: Parámetros del sistema del ciclo combinado de gasificación a partir de biomasa.

ELEMENTO	PARÁMETROS
Gasificación	Materia prima de biomasa: aserrín
	Tipo de gasificador: gasificador de lecho fluidizado
	Relación de equivalencia: 0,27
	Relación de vapor a oxígeno: 2.04
	Eficiencia de conversión del Carbono: 90,47%
	Temperatura del gas de salida: 810 °C
Limpieza de gases	Temperatura de gas de síntesis de salida: 250 C
	Presión de gas de síntesis de salida: 1,54 MPa
	Eficiencia de eliminación de H ₂ S: 99,9 %
Turbina de gas	Relación de presión del compresor de gas: 15,2
	Eficiencia del compresor de gas: eficiencia adiabática 85%
	Turbina de gas temperatura inicial 1237 °C
	Relación de presión de la turbina de gas: 14
	Eficiencia de la turbina de gas: eficiencia adiabática: 86%
Ciclo del ST	Temperatura de los gases de escape: 90,0 °C
	Presión inicial: 10,3 MPa
	Temperatura inicial turbina de vapor: 505 °C
	Presión inicial turbina de vapor: 10,3 MPa
	Eficiencia de la turbina de vapor: eficiencia adiabática 88%
	Presión de condensación: 8 kPa

Fuente: (Xue et al., 2022)

En la tabla 9 se observa que la materia prima que se utilizó para el proceso de gasificación fue el aserrín, donde gasificador de lecho fluidizado (donde su agente gasificador es el aire) y la relación del vapor con respecto al aire es de 2.04. La temperatura en la salida del gasificador es de 810 °C, por último, la eficiencia de conversión del carbón a vapor es del 90,47 %. Al momento de la gasificación el gas sale con ciertas impurezas donde se limpia por medio de la caldera de calor residual, donde la temperatura en la salida de la caldera del vapor es de 250 °C con una presión de salida de 1,54 Mpa. La eficiencia de la caldera de calor residual para la eliminación de impurezas del vapor es del 99,9%. La turbina de gas cuenta con una relación del 15,2 con respecto a la presión de compresión del gas,

donde el compresor tiene una eficiencia del 85 %. El vapor entra a la turbina de gas a una temperatura de 1237 °C, donde su eficiencia en la generación es del 86%. El vapor entra en la turbina de vapor a una temperatura de 505 °C, donde su presión inicial es de 10,3 Mpa, eficiencia de 88%, la presión que le inyecta al condensador es de 8 Kpa. Por otro lado, el vapor que se escapa a la turbina sale a una temperatura de 90 °C.

Tabla 10: Parámetros de la tecnología de almacenamiento de energía por aire comprimido.

ELEMENTO	UNIDAD	VALOR
ASV		
Volumen	m3	1021,29
Temperatura del aire	°C	50
Presión de almacenamiento del aire	MPa	2,85
Presión de liberación del aire	MPa	1,54
Eficiencia isentrópica de COM	%	8,5
Tiempo de carga	Horas	8
Tiempo de descarga	Horas	2

Fuente: (Xue et al., 2022)

Se observa en la tabla 10 que el recipiente de almacenamiento puede contener una densidad de aire comprimido de hasta 1021,29 m3, donde la temperatura ambiente del lugar donde se realiza la simulación es de 50 °C. la presión dentro del recipiente al momento de almacenar el aire comprimido es de 2,85 MPa y al momento de inyectar el aire comprimido al sistema la presión con que sale el aire es de 1,54 MPa. El tiempo de carga de la tecnología de almacenamiento por aire comprimido es de 8 horas y el tiempo que demora la unidad de almacenamiento inyectándole vapor al sistema después de estar completamente cargado es de 2 horas.

Tabla 11: Validación del modelo basado en el sistema del ciclo combinado de gasificación a partir de biomasa.

ELEMENTO	UNIDAD	LITERATURA	SIMULACION	ERROR RELATIVO
Composición	vol%	21,35	21,07	1,31%
H2	vol%	21,89	22,56	3,06%
CO	vol%	17,30	17,55	1,45%
CO2	vol%	5,14	5,03	2,14%
CH4	vol%	32,70	32,21	1,50%
N2	vol%	1,62	1,58	2,47%
C2H2				
Entrada de energía de la biomasa	MW	25,64	25,64	0
Generación de energía	MW	9,94	9,92	-0,16%
turbina de gas	MW	5,26	5,28	0,51%
turbina de vapor	MW	4,68	4,64	-0,92%
Eficiencia general	%	38,77	38,71	-0,16%

Fuente: (Xue et al., 2022)

Lo más interesante de la tabla 11 es que se puede observar que la relación de entrada de energía de biomasa (aserrín) del gasificador con respecto a la generación de energía eléctrica es del 0,387, según los parámetros aportados en la simulación.

Tabla 12: Validación del modelo basado en la tecnología de almacenamiento de energía por aire comprimido.

ELEMENTO	UNIDAD	LITERATURA	SIMULACION	ERROR RELATIVO
Presión máxima del recipiente CAES	MPa	2,85	2,85	0
Temperatura de almacenamiento del aire	°C	50	50	0
Temperatura de enfriamiento intermedia de la compresión de aire	°C	50	50	0
Consumo de energía de COM1	kW/kg	212,14	211,68	-0,22%
Consumo de energía de COM2	kW/kg	233,63	233,33	-0,13%
Tiempo de carga	Horas	8	8	0
Potencia de salida durante la descarga	MW/h	19,85	20,87	1,021
Potencia absorbida por el sistema	MW/h	1,83	---	---
Incremento de potencia de todo el sistema	MW/h	1,62	---	---
Tiempo de descarga	Horas	2	2	0

Fuente: (Xue et al., 2022)

En la tabla 12 se compara los datos propuestos para el sistema respecto a los datos que se obtuvieron con respecto a la simulación. Los valores que varían son los de los compresores 1 y 2 pero con error relativamente bajos. Por otro lado, se detalla la potencia que necesitan los compresores 1 y 2 para comprimir el aire, donde absorben una potencia del motor de 211,68 Kw/Kg y 233,33 Kw/Kg respectivamente. La potencia total que necesita la tecnología de almacenamiento para comprimir el aire a plena carga es de 1,83 Mw, donde puede subir la potencia del sistema del ciclo combinado de biomasa durante la descarga de 9,94 Mw a 19,85 Mw, ya que el sistema demora más tiempo en cargarse que descargándose, donde el incremento de la potencia total en el sistema es de 1,62 MW.

