



Abstract

Electrical systems currently face a new technical and operational paradigm, subject to the development, positioning, and maturity of different renewable energy sources under conditions of access to energy and their efficient consumption. Electrical systems are the largest engineering structures in energy systems. Therefore, they are affected and vulnerable to being affected by different contingencies and disturbances that can cause the power supply to be suspended. The studies and management associated with the safety and reliability actions of the electrical systems have been carried out under the supposed considerations of outputs and/or unavailability of the elements that make up the network. The analysis and evaluation of the events of a low probability of occurrence but that cause high impacts in the systems are studied in this document. Through a methodological analysis the resistance of the electrical systems, their limitations, characterization, and differences with the reliability are exposed. As well as the metrics and research need related to resilience in the different functional stages of electrical systems.

Index terms-- Resilience, Resilient Electrical Systems, Reliability.

Resumen

Los sistemas eléctricos en la actualidad se enfrentan a un nuevo paradigma técnico y operativo, supeditado al desarrollo, posicionamiento y madurez de diferentes fuentes de energías renovables no convencionales en aras de mejorar las condiciones de acceso a la energía y su consumo eficiente. Los sistemas eléctricos son las estructuras ingenieriles de mayor tamaño en los sistemas energéticos. Por lo tanto, están expuestos y son vulnerables a ser afectados por diferentes contingencias y perturbaciones que pueden ocasionar que el suministro de energía sea suspendido. Los estudios y gestión asociada a las acciones de seguridad y confiabilidad de los sistemas eléctricos se han realizado bajo consideraciones supuestas de salidas y/o indisponibilidades de los elementos que conforman la red. El análisis y evaluación de los eventos de baja probabilidad de ocurrencia pero que causan altos impactos en los sistemas se estudian en este documento. A través de un análisis metodológico se expone la resiliencia de los sistemas eléctricos, sus definiciones, caracterización y diferencias con la confiabilidad. Así como también, las métricas y necesidades de investigación relacionadas a la resiliencia en las diferentes etapas funcionales de los sistemas eléctricos.

Palabras clave-- Resiliencia, Sistemas Eléctricos Resilientes, Confiabilidad.

1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

En conjunto con el calentamiento global del planeta Tierra, el número de eventos climáticos extremos ha aumentado considerablemente en los últimos 30 años. Inclusive produciéndose eventos que no registraban una data histórica [1]. La energía eléctrica tiene un especial posicionamiento en la sociedad moderna, su oferta tiene relación directa con el desarrollo económico y social de los pueblos. Es decir que a mayor crecimiento económico mayor es la demanda de electricidad. Para suplir esta demanda los sistemas eléctricos deben emplear energéticos primarios para a través de procesos, físicos, químicos y electromecánicos producir energía eléctrica. Es así que, le electricidad se ha convertido en una forma de energía multipropósito indispensable en todos los sectores productivos y de consumo [2].

Un suministro eléctrico continuo e ininterrumpido de energía otorga muchos beneficios al área de cobertura que abastece. Sin embargo, cuando se interrumpe el mismo, los impactos se pueden percibir de manera inmediata (sistemas de iluminación pública y doméstica apagadas, el tráfico aéreo y vehicular se interrumpen, los centros de asistencia hospitalaria paran sus procedimientos y la mayoría de industrias no pueden operar). En términos monetarios las interrupciones asociadas a situaciones climáticas en los Sistemas de Suministro de Energía Eléctrica (SSEE) han causado pérdidas económicas anuales entre los \$25 a \$70 mil millones de dólares solamente en los Estados Unidos [3].

A medida del transcurso de los tiempos, los requerimientos de los SSEE toman rumbos variables, esto justificado a medida que la demanda del energético y las sociedades crecen de manera no sostenida. Por lo que, los SSEE se enfrentan a transformaciones y desafíos sin precedentes con la implementación de las redes eléctricas inteligentes (Smart Grids). Este nuevo paradigma de los SSEE ha surgido para construir un sistema eléctrico flexible que coordine de mejor manera los recursos de energía y las cargas con el objetivo de proporcionar eficientemente un producto eléctrico bajo parámetros de calidad, sostenibilidad, seguridad y económicamente sustentables [4]. Del mismo modo, la reciente penetración de generación renovable no convencional tipo eólica y solar pueden presentar vulnerabilidades si se ve interrumpida por eventos de alto impacto. Los fenómenos climáticos extremos, tipo huracanes Katrina y Sandy ocurridos en los Estados Unidos, así como también, el terremoto y posterior tsunami de Tohoku en Japón, han demostrado las necesidades de acciones e investigaciones relacionadas a la resiliencia (resilient) [5].

