



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

**CUANTIFICACIÓN DE RESILIENCIA  
BAJO UNA MÉTRICA ESTÁTICA  
EVALUADA SOBRE LA REPRESENTACIÓN  
METODOLÓGICA DEL MERCADO  
ELÉCTRICO COLOMBIANO.**

**Anderson Damián Jiménez Alfaro**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Minas  
Departamento de Ingeniería de la Organización  
Medellín, Colombia  
2018



**CUANTIFICACIÓN DE RESILIENCIA  
BAJO UNA MÉTRICA ESTÁTICA  
EVALUADA SOBRE LA REPRESENTACIÓN  
METODOLÓGICO DEL MERCADO  
ELÉCTRICO COLOMBIANO.**

**Anderson Damián Jiménez Alfaro**

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:

**Magíster en Ingeniería Industrial**

Director

Ph. D. Santiago Medina

Profesor Titular Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín

Línea de Investigación:

Finanzas

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas

Departamento de Ingeniería de la Organización

Medellín, Colombia

2018



# Dedicatoria

*A Dios por regalarme a mi querida esposa Dianita  
quien me a acompaña en este duro camino  
y a mis dos hijos Ángel David y María Camila  
por ser tan maravillosos y llenarme de inspiración*



# Agradecimientos

Agradezco a Dios por tan fantástica oportunidad, en la cual he podido superarme profesionalmente y culminar con éxito todas las metas propuestas durante este posgrado.

A mi querida esposa Dianita quien me acompaña y alienta a superarme cada día más y más, quien es la propulsora de muchas aventuras de las cuales sin ella no sería posible, y a mis hijos Ángel y Camila quien a tan corta edad me han enseñado y permitido ser mejor.

A mi hermano Ronald por ser ejemplo y aliciente durante toda mi vida a él le debo mucho y estaré eternamente agradecido por todo lo que ha hecho y hace por mi familia y a mis padres Jorge y Gladys que me brindan lo mejor de sí.

“É na resiliência que nascem as vitórias porque todos os caminhos são feitos de altos e baixos e é necessário persistir para se chegar ao fim.”



# Resumen

El mercado de energía nacional es un sistema que desde hace más de una década se ha estudiado, con el fin de entenderlo y poder generar una representación que se ajusta al comportamiento real, pero muchas variables influyen sobre el sistema por lo que la complejidad es demasiado alta para desarrollarse de manera fiable, pero se han establecido diferentes metodologías muy aceptadas en las investigaciones.

La investigación realizada facilita el entendimiento del mercado energético nacional, aporta una metodología basada en el modelo de Leontief pero con una adaptación para sistemas económicos Modelo de Entrada-Salida de Inoperabilidad IIM, esto suministra información que facilita una representación topológica que se adapta a la complejidad del sistema, además de realizar un barrido de las diferentes métricas resilientes que se pueden aplicar sobre sistemas; estas métricas permiten proporcionar información del comportamiento con el fin de predecir y generar acciones con anticipación, pero hay eventualidades que son indescifrables para un sistemas tan complejo y se hace necesario determinar con que prontitud el mercado asimila y se ve afectado por un evento adverso de gran magnitud y es ahí donde la resiliencia se hace importante.

**Palabras claves:** Mercado energético, matriz entrada – salida, representación topológica, resiliencia, modelo.

# Abstract

The national energy market is a system has been studied for more than a decade, aiming at its understanding and the creation of a representation more adjusted to the real behavior. However, the system is influenced by a large number of variables, so its complexity is too high to be reliably developed. For that, different methodologies have been established that are widely accepted in research

The present research facilitates the understanding of the national energy market and provides a methodology based on the Leontief model adapted for economic models of Input-Output Inoperability Model (IIM). This methodology provides information that facilitates the topological representation adapted to the complexity of the system and performs a scan on the different resilient metrics that can be applied in those systems. These metrics provide greater insight into the behavior of the energy market, enabling prediction and action generation in advance. However, there are undecipherable events for complex systems, of which it is necessary to determine the speed of the market reaction, which can be affected by a large magnitude adverse event, and resilience is very important at that moment.

**Keywords:** Energy market, input-output matrix, topological representation, resilience, model.

## Resumo

O mercado de energia nacional é um sistema que tem sido estudado há mais de uma década, visando a sua compreensão e a criação de uma representação mais ajustada ao comportamento real. Porém, o sistema é influenciado por grande quantidade de variáveis, então, a sua complexidade é muito alta para ser desenvolvido de maneira confiável. Para tanto, foram desenvolvidas diferentes metodologias aceitas para serem utilizadas em pesquisas.