La eficiencia del sistema del ciclo combinado de gasificación a partir de biomasa con la integración de la tecnología de almacenamiento de energía por aire comprimido se obtiene que el sistema tiene un rendimiento de carga y descarga del 88,43%. La densidad en el almacenamiento por aire comprimido es de 5,71 MJ/m³. Con la implementación del sistema de almacenamiento por aire comprimido la potencia de salida tiende a aumentar en 0,08 MW y 0,51 MW. Mejorando la eficiencia del sistema en un 0,35% (Xue et al., 2022).

Este sistema de almacenamiento que se implemento en esta fuente de generación a partir de biomasa a porta en gran medida a la eficiencia de la generación. una particularidad de los sistemas térmicos es que al generar electricidad sus perdidas en el sistema son altas debido a la exergía, lo que resulta en baja eficiencia con respecto a la relación combustión-generación. Al implementar el sistema de generación por medio de aire comprimido estas pérdidas por exergía se ven reducidas ya que este sistema aprovecha la energía de vapor que es desperdiciada, reciclándola por medio de la tecnología de almacenamiento, para posteriormente inyectar al sistema.

Ya que la carga en la tecnología de almacenamiento se produce cuando la demanda de electricidad es baja lo que conlleva a que el precio del Kw/h sea más bajo. Donde posteriormente se inyecta a la red

eléctrica esta energía almacenada, cuando la demanda de la carga aumente, donde los precios del Kw/h suben volviéndose económicamente rentable el sistema.

4.7 Comparación de varios tipos de tecnologías de almacenamiento de energía

Se comparará varios tipos de almacenamiento donde se tendrá en cuenta algunos parámetros.

Los aspectos a tener en cuenta para implementar una tecnología de almacenamiento de energía en fuentes de generación alternativas son:

- Eficiencia: En este aspecto se tiene en cuenta la eficiencia con relación a la energía que utiliza para almacenar energía y la energía que puede entregar cuando el sistema alternativo lo requiera.
- Tiempo de respuesta: se evalúa la respuesta rápida ante la integración de la unidad de almacenamiento para la entrega de energía cuando el sistema lo requiera.
- Flexibilidad: se tiene en cuenta la adaptabilidad e implementación a cualquier zona geográfica ya que las fuentes de generación alternativas en un porcentaje elevado se encuentran en zonas apartadas y que tanto se puede expandir el sistema.
- Tiempo de vida: se evalúa el tiempo que dura el sistema de almacenamiento en operación. Donde más de 20 años se considera un tiempo Alto, de 10-20 años medio y menos de 10 años Bajo.
- Capacidad de almacenamiento: es la capacidad de almacenamiento de energía que tiene cada tecnología, donde con capacidad de Megavatio se considera Alta, Kilovatio Media y menos del Kilovatio Baja.
- Tiempo de carga: Es el tiempo donde se demora la unidad de almacenamiento en cargarse en su totalidad, donde depende estrictamente de la potencia almacenada.

Tabla 13: Varios tipos de almacenamiento

Tecnología de almacenamiento	Eficiencia	Tiempo de respuesta	Flexibilidad	Tiempo de vida	Capacidad de almacenamiento	Tiempo de carga
Almacenamiento por aire comprimido	85%	Rápida	90%	Medio	Alta	Medio
Almacenamiento por gravedad en torre	80%	Media	95%	Alto	Alta	Lento
Almacenamiento por supercondensador	85%	Rápida	90%	Medio	Alta	Medio
Almacenamiento por baterías	75%	Rápida	90%	Medio	Media	Medio
Almacenamiento por transformador	95%	Rápida	90%	Medio	Media	Rápido

de calor por compresión						
Almacenamiento por aire liquido	80%	Rápida	90%	Medio	Media	Medio

Fuente: Propia

De la tabla 13 se saca el siguiente análisis:

- Almacenamiento por aire comprimido: Este sistema de almacenamiento tiene una eficiencia del 85% ya que aporta significativamente a la inyección de potencia con un tiempo de respuesta rápido, teniendo una gran capacidad de almacenamiento alrededor de los Megavatios, donde cuenta con un tiempo de vida de alrededor de 20 años y se puede instalar en cualquier zona que se requiera. El proceso de carga depende de gran medida de la capacidad de almacenamiento y la fuente de generación alternativa que se integre.
- Almacenamiento por gravedad en torre: Este sistema de almacenamiento hasta ahora sea venido colocando el foco sobre él, ya que es una unidad de almacenamiento de energía novedosa, donde según estudio de simulación han dado buenos resultados de eficiencia, teniendo una vida útil por encima de los 20 años, capacidad de almacenamiento de hasta Gigavatio, un tiempo de respuesta oportuno. El tiempo de carga del sistema de almacenamiento por gravedad es lento, ya que su unidad se basa en subir grandes bloques a una altura determinada por medio de cuerdas y poleas.
- Almacenamiento por supercondensador: Es un almacenamiento de energía que se integra de excelente manera con sistemas híbridos fotovoltaicos, donde su capacidad de almacenamiento está en Megavatios, un tiempo de vida útil de hasta 20 años, adaptándose bien ente cualquier geografía, teniendo un tiempo de respuesta rápido y el tiempo de carga depende de su capacidad de almacenamiento.
- Almacenamiento por baterías: El almacenamiento de energía por baterías depende primeramente de la solución química que las compone, en general las baterías funcionan bien en la integración de fuentes de generación convencional con tiempo de respuesta rápidos, carga rápida, se pueden implementar en zonas remotas y cuentan con un tiempo de vida útil menos a 20 años.
- Almacenamiento por transformador de calor por compresión: El funcionamiento de este sistema de almacenamiento radica en el funcionamiento de un transformador elevador, pero con calor, donde su entrada es vapor a bajas temperaturas y su salida vapor a altas temperaturas, lo que lo convierte en un almacenamiento idóneo para integrarlo con fuentes de generación geotérmica a baja temperatura. Donde su vida útil es de menos a 20 años, cuenta con una capacidad de generación alta, se puede adaptar a cualquier geografía, siendo rápido en la transformación de calor.
- Almacenamiento por aire liquido: Este sistema de almacenamiento cuenta con una vida útil alrededor de alrededor de 20 años, donde su carga depende de la capacidad de almacenamiento, se adapta a cualquier geografía y su tiempo de respuesta es rápido.

5. Normativas

Las normativas que regulan las fuentes de generación convencional y alternativas, salvaguardando la calidad de la potencia se rigen por normativas y estándares tanto nacionales como internacionales, ya establecen parámetros y directrices generales dependiendo del nivel de tensión, condiciones y necesidades del sistema.