La frecuencia de los desastres naturales está en aumento y el cambio climático tiene el potencial de afectar negativamente en diferentes maneras los SSEE. Todo esto ha acelerado las necesidades investigativas para operar los SSEE en condiciones diferentes a las tradicionales,

esto supeditado al contexto del cambio climático y sus consecuencias que desencadenen en afectaciones negativas en la infraestructura y operación de los SSEE [3]. Por lo tanto, debido al impacto crítico que representa la presencia de eventos climáticos en el equipamiento de los SSEE, surge la necesidad de realizar investigaciones que permitan evaluar el daño y la severidad de dichos eventos y la forma en que los SSEE se recuperan después de la perturbación.

El presente documento está organizado de la siguiente manera. En primer lugar, se presenta la metodología de análisis empleada, tomado en consideración las definiciones de resiliencia, su diferenciación con la confiabilidad, las métricas asociadas a la resiliencia operacional y de infraestructura. Posterior de ello, las necesidades investigativas teniendo en consideración los aspectos expuestos de resiliencia operativa en relación a los estados estacionario y dinámico en desenvolvimiento de los sistemas eléctricos en la actualidad. Para finalmente, establecer las conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros que se derivan del análisis efectuado.

2. METODOLOGÍA

El análisis metodológico guarda concordancia según se muestra en el diagrama de flujo de la Fig. 1.

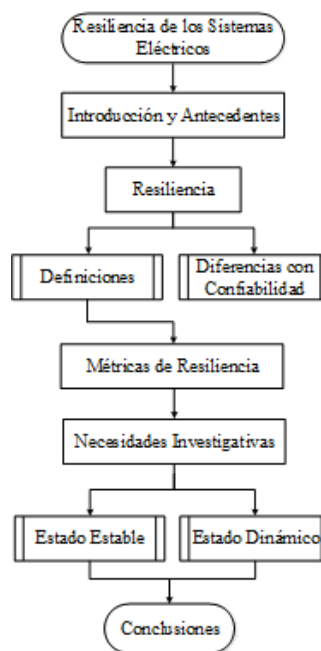


Figura 1: Diagrama de Flujo de la Metodología Empleada

3. RESILIENCIA

Etimológicamente la palabra resiliencia proviene del vocablo latino resilio, que significa: la capacidad que tiene un objeto para volver a su estado original. La primera explicación del término resiliencia en la ingeniería data del

Resiliente: del inglés resilient, significado: capacidad de un material, mecanismo o sistema para recuperar su estado inicial cuando ha cesado la perturbación a la que había estado sometido. Diccionario en línea RAE, 2018.

año de 1973 y fue propuesto por C.S. Holling, en donde se presentaban de manera general enfoques de la resiliencia en los sistemas a manera de relacionar gestión de la seguridad, ecología social y aspectos económicos [6]. En la actualidad, se dice que la resiliencia es la capacidad de un sistema de energía para mejorar la adaptación de su operación e infraestructura a través de la evaluación de la situación perturbadora, los mecanismos de respuesta y estrategias de recuperación. En las secciones siguientes se presenta algunas definiciones que han sido expuestas en la literatura y que están siendo investigadas en el Estado del Arte de los sistemas eléctricos resilientes.