A presente pesquisa facilita a compreensão do mercado energético nacional e fornece uma metodologia baseada no modelo do Leontief adaptada para sistemas econômicos de Modelo de Entrada – Saída de Inoperabilidade (IIM). Essa metodologia fornece informação que facilita a representação topológica adaptada à complexidade do sistema e realiza uma varredura sobre as diferentes métricas resilientes que podem ser aplicadas nesses sistemas. Essas métricas proporcionam maior informação sobre o comportamento do mercado energético, permitindo prever e gerar ações antecipadamente. Entretanto, existem eventos indecifráveis para sistemas complexos, dos quais é necessário determinar a rapidez da reação do mercado, o qual pode ser afetado por um evento adverso de grande magnitude, sendo a resiliência muito importante naquele momento.

**Palavras-chave:** Mercado de energia, matriz de insumo-produto, representação topológica, resiliência, modelo.



# Contenido

Dedicatoria.....	v
Agradecimientos .....	vii
Resumen.....	ix
Contenido.....	xiii
INTRODUCCIÓN .....	1
1. MERCADO ELÉCTRICO, REPRESENTACIÓN DE MERCADOS Y RESILIENCIA: ESTADO DEL ARTE .....	11
1.1 Mercado Eléctrico Colombiano.....	11
1.2 Operación del mercado eléctrico colombiano.....	15
1.3 Representación De Mercados Matriz De Input - Output (I-O).....	17
1.4 Resiliencia .....	23
1.5 Evaluación de la resiliencia .....	24
1.6 Medición General .....	24
1.6.1 Enfoque determinista Estático .....	26
1.6.2 Enfoque determinista Dinámicos .....	31
2. METODOLOGÍA PROPUESTA .....	34
2.1 Fase de Modelación .....	34
2.2 Fase de Representación.....	35
2.3 Fase de Cálculo de Resiliencia .....	36
3. DESARROLLO, REPRESENTACIÓN IMPLEMENTACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO .....	38
3.1 DESARROLLO DEL MODELO.....	38
3.1.1 Identificación del sistema resiliente .....	38

3.1.2	Datos de mercado Eléctrico.....	39
3.1.2.1	Técnicas de representación.....	40
3.1.3	Modelo de obtenido .....	42
3.2	Representación del modelo.....	43
3.2.1	Esquema de representación.....	43
3.2.1	Modelo de Representación.....	47
3.3	Fase de Cálculo de Resiliencia .....	47
3.3.1	Métricas Existentes.....	47
3.3.2	Posibles indicadores.....	48
3.3.3	Selección de indicador.....	48
3.3.4	Implementación .....	50
3.3.5	Análisis de sensibilidad.....	54
3.3.1	Cuantificación .....	59
	CONCLUSIONES .....	61
	RECOMENDACIONES .....	62
	BIBLIOGRAFÍA Y FUENTES DE INFORMACIÓN.....	64

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Estructura global del sector energético colombiano.....	13
Figura 2 Estructura operacional del mercado eléctrico .....	14
Figura 3 Funciones del mercado eléctrico operador en Colombia .....	15
Figura 4 Ilustración conceptual de la matriz técnica A .....	19
Figura 5 Estructura del enfoque de la evaluación Cuantitativa .....	24
Figura 6 Medición de Pérdidas de Resiliencia del Triángulo de Resiliencia ..	27
Figura 7 Una reinterpretación del triángulo de resiliencia .....	28
Figura 8 Dos triángulos con la misma resiliencia calculada, diferentes proporciones .....	29
Figura 9 Cuantificación de la Resistencia Estratégica Estática.....	30
Figura 10 Resiliencia económica dinámica .....	31
Figura 11 Sistema de estados de Transición y función de entrega en resiliencia. ....	33
Figura 12 Fase de Representación del problema .....	35
Figura 13 Fase de representación .....	36
Figura 14 Cuantificación de resiliencia.....	37
Figura 15 Representación topológica del comportamiento del mercado energético colombiano .....	41
Figura 16 Representación topológica del comportamiento del mercado energético colombiano real .....	47