La calidad de potencia en Colombia es regulada por la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG), la cual, desde su fundación en el año 1993, viene imponiendo parámetros de calidad del servicio en donde los operadores que prestan el servicio del suministro eléctrico, tengan que tener en cuenta estos rangos para estar en operación y no ser penalizados por evadirlos, donde se ven sujetos a estas normativas desde la generación, transmisión y posteriormente comercialización. Esta normativa de regulación colombiana se soporta por las normas internacionales IEEE e IEC. La IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) y la IEC (International Electrotechnical Commission) donde definen los fenómenos de calidad de energía e imponen de igual mantener parámetros internacionales.

En este capítulo se describe algunas normativas referentes a la medida y monitoreo de calidad de potencia eléctrica donde se establecen parámetros, partiendo del marco regulatorio colombiano donde se enfoca en los rangos de operación en la generación con fuentes alternativas y también algunas regulaciones a nivel internacional.

5.1. Normativas nacionales que regulan las fuentes de generación alternativas

La integración de las fuentes de generación alternativas en el marco regulatorio de calidad de potencia se especifica en la resolución 060 del año 2019 de la CREG, donde hace modificaciones a la Resolución 025 del año 1995 y a la Resolución 023 del año 2001 de la CREG donde anteriormente solo fijaban parámetros de calidad de la energía para fuentes de generación convencional. La CREG 025 del año 2019 integra las fuentes de generación alternativa como lo son la Fotovoltaica y Eólica colocando parámetros de operación en especial en los índices de frecuencia.

Se centra en la Resolución **Creg 060-2019** donde modifica algunos numerales de la regulación **Creg 025 de 1995** y la **Creg 023 del 2001** para la integración de plantas de generación alternativas (Térmicas, fotovoltaicas y eólicas) (CREG, 2019).

5.1.1. Resolución 060-2019 Artículo 1. Se modifica en inciso 13.1 (“Servicios que los Generadores deben proveer”) de la Resolución Creg 025 de 1995. Donde el inciso 13.1 de la resolución Creg 025 de 1995 queda de la siguiente manera (CREG, 2019):

En el artículo 1 de la resolución 060-2019 resalta los índices a tener en cuenta de los generadores:

- Control de la tensión.
- Control de la potencia.
- Control de la frecuencia, mediante el control en la velocidad del generador (Manteniéndose en índices constantes, para así no afectar el equilibrio del sistema eléctrico).
- Control rápido (Casi instantáneo) en la frecuencia secundaria, regulando la velocidad del generado.

Las fuentes de generación alternativas como la fotovoltaica y eólica están sujetos a cumplir los anteriores índices excepto con el Control de la frecuencia, mediante el control en la velocidad del generador y el control de la potencia ante variaciones. Donde se incluyen otros parámetros como lo son:

- Ante la aparición de corriente reactiva en el sistema se debe proporcionar control mediante la inyección activa.
- Para variaciones en la frecuencia se debe proporcionar una respuesta de control de potencia activa/frecuencia.
- En la generación eólica se debe proporcionar respuesta activa ante variaciones de frecuencia

5.1.2. Creg 060-2019 Artículo 8. Se modifica en inciso 2.1 (“planeamiento operativo energético”) de la Resolución Creg 025 de 1995. Donde el inciso 2.1 de la resolución Creg 025 de 1995 queda de la siguiente manera (CREG, 2019):

En el artículo 8 de la resolución 060-2019 se modifica el numeral 2.1 de la resolución 025-1995 se integran las fuentes de generación Fotovoltaica, Eólica térmica e hidráulica en el plan operativo energético para la producción de energía eléctrica. Donde se especifica los rangos de operación.

5.1.3. Creg 060-2019 Artículo 11. Se modifica en inciso 2.2.5 (“ajustes de los relés de frecuencia de las unidades de generación del Sistema integrado nacional”) de la Resolución Creg 025 de 1995. Donde el inciso 2.2.5 de la resolución Creg 025 de 1995 queda de la siguiente manera (CREG, 2019):

En el artículo 11 de la resolución 060-2019 se modifica el numeral 2.2.5 de la resolución 025-1995, donde se detalla los rangos de operación de la frecuencia de los distintos sistemas de generación. Especifica los tiempos de operación según en los niveles de frecuencia en que se encuentren controlados por relés.

Fuente de generación térmicas

Tabla 14: Tiempo de respuesta de los relés ante variaciones de frecuencia en generaciones térmicas

Niveles de Frecuencia	Tiempo de respuesta del relé
$f < 57,5 \text{ Hz}$	$t = 48$ segundos
$f = 58,5$	$t = 30$ Min

Fuente: Propia

Nota: Las unidades térmicas pueden trabajar con frecuencias de 58.5 Hz con un tiempo de hasta 30 minutos.

Por otro lado, en el numeral "2.2.4 Desconexión Automática de Carga por Baja Frecuencia" establecen parámetros de desconexión ante variaciones en la frecuencia en los generadores. Los siguientes rangos de operación son:

Tabla 15: Desconexión Automática de Carga por Baja Frecuencia

Niveles de Frecuencia	Tiempo de respuesta del relé
$f \geq 57,5 \text{ Hz}$	No debe haber disparo instantáneo
$f \geq 57,5 \text{ Hz y } f \leq 58,5 \text{ Hz}$	$t = 15$ segundos
$f \geq 58.5 \text{ Hz y } f \leq 62 \text{ Hz}$	No hay disparos
$f > 62 \text{ Hz y } f < 63 \text{ Hz}$	$t = 15$ segundos
$f > 63 \text{ Hz}$	disparo instantáneo

Fuente: Propia

En la generación con plantas de generación Fotovoltaicas y eólicas que se encuentran conectadas al sistema de transmisión regional o nacional cuentan con un rango de operación normal de frecuencia

entre $f \geq 57,5$ y $f \leq 63$ Hz donde se le dan márgenes de operación más amplios con respecto a fuentes de generación convencional.

5.1.4. Creg 060-2019 Artículo 12. Donde se modifica el Artículo 4 de la Resolución CREG 023 de 2001.

El Artículo 12 de la Resolución CREG 060 de 2019, el cual adicionó algunas disposiciones contenidas en la Resolución CREG 023 de 2001, queda de la siguiente manera:

5.1.4.1. Creg 060-2019 Artículo 4. Reserva rodante, banda muerta y estatismo de plantas despachadas centralmente y características adicionales para el control de frecuencia/potencia de plantas solares fotovoltaicas y eólicas (CREG, 2019).