3.1. Definiciones y Generalidades

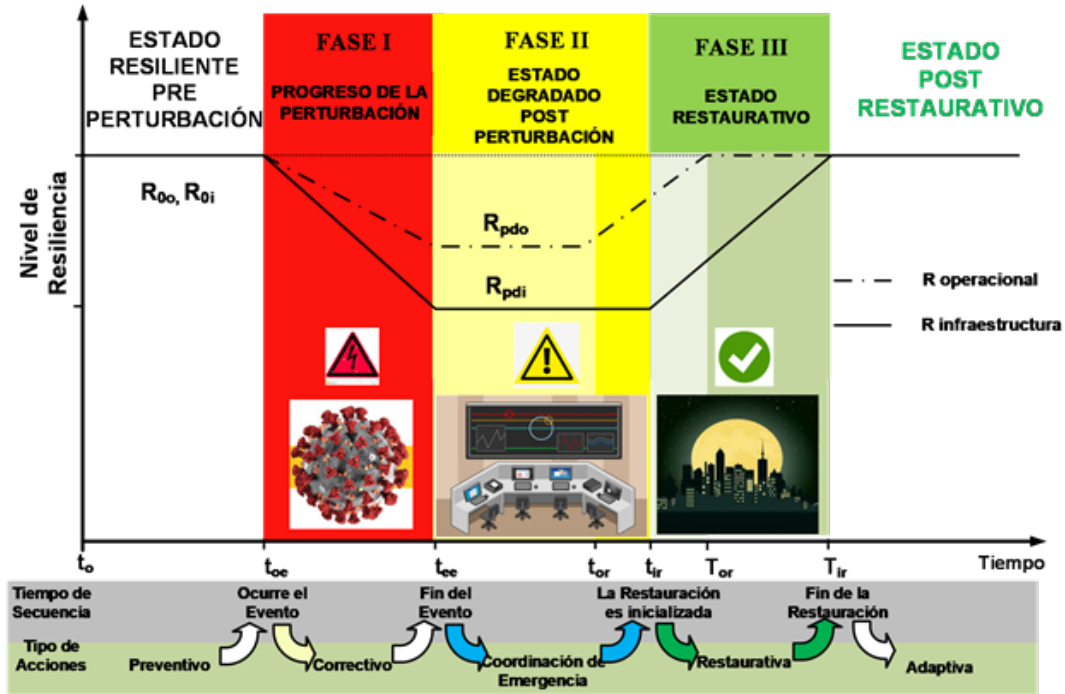


Fig. 2. Comportamiento de resiliencia de un sistema eléctrico, curva trapezoidal asociada con un evento perturbador [7],[8]

Métrica	Resiliencia Operacional		Resiliencia de Infraestructura	
	Expresión Matemática	Unidad	Expresión Matemática	Unidad
Φ	$\frac{R_{pdo} - R_{0o}}{t_{ee} - t_{oe}}$	$\frac{MW}{t}$	$\frac{R_{pdi} - R_{0i}}{t_{ee} - t_{oe}}$	# de componentes indisponibles/tiempo
Λ	$R_{0o} - R_{pdo}$	MW	$R_{0i} - R_{pdi}$	# de componentes indisponibles
E	$t_{or} - t_{ee}$	t	$t_{ir} - t_{ee}$	tiempo
Π	$\frac{R_{0o} - R_{pdo}}{T_{or} - t_{or}}$	$\frac{MW}{t}$	$\frac{R_{0i} - R_{pdi}}{T_{ir} - t_{ir}}$	# de componentes restaurados/tiempo
Área resiliente trapezoidal	$\int_{t_{oe}}^{T_{or}} R_{op}(t)dt$	MW * t	$\int_{t_{oe}}^{T_{ir}} R_i(t)dt$	# de líneas en servicio * tiempo

Tabla 1: Métricas de Evaluación de Resiliencia en Sistemas Eléctricos

El DOE (Department Of Energy, departamento de energía de los Estados Unidos, por sus siglas en inglés), como consecuencia de los desastres naturales de gran magnitud que ha experimentado dicho país, ha definido el término Resiliencia a modo de una característica esencial que deben tener las futuras redes eléctricas inteligentes activas, manifestándolo así: “Resiliencia es la capacidad de un sistema eléctrico de prepararse y adaptarse a las condiciones cambiantes para resistir y recuperarse rápidamente ante perturbaciones, contingencias o interrupciones que se presenten en el sistema” [9].

Otra definición de resiliencia que aborda la temática de los sistemas de Generación Distribuida (GD) y las Microrredes Eléctricas (MREs) es la expuesta en [10], la cual manifiesta que: “Resiliencia es la capacidad que tienen las MREs para resistir a eventos de alto impacto y de baja probabilidad de ocurrencia, con el objetivo de minimizar posibles cortes de suministro de energía y retornar rápidamente a un estado operativo normal del sistema”. Dichos eventos pueden ser: cambios climáticos extremos, desastres naturales, tornados, terremotos, tormentas de nieve, inundaciones, ataques cibernéticos a la seguridad, conflictos bélicos, etc. El centro de investigación de energía del Reino Unido, también aporta con un concepto y enfoque más global de resiliencia. Manifestando que la resiliencia incluye a la confiabilidad, redundancia, capacidad de respuesta y recuperación en la operación de los SSEE [6].

Según el reporte técnico PES-TR65 del IEEE [7], se presenta una novísima definición de resiliencia, la cual manifiesta: “Resiliencia es la capacidad de resistir y reducir la magnitud y/o duración de eventos disruptivos (perturbadores), que incluye la capacidad de absorber, adaptarse y/o recuperarse de dichos eventos”. La definición propuesta, presenta también las siguientes observaciones: en lo referente a las características de absorción, adaptación y recuperación, debe distinguirse entre dos aspectos u horizontes temporales. El primer horizonte temporal operacional o de corto plazo y el segundo denominado horizonte temporal infraestructural o de largo plazo.

La resiliencia operacional se centra en las acciones a realizarse durante e inmediatamente después de la ocurrencia de una perturbación importante, es decir reducir ya sea la frecuencia o el número de clientes desconectados o el tiempo de reconexión de todos los clientes afectados.

El aspecto a largo plazo se refiere a las propiedades que serán importantes realizar para escenarios futuros, que abarcan la fortaleza estructural y la robustez de los sistemas eléctricos.