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Esquema de una tabla Input - Output .....	18
Tabla 2 I-O De n sectores .....	18
Tabla 3 Consolidado de los agentes .....	39
Tabla 4 Datos en peso colombiano de las interacciones entre cada uno de los agentes .....	42
Tabla 5 Matriz de requerimientos técnicos A .....	43
Tabla 6 Matriz de requerimientos técnicos entre los diferentes agentes A* ...	44
Tabla 7 Demanda de perturbación primaria .....	45
Tabla 8 Matriz (I-A) .....	45
Tabla 9 Matriz (I-A) <sup>-1</sup> .....	46
Tabla 10 Indicadores para sistemas económicos .....	48
Tabla 11 Matriz (I-A) <sup>-1</sup> * D <sub>max</sub> .....	51
Tabla 12 Resiliencia de un sistema estático en función de la inoperabilidad. 53	
Tabla 13 Derivada de la resiliencia estática del sistema en estado estable... 53	
Tabla 14 Perdida del 30% sobre la generación de energía .....	56
Tabla 15 Diferencia del sistema en estado estable y el escenario 1 .....	56
Tabla 16 Perdida del 30% sobre la comercialización de energía.....	57
Tabla 17 Diferencia del sistema en estado estable y el escenario 2.....	57
Tabla 18 Perdida del 30% sobre la generación y comercialización de energía .....	58
Tabla 19 Diferencia del sistema en estado estable y el escenario 3.....	58
Tabla 20 Inversiones por agentes .....	59
Tabla 21 Resultados la estrategia de inversión basado en decisiones de resiliencia planificadas. ....	60

**LISTA DE ECUACIONES**

Ecuación 1 .....	18
Ecuación 2 .....	19
Ecuación 3 .....	19
Ecuación 4 .....	20
Ecuación 5 .....	20
Ecuación 6 .....	21
Ecuación 7 .....	21
Ecuación 8 .....	21
Ecuación 9 .....	22
Ecuación 10 .....	22
Ecuación 11 .....	22
Ecuación 12 .....	22
Ecuación 13 .....	22
Ecuación 14 .....	26
Ecuación 15 .....	27
Ecuación 16 .....	29
Ecuación 17 .....	31
Ecuación 18 .....	31
Ecuación 19 .....	32
Ecuación 20 .....	32
Ecuación 21 .....	49
Ecuación 22 .....	49
Ecuación 23 .....	49
Ecuación 24 .....	49
Ecuación 25 .....	50

# INTRODUCCIÓN

A partir de 1994, el sector eléctrico colombiano estableció un mercado de energía eléctrica con elementos que le permitieran la competencia, y así mejorar la calidad en la prestación del servicio de energía eléctrica a precios más exequibles para los consumidores. De los diferentes agentes que participan en el mercado, los generadores y los comercializadores son los dos que tienen características particulares de competencia; mientras la transmisión y la distribución debido a las características de la economía de escala, son monopolios naturales. Sin embargo, para que esta competencia sea efectiva, los diferentes participantes del mercado deben establecer estrategias para tomar decisiones que se traduzcan en la optimización de sus ingresos, estas deben estar basadas en criterios que se puedan validar. La dificultad radica en las características que tiene la electricidad como bien: no es físicamente almacenable, presenta variabilidad en la demanda y tiene una dependencia de las condiciones climatológicas, entre otras. (Kuong, 2004) Desde el punto de vista económico, las industrias de gas natural y electricidad se caracterizan por tener competencias imperfectas, la elasticidad de demanda es muy baja, tiene funciones de ofertas convexas y de forma discontinua, alta frecuencia de operaciones en el mercado abierto, empresas muy distintas y alto potencial de colusión. (Wilson, 2002)

Teniendo en cuenta que durante los últimos 25 años el sistema eléctrico de alta potencia nacional y mundial ha experimentado cambios sustanciales sobre su estructura, en donde ha enfrentado procesos de privatización, reestructuración y liberalización; lo que ha permitido la introducción de la competencia en varias de las actividades de la cadena de suministro, trayendo consigo la apertura del mercado de energía creando mercados altamente competitivos que establecen nuevos desafíos de modelización, que logren enmarcar todas las variables que intervienen de manera endógena o exógena de los agentes que interactúan en el mercado. (Wilson, 2002) Existe un consenso en reconocer la necesidad de contribuir al fortalecimiento de los modelos y diseños de las nuevas funciones que ejercen los agentes dentro del mercado, en el ámbito de mejorar la eficiencia de éstos y de mantener una actualización permanente

de metodologías y procedimientos para enfrentar los nuevos desafíos. Debido a estas razones, muchas de las técnicas estándares que se han desarrollado para simular o representar otros mercados tienen serias limitaciones a la hora de llevarlo a implementar en el mercado eléctrico. (Micola, 2010).