Toda planta de generación debe estar en capacidad de dar compensación equivalente al 3% a la frecuencia primaria según su generación horaria programada.

Las plantas generadoras deberán tener una Banda Muerta de respuesta a los cambios de frecuencia menor o igual a 30 mHz.

El control de potencia activa/frecuencia de las plantas de generación eólicas y fotovoltaicas, conectadas al Sistema de transmisión nacional y regional, debe cumplir con los siguientes requisitos:

- Estabilidad: Las señales de control deben ser amortiguadas en el tiempo ante señales de entrada escalón, para todos los modos y condiciones operativas.
- El rango del estatismo debe estar entre el 2-6%. Siendo la capacidad de la potencia que tiene la planta de generación alternativa en dar soporte a la frecuencia
- El rango de la banda muerta debe ser configurable entre 0-120mHz. Al comienzo debe tener una banda muerta de respuesta a variaciones de $f \leq 30$ mHz.

Parágrafo 1. las plantas de generación fotovoltaica y eólica deben estar en capacidad de dar respuesta rápida a eventos de sobrefrecuencia y subfrecuencia en la frecuencia primaria y hacer pruebas de las mismas antes de entrar al sistema transmisión nacional según lo establece el numeral 7.7 del Código de Operación.

Parágrafo 2. Parcialmente las plantas de generación fotovoltaica y eólica se excluyen de la obligatoriedad de dar respuesta rápida a eventos de subfrecuencia hasta que la Creg lo decida.

5.1.5. Creg 060-2019 Artículo 13. Adiciona al inciso 5.6.3 (“respuesta rápida en frecuencia para plantas eólicas”) de la Resolución Creg 025 de 1995. Donde el inciso 2.2.5 de la resolución Creg 025 de 1995 queda de la siguiente manera (CREG, 2019):

En este artículo detalla la respuesta de control rápida que debe tener una planta de generación eólica ante la variación de la frecuencia.

5.6.3 Respuesta rápida en frecuencia para plantas eólicas

Las plantas de generación eólica conectadas al STN y STR, deben dar respuesta rápida de frecuencia a través de su potencia de salida, cumpliendo con los siguientes parámetros:

- $f \leq 59,85$ Hz El control de frecuencia rápida debe activarse, aumentando la potencia nominal de generación en 12 % por cada Hertz de variación. Si la frecuencia entra en el valor definido por la banda muerta de control frecuencia/potencia este aporte de potencia debe ser retirado

automáticamente. Si con el aporte de potencia después de 6Seg la frecuencia no vuelve a su valor nominal se retirará el aporte adicional de potencia activa

- El aporte de potencia adicional debe ser menor al 10% de la potencia nominal generada.
- Con $f > 60,15$ Hz o $f \leq 59,17$ Hz, el generador eólico debe compensar potencia en $t \leq 2$ segundos. A partir de que se active el control de frecuencia rápida
- La potencia máxima que requiere la red eléctrica no debe sobrepasar los 4 segundos.
- Para la respuesta rápida ante variación de la frecuencia el generador eólico debe estar trabajando por lo menos al 25% de su capacidad nominal.

5.1.6. Creg 060-2019 Artículo 14. Se modifica en inciso 5.7 (“Control de tensión”) de la Resolución Creg 025 de 1995. Donde el inciso 5.7 de la resolución Creg 025 de 1995, modificado en el artículo 1 de la resolución 135 del 2013 queda de la siguiente manera (CREG, 2019):

5.7 Control de voltaje

Las fuentes de generación eólicas y fotovoltaicas, conectadas al Sistema de transmisión nacional y regional deberán cumplir los siguientes parámetros:

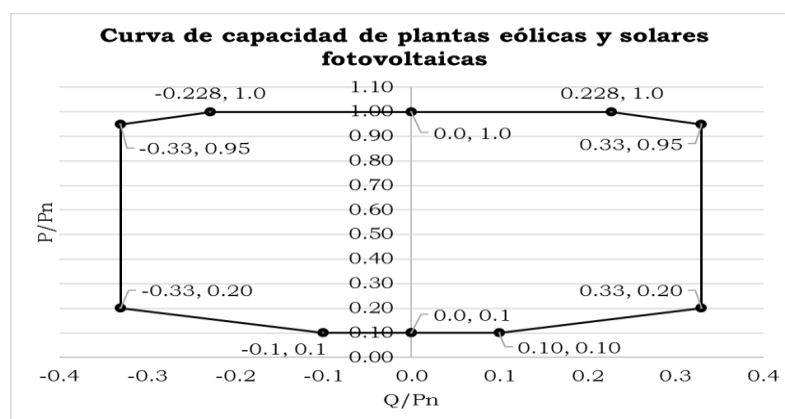
A: Estar en la capacidad de controlar la tensión de forma continua por medio de la inyección o absorción de potencia de la red eléctrica, donde se debe tener en cuenta la curva de carga ya fijadas y por las regulaciones de operación declaradas por el centro nacional de despacho, cumpliendo con los siguientes requisitos:

Para la regulación de tensión se deberá tener repuesta de control en tres aspectos que son la potencia reactiva(Q), factor de potencia (F.P) y el voltaje (V).

- Para ofrecer la regulación en la tensión el generador deberá contar con un estatismo configurable.
- Para el voltaje y la potencia reactiva, el control debe ser configurable, para mantener el sistema eléctrico equilibrado.
- Ante algún cambio en lazo abierto tipo escalón en la consigna de tensión, potencia reactiva o factor de potencia, teniendo un tiempo de respuesta inicial menor a 2 Segundos y un tiempo de establecimiento menor a 10 Segundos ante la potencia reactiva de la planta.

Para operaciones normales de las plantas de generación eólica y fotovoltaica se deben tener en cuenta los siguientes valores de tensión en el punto de conexión común.