En la Fig. 2, se muestra un diagrama esquemático que sirve de insumo para explicar el comportamiento resiliente de un SSEE y la evolución temporal que presenta un sistema tras la ocurrencia de un evento perturbador. Donde se nota que el nivel de resiliencia antes de que ocurra la perturbación es R_0 y el nivel de resiliencia posterior a la perturbación no necesariamente es igual a este. R_{pd} es el valor más bajo de resiliencia alcanzado durante la

perturbación, por lo que a esta curva se la conoce como comportamiento resiliente trapezoidal [8].

En la Fig. 2, se muestran a través de indicadores de resiliencia, como se cuantifica los niveles de resiliencia de un SSEE durante la ocurrencia de un evento perturbador disruptivo y su evolución en función del tiempo. Además, se muestra como la resiliencia operacional y de infraestructura se cuantifican utilizando diferentes indicadores y no necesariamente tiene igual nivel resiliente.

La resiliencia operacional, como su nombre lo indica se refiere a las características que garantizan la fortaleza operativa de un SSEE, por ejemplo, la capacidad de garantizar un suministro de electricidad de manera ininterrumpida a los usuarios o la disponibilidad y la capacidad de respuesta del parque de generación ante la presencia de un desastre.

La resiliencia de infraestructura, se refiere a la resistencia física de un SSEE para mitigar la porción o parte del sistema que tiene averías, daños, colapsados o en términos generales que ha dejado de funcionar. Entiéndase por resistencia física a los componentes de equipamiento físico del SSEE.

Continuando con la descripción de la Fig. 2, claramente se distinguen tres fases en la curva trapezoidal de resiliencia. Las mismas que se describe a continuación:

Fase I: proceso de la perturbación ($t_{\xi}[t_{oe},t_{ee}]$) es el tiempo que transcurre por la ocurrencia del evento. Tiempo inicial t_{oe} y tiempo final del evento t_{ee} . Durante la Fase I, el nivel de resiliencia se reduce desde la resiliencia previa la perturbación R_{0o},R_{0i} , al nivel de resiliencia post perturbación R_{pdo},R_{pdi} , para la resiliencia operativa y de infraestructura, respectivamente. Se debe tener en consideración que la R_{pdo} puede ser más bajo o alto que la R_{pdi} dependiendo del sistema y de la gravedad del evento que afecte al SSEE, por lo tanto, cada sistema tiene sus características propias en relación a estos dos tipos de resiliencia.

Fase II: estado degradado posterior a la ocurrencia de la perturbación, tiempo después del evento y tiempo antes que se inicie el proceso de restauración ($t_{\xi}[t_{ee},t_{or}]$) y ($t_{\xi}[t_{ee},t_{ir}]$), para la resiliencia operacional y de infraestructura, respectivamente. En la Fase II, el sistema reside en el estado post perturbación degradado, los niveles de resiliencia operativa y de infraestructura durante algún tiempo antes que se inicie la restauración operacional y de infraestructura en los tiempos t_{or},t_{ir} , respectivamente. La duración en este periodo puede diferir para los dos tipos de resiliencia, obviamente el enfoque y campo de alcance de este documento es la aplicabilidad y desempeño de la tecnología FACTS en los sistemas de MREs.

Fase III: estado restaurador ($t_{\xi}[t_{or},T_{or}]$) y ($t_{\xi}[t_{ir},T_{ir}]$), para la resiliencia operacional y de infraestructura, respectivamente. En la Fase III, que corresponde al

estado restaurador del sistema puede dividirse en dos sub fases: la recuperación operacional, (t_{or}, T_{or}) y la recuperación de infraestructura, (t_{ir}, T_{ir}).

3.2 Métricas de Resiliencia

Para cuantificar la resiliencia de un SSEE, es fundamental definir un conjunto de expresiones matemáticas que permitan evaluar el desempeño y rendimiento durante las diferentes fases de la curva de resiliencia trapezoidal. Acorde a lo manifestado en [3] el DOE ha presentado un documento que describe un desarrollo para establecer métricas, métodos y evaluar la resiliencia en los sistemas eléctricos. Para explicar lo planteado se recurrirá nuevamente a la Fig. 2, que muestra la relación existente entre la variable tiempo y el concepto de resiliencia, con base a lo expuesto [8], en la Tabla 1, se presenta la formulación matemática para la evaluación cuantitativa de indicadores de resiliencia operacional y de infraestructura de un SSEE.

Donde acorde a la Figura 2 y a la Tabla 1, la métrica Φ en la fase I se evalúa estimando la pendiente de la degradación del nivel de resiliencia durante la ocurrencia del evento perturbador ($t_{ee}-t_{oe}$). Mientras que la métrica Λ está definida por la degradación del nivel de resiliencia, es decir: $R_{Oo}-R_{pdo}$ y $R_{Oi}-R_{pdi}$, para la resiliencia operativa y de infraestructura, respectivamente. La métrica E muestra el tiempo que el SSEE permanece en el estado degradado post perturbación (fase II) y está dado por $t_{or}-t_{ee}$ y $t_{ir}-t_{ee}$, para la resiliencia operativa y de infraestructura, respectivamente. La métrica Π en la fase III está definida por las pendientes de las curvas de resiliencia operacional y de infraestructura, las cuales consideran el nivel de resiliencia antes del evento perturbador como el tiempo requerido para alcanzar este nivel de resiliencia. Y, por último, se considera la media del área resiliente trapezoidal, que nos indica la cantidad de degradación de la resiliencia en las fases y su evolución en el tiempo desde el nivel pre perturbación hasta el nivel restaurativo.

Es necesario tener en consideración que mientras que las actividades de seguridad de la infraestructura generalmente se enfocan en prevenir que ocurra un evento perturbador en los SSEE, los objetivos de resiliencia de la infraestructura generalmente se enfocan en asegurar que la infraestructura pueda continuar proporcionando bienes y servicios a las comunidades que dependen de ellos, independientemente de la ocurrencia de eventos perturbadores. Puede que no sea posible continuar operando a niveles nominales o previos a la interrupción, pero operar a niveles incluso reducidos puede reducir el impacto de los eventos perturbadores en los usuarios [3].

3.3 Diferencias entre Resiliencia y Confiabilidad

Dado el posicionamiento histórico del concepto de confiabilidad, es importante describir de qué manera difiere del de resiliencia. Las principales características claves distintivas son: i) la resiliencia abarca todos los peligros y eventos que puedan ocurrir en los SSEE, incluidos los eventos de baja probabilidad de ocurrencia

y de alto impacto, que comúnmente están excluidos de los cálculos de confiabilidad; ii) la resiliencia cuantifica no solo los estados en los que incurre el sistema (como la confiabilidad), sino también los tiempos de transición entre los estados. Por lo tanto, requiere una caracterización más detallada del proceso de preparación antes de que ocurra cualquier evento, el proceso operativo durante el evento y el proceso de respuesta después del evento; iii) la resiliencia tiene como objetivo capturar tanto los efectos en la carga/demanda (como la confiabilidad), los efectos en los operadores y el personal de la red y, efectos en la propia infraestructura del sistema (posiblemente en dos o más horizontes de tiempo).

Los análisis de confiabilidad de SSEE generalmente se enfocan en las operaciones de los componentes de red para condiciones relativamente normales y en el contexto de un número limitado de eventos de interrupción esperados, por ejemplo, $N-1$, $N-1-1$. Los análisis de resiliencia de SSEE se enfocan en las operaciones de la red y la planificación para el contexto de eventos de baja probabilidad de ocurrencia y altas consecuencias disruptivas si estos tienen posibilidad de ocurrir en el sistema. Esta diferencia significativa radica que en términos de confiabilidad no se analizan los costos o recursos adicionales que pueden incurrir los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP) para evitar las interrupciones, por ejemplo, el costo de comprar energía a otros SEP para suplir las necesidades energéticas [3].

La confiabilidad es una evaluación estática, en cambio, la evaluación de resiliencia puede ser adaptiva, continua a corto y largo plazo. La confiabilidad evalúa la frecuencia y tiempo de interrupción a los abonados al servicio eléctrico, la resiliencia evalúa y considera los tiempos asociados a la recuperación de todo el sistema después de ocurrido el o los daños [6].

A continuación, se presenta las diferencias más significativas entre confiabilidad y resiliencia.

Cuando se requiere conocer la confiabilidad de un SSEE, lo primero que se determina es la tasa de falla de cada uno de los equipos que conforman el sistema. Lógicamente la tasa de falla, relaciona en número de veces que un equipo ha salido de servicio en un determinado intervalo de tiempo. Además, se debe considerar la tasa de reparación del equipo, esta se define como la relación entre el número de veces que el equipo salió de servicio por labores programadas o de mantenimiento en un intervalo de tiempo. Una vez que se ha definido estos dos indicadores, se procede a evaluar la FOR (Forced Outage Rate, tasa forzada de salida, por sus siglas en inglés), esta tasa nos dice cuál es la probabilidad que un equipamiento del SEP falle.

Es necesario aclarar que para este análisis se considera que las probabilidades de falla de los elementos son independientes entre sí. Por lo que, la probabilidad de ocurrencia simultánea de varios eventos independientes es igual al producto aritmético de las probabilidades individuales de cada componente del sistema para cada

estado operativo que esté en análisis [11].