Ilustración 18: Curva de capacidad de plantas eólicas y fotovoltaicas



Fuente: (CREG, 2019)

Donde: P: Potencia activa

Q: Potencia reactiva

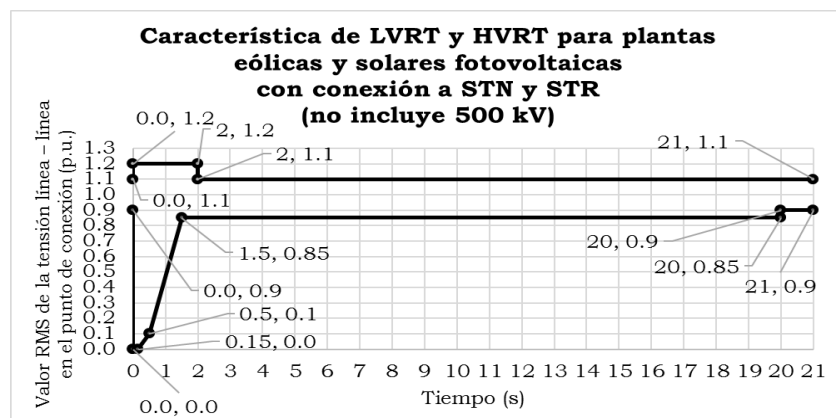
Pn: potencia nominal

- Si la planta de generación eólica o fotovoltaica está operando con menos del 90% de su capacidad nominal, no es necesario inyectar o absorber potencia reactiva a la red para el control de tensión. Sin embargo, la planta de generación eólica o fotovoltaica no deberá absorber o inyectar más del 5% de potencia reactiva al sistema eléctrico, con respecto a la capacidad nominal de la planta ($5\% Q/P_n$).

C: Cuando aparecen fallas simétricas o asimétricas se debe operar dentro los límites establecidos por las curvas de huecos de tensión (LVRT) y sobretensiones (HVRT) para plantas de generación eólicas y fotovoltaicas.

La característica de Huecos de tensión y Sobretensiones de plantas de generación eólicas y fotovoltaicas conectadas al sistema de transmisión nacional y regional (STN y STR), se observa en la siguiente ilustración:

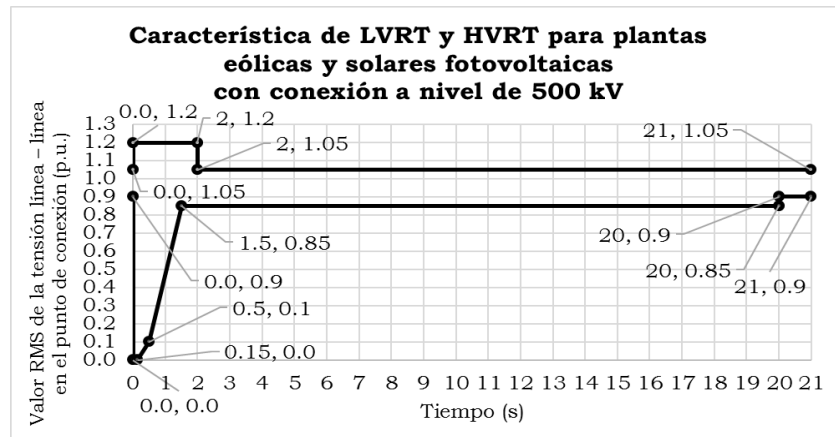
Ilustración 19: Característica de subtensiones y sobretensiones, en plantas de generación eólicas y fotovoltaicas (No incluye 500kv).



Fuente: (CREG, 2019)

La característica de Subtensiones y Sobretensiones en generadores no síncronos en fuentes de generación eólicos y fotovoltaicos conectadas a la red eléctrica de alta tensión (500 kV), se observa en la siguiente ilustración:

Ilustración 20: Característica de subtensiones y sobretensiones, en plantas de generación eólicas y fotovoltaicas con nivel de tensión de 5000 Kv.



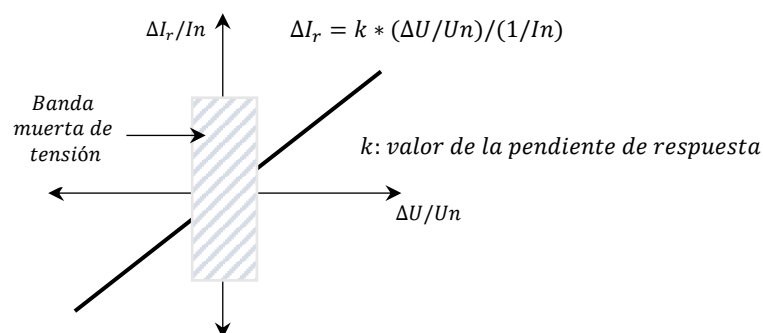
Fuente: (CREG, 2019)

Las plantas de generación eólica y fotovoltaica además deben estar en capacidad de superar subtensiones continuas así:

- planta de generación eólica: si la energía que disipa durante las subtensiones es menor a la potencia nominal generada durante 2 Segundos, contabilizada en una ventana móvil de 30 minutos.
- planta de generación eólica y fotovoltaica: deben estar en la capacidad de soportar subtensiones por tiempos de 3 segundos por cada evento de subtensión.
- Al momento que la tensión de línea-línea supera los 0.85 p. u, se considera que la depresión en la tensión ha sido superada. Al momento de mitigar ese fenómeno de depresión la potencia activa de las plantas generadores debe volver al 90 % de la capacidad que estaba inyectando a la red antes del evento de calidad de energía en un tiempo menor a 1 segundo.
- La corriente reactiva en el sistema debe ser prioridad en que alcance el 90% de delta en un tiempo menor de 50 ms con una tolerancia del 20%, ante eventos de calidad de la energía como depresiones de tensión y sobretensiones el $t = 50$ ms es el tiempo máximo que tiene el control para detectar la falla.

A continuación, se observa el delta de la corriente reactiva (ΔI_r), en el punto de conexión común, donde se puede calcular de la siguiente manera:

Ilustración 21: Delta de la corriente reactiva (ΔI_r),



Fuente: (CREG, 2019)

Para el análisis en la variación del delta en la corriente reactiva se tienen en cuenta los siguientes parámetros:

ΔI_r es el valor de la siguiente relación:

$$\Delta I_r = \frac{k * (\Delta U / U_n)}{(1 / I_n)}$$

Donde:

ΔI_r : Variación de corriente reactiva con respecto a la anterior

I_n : Corriente nominal

ΔU : Variación de tensión con respecto a la anterior.

U_n : Tensión nominal

K : Constante en la pendiente de respuesta. Se puede ajustar esta constante entre 0-10

- La inyección de potencia reactiva al sistema es limitada en su totalidad por la corriente del generador.
- El valor de la constante (K), lo determina el sistema de generación alternativo (Eólico o Fotovoltaico) que se va utilizar para el inversor, para así compararlo y que cumpla con el valor de k definido por el centro nacional de despacho en el punto de conexión común de la red. Donde los rangos de k son de 0-10 para el inversor y la potencia máxima del generador.
- Para el control de la tensión ante fluctuaciones, se debe contar con un almacenamiento de potencia reactiva para poder inyectar a la red.
- Al momento de que la tensión entra en el estado de banda muerta se debe inyectar potencia durante un tiempo mínimo de 500ms, manteniendo este aporte hasta que alcance un valor de (1 p.u), dándole equilibrio al sistema frente a este fenómeno de calidad de energía (CREG, 2019).