Las evaluaciones e indicadores de confiabilidad sean estos de disponibilidad e indisponibilidad se obtienen por lo general de manera estadística y dependen propiamente de las características propias del SEP a evaluar. Es así que, las tasas de fallas y reparación son obtenidas en función de las fallas y salidas programadas que se hayan presentado y estas son obtenidas tácitamente debidas en función de los eventos de alta probabilidad de falla y que implican daños menores en los SSEE. En contraparte la evaluación de resiliencia, enfrenta otra arista de análisis asociada a los eventos de poca probabilidad de ocurrencia pero que tiene altos impactos en los SSEE, tal cual se ha mencionado en apartados anteriores de este documento.

Teniendo en consideración la teoría de evaluación de riesgo [12], en la Fig. 3, se muestra el semáforo para catalogar al riesgo que va desde bajo en color verde hasta crítico en color rojo. En el apartado siguiente se realiza los enfoques comparativos relacionados a la confiabilidad y la resiliencia de los SSEE.

RIESGO			
Bajo	Medio	Alto	Crítico

Fig.3. Evaluación del Riesgo en SSEE.

En la Fig. 4, se muestra una matriz de doble entrada que sirve de insumo para catalogar en función de la probabilidad de ocurrencia de un evento y su consecuencia en un sistema de MRE, las diferencias existentes entre la resiliencia y confiabilidad.

Estas diferencias se deben a que por lo general ante análisis de eventos que pongan en riesgo la operatividad de las MREs, en el marco de la resiliencia se considera los eventos de baja probabilidad de ocurrencia, pero que desencadene en consecuencias de riesgo catastrófico. Acorde a la Fig. 4, se muestra los enfoques diferentes de resiliencia (Resili.) y confiabilidad (Confi.), teniendo en consideración la teoría de evaluación de los riesgos mostrada en la categorización del riesgo mostrada en la Fig. 3.

		PROBABILIDAD				
		Raro	Poco Probable	Posible	Muy Probable	Casi Seguro
CONSECUENCIA	Despreciable				Confi.	Confi.
	Menores					
	Moderadas					
	Mayores					
	Catastróficas	Resili.	Resili.			

Fig.4. Diferencias entre Resiliencia y Confiabilidad – Teoría de Evaluación en Función del Riesgo.

Finalmente, según lo manifestado en [6], algunas causas que ponen en riesgo la confiabilidad y la resiliencia

operativa de los SSEE, son las siguientes:

- Altas temperaturas medioambientales en determinadas zonas del planeta pueden limitar la capacidad de transferencia de los sistemas de transmisión y distribución. Además, por esta causa puede provocar pérdidas de energía.
- La presencia de vientos de altas velocidades, tormentas y huracanes pueden afectar las líneas aéreas de transmisión y distribución.
- Nieve y olas de frío pueden afectar las estructuras y los aisladores de transmisión y distribución, provocando disminución de niveles de aislamiento, lo que desencadenaría en fallas.
- A diferencia de los eventos meteorológicos mencionados, la presencia de lluvias y tifones no dañan las líneas áreas de transmisión y distribución, pero pueden provocar desperfectos en los equipamientos de estaciones y subestaciones transformadoras.

4. NECESIDADES DE INVESTIGACIÓN

Debido al impacto crítico que representa la presencia de eventos climáticos en el equipamiento de los SSEE, surge la necesidad de realizar investigaciones que permitan evaluar el daño y la severidad de dichos eventos y la forma en que los SSEE se recuperan después de la perturbación. El DOE en [13] destacó cinco necesidades relacionadas a la investigación y desarrollo (I+D) que se deben tomar en cuenta para los sistemas eléctricos de distribución y las MREs resilientes: i) desarrollo de sistemas de medición resilientes; ii) mejoras en los diseños y construcción de los sistemas eléctricos; iii) mejoras en la respuesta y recuperación del sistema; iv) mejoras en las acciones preventivas y de mitigación y; v) análisis y acciones de gestión para lograr la interdependencia entre los componentes que conforman el sistema.

La flexibilidad se refiere a las capacidades que deben tener los SSEE para adaptarse a las condiciones cambiantes que enfrentan, ya desde el punto de las ERNCs y también debidas a los factores externos que pongan en vulnerabilidad a los sistemas. Las aristas de la flexibilidad implican proporcionar un producto eléctrico de manera confiable, bajo parámetros de calidad y continuidad, asequible, económicamente operado, ambientalmente responsable y de manera resiliente. Todas estas aristas deben ser consideradas entre relacionadas en el enfoque de las necesidades investigativas de los SSEE resilientes.

La conectividad hoy en tiempos actuales marca una dependabilidad de especial énfasis en los SSEE. El despliegue avanzado de los sistemas de tecnologías de información y comunicación (TICs), sistemas de monitoreo y el internet de las cosas, han permitido múltiples funcionalidades y aplicaciones en los SSEE que ayudan a la operación y toma de decisiones en la cadena de valor de los sistemas eléctricos. La conectividad permitirá que los SSEE se tornen más flexibles y por ende, resilientes [5].