5.1.7. Creg 060-2019 Artículo 15. Se modifica en inciso 5.8 (“rampa operativa para arranque y parada”) de la Resolución Creg 025 de 1995. Donde el inciso 5.8 de la resolución Creg 025 de 1995, queda de la siguiente manera (CREG, 2019):

5.8 Rampa operativa para arranque y parada

Las fuentes de generación eólicas y fotovoltaicas, conectadas al sistema de transmisión nacional y al sistema de transmisión regional, deben tener una rampa de operación ajustable para el arranque y la parada del generador. Definiéndose una rampa inicial del 14 %, con respecto a la potencia nominal del generador alternativo (MW/min), donde se tiene en cuenta lo siguiente:

- Para hacer el arranque y la parada del generador, se debe contar con la disponibilidad de la fuente de generación.
- La persona líder del proyecto de generación debe hacer saber los límites de la rampa de la planta. Donde este valor debe ser configurable ya que depende de las condiciones del sistema
- Inicialmente se debe contar con un 14 % de la rampa máxima declarada

5.2. Normativas internacionales que regulan las fuentes de generación alternativas

Frente a las normativas internacionales que regulan los servicios de calidad de potencia en fuentes alternativas. Se enfoca en países europeos, países de centro América y Suramérica para observar los parámetros que utilizan las normas regulatorias de cada uno de estos países en la implantación e integración de una planta de generación eólica o fotovoltaica a la red eléctrica.

5.2.1. Norma: Transmission Code 2007. País: Alemania

Normativa que regula plantas de generación renovable del país de Alemania.

Tabla 16: Parámetros de operación de fuente de generación alternativa del país de Alemania.

parámetros	Rangos permitidos
- Rangos de frecuencia: $47,5\text{Hz} \leq f \leq 51,5\text{Hz}$ $f < 47,5\text{Hz}$ $f > 51,5\text{Hz}$	- Rangos permitidos de operación sin desconexión automática. - Desconexión automática. - Desconexión automática
Rangos de control de Potencia reactiva	F.P. de 0.95 inductivo y capacitivo.

Fuente: (PHC Servicios Integrados Group SAS, 2015)

5.2.2. Norma: ANEXO 40. País: Argentina.

Normativa de regulación del país de Argentina donde regulan la generación de energía en plantas eólicas

Tabla 17: Parámetros de operación de fuente de generación eólica del país de Argentina.

parámetros	Rangos permitidos
- Rangos de frecuencia: $49\text{Hz} \leq f \leq 50\text{Hz}$. $48,5\text{Hz} \leq f \leq 49\text{Hz}$ y $51\text{Hz} \leq f \leq 51,5\text{Hz}$. $48\text{Hz} \leq f \leq 48,5\text{Hz}$ y $51,5\text{Hz} \leq f \leq 52\text{Hz}$. $47,5\text{Hz} \leq f \leq 48\text{Hz}$ y $52\text{Hz} \leq f \leq 52,5\text{Hz}$. $f < 47,5\text{Hz}$. $f > 52,5\text{Hz}$	- Rangos permitidos de operación sin desconexión automática. - Activación de los relés de desconexión $t=100$ segundos. - Activación de los relés de desconexión $t=25$ segundos. - Activación de los relés de desconexión $t=15$ segundos. - Desconexión automática - Desconexión automática
Rangos de control de Potencia reactiva	F.P. de 0.95 inductivo y capacitivo.
Rangos de control de Tensión	$1\% V > 132\text{ kV}$ y $V \leq 500\text{ kV}$. $2\% V \leq 132\text{ kV}$ y $V > 35\text{ kV}$. $3\% V \leq 35\text{ kV}$.
Rangos de Tensión de Operación en Falla	En el caso de un corto circuito el control en la tensión debe analizar la falla por medio del gradiente de tensión antes de 10 milisegundos con una sobretensión del 50%. En donde el generador esté operando con su potencia nominal al 100% y factor de potencia unitario.

Fuente: (PHC Servicios Integrados Group SAS, 2015)

5.2.3. Norma: Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio. País: Chile

La normativa del país de Chile ofrece rangos de operación para fuente de generación como lo son:

Tabla 18: Parámetros de operación de fuente de generación eólica en el país de Chile.

parámetros	Rangos permitidos
- Rangos de frecuencia: $49\text{Hz} \leq f \leq 50\text{Hz}$ y $50\text{Hz} \leq f \leq 51\text{Hz}$. $48\text{Hz} \leq f \leq 49\text{Hz}$ y $51\text{Hz} \leq f \leq 51,5\text{Hz}$. $47,5\text{Hz} \leq f \leq 48\text{Hz}$. $47\text{Hz} \leq f \leq 47,5\text{Hz}$. $f > 51,5\text{Hz}$.	- Rangos permitidos de operación sin desconexión automática. - Activación de los relés de desconexión $t=90$ segundos. - Activación de los relés de desconexión $t=15$ segundos. - Desconexión automática opcional. - Desconexión automática.
Rangos de control de Potencia reactiva	F.P. de 0.95 inductivo y capacitivo.
Rangos de control de Tensión	Se realiza el control mediante la inyección de potencia reactiva.

Fuente: (PHC Servicios Integrados Group SAS, 2015)

5.2.5. Real Decreto 413/2014. País: España

Este decreto regula la generación en generadores alternativos donde postula parámetros de operación para mantener la estabilidad del sistema eléctrico.

Tabla 19: Parámetros de operación en fuentes de generación en el país de España.

parámetros	Rangos permitidos
- Rangos de frecuencia: Para las plantas que generen potencia menor a 10 MW se tienen en cuenta los siguientes rangos de operación: $f = 50\text{Hz}$ y $f < 51\text{ Hz}$ $f = 51\text{ Hz}$ $f > 51\text{ Hz}$	- Rangos permitidos de operación sin desconexión automática. - Activación de los relés de desconexión $t=200$ milisegundos. - Desconexión automática.
Rangos de control de Tensión.	Se establecen valores mínimos obligatorios para generadores en barras de central a tensión nominal del sistema eléctrico de transporte que son: F. $p = 0.989$ en atraso o adelanto (Con generación de potencia reactiva del 15% respecto a la potencia activa nominal máxima).

Fuente: (PHC Servicios Integrados Group SAS, 2015)

5.2.6. Norma: 661-A de 2005. País: Estados Unidos

Normativa que regula la operación en la generación alternativa.

Tabla 20: Parámetros de operación en fuentes de generación en el país de EEUU.

parámetros	Rangos permitidos
- Rangos de frecuencia: 1. $59,4\text{Hz} \geq f \leq 60,6\text{Hz}$. 2. $f \leq 59,4\text{Hz}$ y $f \geq 60,6\text{Hz}$. 3. $f \leq 58,4\text{Hz}$ y $f \geq 61,6\text{Hz}$. 4. $f \leq 57,8\text{Hz}$ y $f \geq 61,6\text{Hz}$. 5. $f \leq 57,3\text{Hz}$ y $f \geq 61,6\text{Hz}$. 6. $f \leq 57\text{Hz}$. 7. $f > 61,7\text{Hz}$.	1. Rangos permitidos de operación sin desconexión automática. 2. Activación de los relés de desconexión $t=3$ minutos. 3. Activación de los relés de desconexión $t=30$ segundos. 4. Activación de los relés de desconexión $t=7,5$ segundos. 5. Activación de los relés de desconexión $t=45$ ciclos. 6. Desconexión automática. 7. Desconexión automática.
Rangos de control de Potencia reactiva.	F.P de 0.95 inductivo y capacitivo

Fuente: (PHC Servicios Integrados Group SAS, 2015)

5.2.7. Núm. RES/119/2012. País: México

La normativa regulatoria se expide de la comisión reguladora de energía donde se detallan los límites de interconexión del sistema eléctrico nacional para generadores que integren fuentes de generación renovable o cogeneración.

Esta resolución detalla los requerimientos para los diferentes niveles de tensión (baja, media y alta tensión).

Tabla 21: Parámetros de operación en fuentes de generación en el país de México.

parámetros	Rangos permitidos
- Rangos de frecuencia: 1. $57,5\text{Hz} \leq f \leq 62\text{Hz}$. 2. $f < 57,5\text{Hz}$. 3. $f > 62\text{Hz}$.	1. Rangos permitidos de operación sin desconexión automática. 2. Desconexión automática. 3. Desconexión automática.
Rangos de control de Potencia reactiva.	F. P= 0.95 capacitivo o inductivo.
Rangos de control de Tensión.	- El rango de la desviación debe estar dentro del 5% de la tensión nominal máximo un 10% en condición de falla o emergencia. - Para plantas de generación eólica se debe limitar los cambios de tensión repentinos por fuera del rango del 5 % en la tensión nominal y que no sobrepasen los 4 eventos por día.

Fuente: (PHC Servicios Integrados Group SAS, 2015)

5.2.8. Norma: (Nacional Grid Electricity Transmission, 2015). País: Reino Unido

Normativa regulatoria aplicable a todos los generadores que se conecten a la red nacional incluidos las fuentes alternativas.

Tabla 22: Parámetros de operación en fuentes de generación en el país de Reino unido.

Parámetros	Rangos permitidos
- Rangos de frecuencia: 1. $49\text{Hz} \leq f \leq 51\text{Hz}$. 2. $51\text{Hz} \leq f \leq 51,5\text{Hz}$. 3. $47,5\text{Hz} \leq f \leq 49\text{Hz}$. 4. $51,5\text{Hz} \leq f \leq 52\text{Hz}$ 5. $47 \leq f < 47,5\text{Hz}$	1. Rangos permitidos de operación sin desconexión automática. 2. Activación de los relés de desconexión $t=90$ minutos. 3. Activación de los relés de desconexión $t=90$ minutos. 4. Activación de los relés de desconexión $t=15$ minutos. 5. Activación de los relés de desconexión $t= 20$ segundos.
Rangos de control de Potencia reactiva.	Para la generación a partir de fuentes eólicas no se debe inyectar potencia eléctrica a la red en el punto de conexión común. En estado estacionario a la generación eólica se le permite un rango del 5 % para la inyección y absorción de potencia reactiva con respecto a su potencia nominal.

Fuente: (PHC Servicios Integrados Group SAS, 2015)

5.2.9. Norma: Acuerdo operativo para generadores conectados a instalaciones de transmisión en at. País: Uruguay

La normativa del país de Uruguay no tiene una regulación para cada uno de los diferentes tipos de generadores que se puedan conectar al sistema eléctrico. Solo hace diferencia en aspectos como información técnica de modelos y servicio de despacho, consideran las particularidades propias de las plantas eólicas.

Tabla 23: Parámetros de operación en fuentes de generación en el país de Uruguay

Parámetros	Rangos permitidos
- Rangos de frecuencia: 1. $49\text{Hz} \leq f \leq 51\text{Hz}$. 2. $48\text{Hz} \leq f \leq 49\text{Hz}$. 3. $47\text{Hz} \leq f \leq 48\text{Hz}$. 4. $f > 52\text{Hz}$ 5. $51 \leq f \leq 52\text{Hz}$ 6. $f < 47\text{ Hz}$	1. Rangos permitidos de operación sin desconexión automática. 2. Activación de los relés de desconexión $t=10$ segundos. 3. Activación de los relés de desconexión $t=5$ segundos. 4. Desconexión automática. 5. Activación de los relés de desconexión $t= 3$ segundos. 6. Desconexión automática.

Fuente: (PHC Servicios Integrados Group SAS, 2015)

6. Conclusiones

- El sistema de generación alternativo ha traído consigo desafíos para entregar de forma óptima un buen servicio en el suministro eléctrico, en lo que concierne a la generación. Ya que son sistemas con poca o nula inercia, lo que conlleva a la desviación de la frecuencia, variaciones de la potencia y tensión lo que trae consigo diferentes fenómenos de la calidad de la energía, donde estos fenómenos son causados por condiciones meteorológicas, zona geográfica, condiciones externas, más los que se pueden presentar o se han venido presentando en generación convencional. Por esta razón se han venido buscando técnicas en soluciones tecnológicas en los últimos años que mitiguen los fenómenos que se pueden presentar en la generación alternativa dando eficiencia, confiabilidad y flexibilidad a la generación haciéndola cada vez más independiente.
- Las investigaciones recientes se han enfocado en generar soluciones 100% con energías limpias pero se ha observado que es difícil y poco viable generar electricidad solo con fuentes de generación alternativa por lo que las fuentes que impulsan los generadores ya sea fotovoltaicos, eólicos, mareomotriz, entre otros, depende de una fuente de energía que no es controlable y es muy variable en el tiempo, por esta razón se han venido enfocando en sistemas de almacenamiento que puedan contener la mayor energía posible para solventar la escasez de la misma cuando la demanda crezca y la generación baje. Es así que se han venido estudiando diferentes tipos de almacenamientos que puedan ser más eficientes.
- Aunque algunos de los anteriores sistemas de almacenamiento hasta ahora se han venido estudiando para ver qué tan eficientes pueden ser y así poder dar un soporte eficaz al suministro eléctrico, han dado buenos resultados en los diferentes casos de estudios en respuesta ante desviaciones de la frecuencia por lo que se ha venido implementando en algunos países, dando buenas expectativas para generar electricidad e integrándolos con otras fuentes a partir de generación alternativa.
- Las normativas de regulación de energía eléctrica tanto nacional como internacional han venido integrando en los últimos años estas fuentes de generación alternativas, dándoles rangos o márgenes de desviaciones un poco más amplios de operación con respecto a las convencionales para que así se integren de una forma segura, flexible y confiable al sistema de transmisión nacional de cada país para que los tiempos de respuesta ante desviaciones de frecuencia, tensión o potencia puedan ser solventados por los sistemas de almacenamiento.