Especial interés se debe considerar al evaluar los estados estacionario y dinámico de los SSEE. Debido a que un SSEE es estable cuando es capaz de retornar a un estado

operativo normal después de haber sido sometido a una perturbación [14].

Para el análisis de resiliencia en estado estable de los sistemas eléctricos, prioritariamente se debe considerar la disponibilidad de los recursos energéticos primarios, esto con el objetivo de que se garantice el balance energético generación versus demanda.

Por otro lado, en lo correspondiente a resiliencia para el estado dinámico de los SSEE se debe hacer referencia exclusivamente a la fase II de la curva trapezoidal de resiliencia mostrada en la Fig. 2. Donde las necesidades prioritarias de las variables y mecanismos de control de los componentes del SSEE deben ser la rápida y efectiva respuesta al evento perturbador. Bajo este contexto, se justifica la necesidad de utilización de dispositivos basados en la tecnología FACTS, cuya velocidad de respuesta debida a sus elementos de electrónica de potencia es muy rápida, con lo que, los SSEE podrán responder efectivamente a los eventos perturbadores que demande un comportamiento resiliente del sistema [15].

Recientemente, el concepto de MREs resilientes está tomando notoriedad, relacionado con la capacidad operativa y de infraestructura de un sistema para continuar operando y suministrando potencia y energía incluso cuando ocurran los eventos perturbadores disruptivos. Los objetivos de este concepto se enfocan en gestionar e idealmente minimizar las posibles consecuencias que se produzcan como resultado de dichos eventos.

Por otro lado, surge el concepto de RACDS que consiste en mejorar sistemáticamente la resiliencia de los sistemas eléctricos de distribución, entre los cuales se incluyen las MREs. Este mejoramiento se logra mediante el uso de los dispositivos de electrónica de potencia, Para mejorar la integración de GD, permitiendo con ello mejorar los controles asociados a: tensión, frecuencia y potencia reactiva y el consumo eficiente por parte de las cargas del SSEE. Otro atributo de las RACDS es que por medio de sistemas de almacenamiento de energía en conjunto con FACTS pueden proporcionar un soporte dinámico de tensión y frecuencia en situaciones operativas emergentes que puedan ocasionar detrimento de la estabilidad del sistema.

Los sistemas resilientes también ayudan a mitigar los problemas de calidad del producto eléctrico en los sistemas para permitir un suministro confiable [16].

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La resiliencia enfrenta la prevención, recuperación y capacidad de supervivencia que deben tener los SSEE ante un evento perturbador. La resiliencia y la sostenibilidad se complementan estrechamente en razón de abarcar aspectos ambientales, sociales y económicos de los sistemas.

Ante el nuevo paradigma en el cual están siendo desarrollados y operados los sistemas eléctricos, es

necesario adoptar todas las consideraciones a las cuales hace referencia la flexibilidad. Las tecnologías de la información y la conectividad, sumado a los avances de los sistemas de monitoreo y control permiten el mejoramiento de los sistemas eléctricos hacia las redes inteligentes y con ello hacia una operación resiliente.

El análisis en términos de resiliencia de un SSEE debe caracterizarse ya sea desde el punto de vista operativo o de infraestructura, ya que como se mencionó, el marco de tiempo de estos dos enfoques difiere. Así como también las fases de comportamiento y análisis de la curva trapezoidal de resiliencia.

El continuo avance y desarrollo de los sistemas eléctricos en general supeditado a la incorporación de ERNCs, GD y MREs, demandan de nuevas acciones de investigación y desarrollo para la operación resiliente. Como trabajos futuros se plantea el investigar temáticas asociadas al despacho y suministro de recursos energéticos ante contingencias que pongan en riesgo la operación de los sistemas. Además, la aplicabilidad de instalación de dispositivos basados en tecnologías FACTS para mejorar la resiliencia operativa de los SSEE y particularmente sistemas de MREs con GD.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] World Business Council for Sustainable Development, "Building a Resilient Power Sector," 2014.
- [2] A. Gómez-Expósito, A. Conejo, and C. A. Cañizares, *Electric Energy Systems*, Second Edition. 2018.
- [3] E. Vugrin, A. Castillo, and C. Silva-Monroy, "Resilience Metrics for the Electric Power System : A Performance-Based Approach," no. February, p. 49, 2017.
- [4] M. G. Molina, "Energy Storage and Power Electronics Technologies: A Strong Combination to Empower the Transformation to the Smart Grid," *Proc. IEEE*, vol. 105, no. 11, pp. 2191–2219, 2017.
- [5] EPRI, "Electric Power System Resiliency Challenges and Opportunities," 2016.
- [6] N. Mahdavi, S. Najafi, and N. Bizon, *Power Systems Resilience*. 2019.
- [7] A. Stankovic and K. Tomsovic, "PES-TR65 IEEE - The Definition and Quantification of Resilience," 2018.
- [8] M. Panteli, P. Mancarella, D. N. Trakas, E. Kyriakides, and N. D. Hatzargyriou, "Metrics and Quantification of Operational and Infrastructure Resilience in Power Systems," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 32, no. 6, pp. 4732–4742, 2017.
- [9] Y. Xu, C.-C. Liu, K. Schneider, F. Tuffner, and D. Ton, "Microgrids for Service Restoration to Critical Load in a Resilient Distribution System," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 9, no. 1, pp. 1–1, 2016.

[10] A. Khodaei, "Resiliency-oriented microgrid optimal scheduling," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 4, pp. 1584–1591, 2014. <https://doi.org/10.1109/TSG.2014.2311465>, vol. 5, no. 4, pp. 1584–1591, 2014.

[11] C. Zapata, "Confiabilidad de Sistemas Eléctricos de Potencia." p. 101, 2011.

[12] INSHT España, "Evaluación de Riesgos."

[13] D. T. Ton and W.-T. P. Wang, "A more resilient grid: The U.S. Department of Energy joins with stakeholders in an R&D plan," *IEEE Power Energy Mag.*, vol. 13, no. 3, pp. 26–34, 2015.

[14] P. Kundur et al., "Definition and Classification of Power System Stability IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 19, no. 3, pp. 1387–1401, 2004.

[15] N. G. Hingoranl, L. Gyugyi, and M. E. El-Hawary, *Understanding FACTS: Concepts and technology of flexible ac transmission systems*. 1999.

[16] F. Z. Peng, "Flexible AC Transmission Systems (FACTS) and Resilient AC Distribution Systems (RACDS) in Smart Grid," *Proc. IEEE*, vol. 105, no. 11, pp. 2099–2115, 2017.



Luis A. Paredes. – Nació en Quito, Ecuador en 1987. Recibió su título de Ingeniero Eléctrico de la Escuela Politécnica Nacional en 2012 y de Magíster en Gestión de Energías en 2016. Además, ha realizado varios cursos y especializaciones en temáticas de energía eléctrica en Estados Unidos,

China, Perú, Chile y Brasil. Su experiencia profesional ha sido desarrollada en varias empresas e instituciones del sector eléctrico y energético del Ecuador. Actualmente es candidato a Doctor en Ingeniería Eléctrica (Ph.D.) del Instituto de Energía Eléctrica (IEE) de la Universidad Nacional de San Juan (UNSJ) en Argentina. Sus campos de investigación están relacionados con: Resiliencia de los Sistemas Eléctricos, Estabilidad y Control en Microrredes Eléctricas, FACTS, Electromovilidad, Energías Renovables y Eficiencia Energética.



Benjamín R. Serrano. – Nació en San Juan, Argentina en 1955. Recibió su título de Ingeniero Electromecánico en la Universidad Nacional de San Juan (UNSJ), Argentina en 1981. Realizó perfeccionamientos en el Institut fuer Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft de la Universidad

RWTH de Aachen, Alemania desde 1984 a 1987 y en el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica de Madrid, España entre 1997 y 1998. Obtuvo su título de Doctor en Ingeniería Eléctrica en el Instituto

de Energía Eléctrica (IEE) de la UNSJ, Argentina en 2017. Actualmente es docente e investigador en el IEE de la UNSJ-CONICET y sus campos de investigación están relacionados con la Programación Óptima de la Operación de los Sistemas Eléctricos de Potencia, considerando en forma específica del Control de Tensiones y Suministro de Potencia Reactiva.



Marcelo G. Molina. – Es profesor titular de Electrónica de Potencia, Energías Renovables y Redes Eléctricas Inteligentes en la Universidad Nacional de San Juan (UNSJ) e investigador principal del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina. Desde 2019 se desempeña como Director del Instituto

de Energía Eléctrica (IEE) de la UNSJ-CONICET. El Dr. Molina recibió el título de Ingeniero Electrónico de la Universidad Nacional de San Juan, Argentina en 1997 y su Ph.D. de la misma universidad en 2004. Es autor de un libro en el campo del almacenamiento de energía y es autor/coautor de ocho capítulos de libros en ingeniería eléctrica y más de 200 publicaciones en su campo de especialización. Sus actividades de investigación se centran en el modelado, análisis y control de sistemas eléctricos de potencia, electrónica de potencia y accionamientos eléctricos, tecnologías de microrredes y redes inteligentes, generación renovable y la aplicación de almacenamiento de energía conectado a la red.