7. Referencias

- CREG. (2019). Resolución No. 060 de 2019. Conexión y operación de plantas solares fotovoltaicas y eólicas en el SIN.
- Ding, Z., Wu, W., Huang, S. M., Huang, H., Bai, Y., & He, Z. (2023). A novel compression-assisted energy storage heat transformer for low-grade renewable energy utilization. *Energy*, 263(PA), 125681. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125681>
- Fituri, A., Aly, H. H., & El-Hawary, M. E. (2020). Unsteady surface wave influence on tidal current power forecasting. *Ocean Engineering*, 218(June), 108231. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108231>
- Garcia Novo, P., & Kyojuka, Y. (2021). Tidal stream energy as a potential continuous power producer: A case study for West Japan. *Energy Conversion and Management*, 245(August), 114533. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114533>
- Ghaedi, A., & Gorginpour, H. (2021). Generated power enhancement of the barrage type tidal power plants. *Ocean Engineering*, 226(June 2020). <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.108787>
- Hachana, O., Meghni, B., Benamor, A., & Toumi, I. (2022). Efficient PMSG wind turbine with energy storage system control based shuffled complex evolution optimizer. *ISA Transactions*, xxxx. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2022.05.014>
- Jo, H. H., Kang, Y., Yang, S., Kim, Y. U., Yun, B. Y., Chang, J. D., & Kim, S. (2022). Application and evaluation of phase change materials for improving photovoltaic power generation efficiency and roof overheating reduction. *Renewable Energy*, 195, 1412–1425. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.06.119>
- Jónsdóttir, G. M., & Milano, F. (2020). Stochastic Modeling of Tidal Generation for Transient Stability Analysis: A Case Study based on the All-Island Irish Transmission System. *Electric Power Systems Research*, 189(August), 106673. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106673>
- Khanmohammadi, S., & Musharavati, F. (2021). Multi-generation energy system based on geothermal source to produce power, cooling, heating, and fresh water: Exergoeconomic analysis and optimum selection by LINMAP method. *Applied Thermal Engineering*, 195(April), 117127. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117127>
- Kheshti, M., Zhao, X., Liang, T., Nie, B., Ding, Y., & Greaves, D. (2022). Liquid air energy storage for ancillary services in an integrated hybrid renewable system. *Renewable Energy*, 199(August), 298–307. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.09.010>
- Mosa, M. A., Yousef, M. Y., El Masry, S. M., Abdel Ghany, A. M., & Ali, A. A. (2022). Frequency support of AC microgrid with high penetration of photovoltaic using super-capacitor. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 53(PA), 102364. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102364>
- O'Neill, S. (2022). Weights-Based Gravity Energy Storage Looks to Scale Up. *Engineering*, 14, 3–6. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2022.05.007>
- Paper, C., Basim, A., Tun, U., & Onn, H. (2020). *The aspect of power quality in a wind generation : Overview* The aspect of power quality in a wind generation : Overview. May. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1530/1/012104>
- PHC Servicios Integrados Group SAS. (2015). *Referenciamiento Internacional sobre Requisitos Técnicos de Generación Eólica a gran escala*.
- Pinzón-Quintero, O., Gaviria-Ospina, D., Parrado-Duque, A., Rodríguez-Velásquez, R., & Osma-Pinto, G. (2022). Assessment of power quality parameters and indicators at the point of common

- coupling in a low voltage power grid with photovoltaic generation emulated. *Electric Power Systems Research*, 203(November 2021). <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107679>
- Santos, L., Dahi Taleghani, A., & Elsworth, D. (2022). Repurposing abandoned wells for geothermal energy: Current status and future prospects. *Renewable Energy*, 194, 1288–1302. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.05.138>
- Syahputra, R., Purwanto, K., & Soesanti, I. (2022). Performance investigation of standalone wind power system equipped with sinusoidal PWM power inverter for household consumer in rural areas of Indonesia. *Energy Reports*, 8, 4553–4569. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.03.145>
- Tong, W., Lu, Z., Sun, J., Zhao, G., Han, M., & Xu, J. (2022). Solid gravity energy storage technology: Classification and comparison. *Energy Reports*, 8, 926–934. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.10.286>
- Visser, L. R., Schuurmans, E. M. B., AlSkaif, T. A., Fidler, H. A., van Voorden, A. M., & van Sark, W. G. J. H. M. (2022). Regulation strategies for mitigating voltage fluctuations induced by photovoltaic solar systems in an urban low voltage grid. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 137(December 2020), 107695. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107695>
- Wang, W., Yuan, B., Sun, Q., & Wennersten, R. (2022). Application of energy storage in integrated energy systems — A solution to fluctuation and uncertainty of renewable energy. *Journal of Energy Storage*, 52(PA), 104812. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104812>
- Wang, Y., Zhu, L., He, Y., Yu, J., Zhang, C., & Jin, S. (2022). High-efficient and carbon-free biomass power generation hybrid system consisting of chemical looping air separation and semi-closed supercritical CO₂ cycle with a bottoming organic Rankine cycle. *Fuel Processing Technology*, 236(May), 107393. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2022.107393>
- Xue, X., Li, J., Liu, J., Wu, Y., Chen, H., Xu, G., & Liu, T. (2022). Performance evaluation of a conceptual compressed air energy storage system coupled with a biomass integrated gasification combined cycle. *Energy*, 247, 123442. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123442>
- Zia, M. F., Nasir, M., Elbouchikhi, E., Benbouzid, M., Vasquez, J. C., & Guerrero, J. M. (2022). Energy management system for a hybrid PV-Wind-Tidal-Battery-based islanded DC microgrid: Modeling and experimental validation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 159(January), 112093. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112093>