En los modernos mercados de energía de libre competencia es muy complejo considerar todas las variables que interactúan con el sistema, las diferentes metodologías que se han planteado son aproximaciones de lo que sucede en un momento determinado es decir en un instante de tiempo, esto porque los agentes adquieren distintos roles de importancia dentro del mismo sistema. Bajo este escenario, el centro de las investigaciones, tanto de entidades académicas como de estamentos reguladores, ha apuntado a mejorar la competitividad entre los agentes y lograr una mayor eficiencia en la operación del mercado. Dentro de los desarrollos investigados sobre las herramientas de validación para nuevos mercados de energía eléctrica, se caracterizan los simuladores que se han utilizado como herramientas metodológicas en la representación y validación; en la actualidad, los investigadores son capaces de representar el comportamiento de mercados con una modelación más apegada al contexto real y detallado desde la generación hasta los diferentes agentes. No obstante, existen aún grandes limitaciones en que concierne a la representación de diversos aspectos intrínsecos del mercado eléctrico, como reflejar el conflicto de intereses por parte de los agentes al momento de resolver sus problemas, las distintas interacciones que ocurren entre los agentes que intervienen en la cadena de operación del sistema eléctrico colombiano. (Guevara Cedeño, 2012)

Otros de los grandes desarrollos propuestos en los últimos años sobre las herramientas para comprender los nuevos mercados de energía eléctrica, se caracterizan las representaciones metodológicas, que dan lugar a nuevos desarrollos tecnológicos y conceptuales. Las representaciones en la actualidad son capaces de simbolizar el comportamiento de mercados con una modelación aproximada a la realidad de la generación y los distintos agentes del mercado. Existen en el presente serias condiciones en la representación de diferentes aspectos de estos mercados y sus agentes, tales como el relacionamiento interno entre los agentes, y como llegar a cuantificar

la resiliencia del sistema. Por lo tanto, se requieren mayores esfuerzos para desarrollar modelos conceptuales prácticos que permita entender cómo se integran los componentes operacionales del sistema y la relación con el riesgo sistémico junto a la implementación de las métricas de resiliencia estática (significa que el sistema se mide en un instante de tiempo) que permitan obtener resultados completos y confiables. De aquí nace la necesidad de los modelos que caracterizan la acción que ejercen los agentes dentro de los mercados y permite medir la resiliencia, la cual promueve la preparación del sistema frente a perturbaciones, lo que se refleja en acciones preventivas, con una mirada proactiva, reduce las consecuencias provocadas por perturbaciones, en caso de darse alguna y mejora las acciones de recuperación, luego de un evento desfavorable.

El mundo moderno se caracteriza por ser una red a gran escala de sistemas económicos y de infraestructura interconectada e interdependiente. Lo que llevo a Kenneth G. Crowther and Yacov Y. Haimes a demostrar en su artículo el valor de introducir el análisis de interdependencia en varias fases de evaluación y gestión de riesgos a través de la aplicación del Modelo de Entrada-Salida de Inoperabilidad (IIM). El artículo titulado *Application of the Inoperability Input–Output Model (IIM) for Systemic Risk Assessment and Management of Interdependent Infrastructures* aplica el método IIM con base en datos reales y el modelo económico de W. Leontief, un método computacionalmente eficiente, económico y holístico para estimar los impactos económicos y para calcular la inoperabilidad que se desarrolla en cascada además de las pérdidas económicas que resultan de las interdependencias dentro de los sistemas económicos y de infraestructura. Se presentan tres casos de estudio ilustrativos. El primero y el segundo ilustran cómo el IIM de la oferta y la demanda se usan para calcular los efectos de orden superior de los ataques a las vulnerabilidades y la implementación de las políticas de gestión de riesgos en los sistemas económicos de gran escala. El último estudio de los casos ilustra un uso más general para el análisis de las interdependencias: para evaluar las opciones de gestión de riesgos frente a objetivos múltiples. Este estudio calcula una frontera de soluciones óptimas u óptimas de Pareto integrando un modelo simplificado de los costos de recuperación al sector de energía derivado de datos de fuente abierta con el IIM. A través de estos estudios de

caso, que utilizan una base de datos de la Oficina de Análisis Económico, ilustramos el valor del análisis de interdependencia en la evaluación de riesgos y el proceso de gestión como parte integral de la ingeniería de sistemas.

Por otra parte, Joost R. Santos en su estudio *Inoperability Input-Output Modeling of Disruptions to Interdependent Economic Systems* implementa el Modelo de Entrada-Salida de Inoperabilidad (IIM) para evaluar los impactos de los eventos disruptivos en los sistemas económicos interconectados. El IIM se basa en el modelo input-output de Wassily Leontief, que es capaz de describir los efectos dominantes de las interrupciones en los sistemas interdependientes. Además de describir el impacto económico en términos financieros, la métrica de "inoperabilidad" también se usa en el IIM para cuantificar el porcentaje de producción de un sistema que se ve afectado en relación con el nivel deseado. Para analizar la magnitud y el alcance de los enlaces del sistema, se construye una matriz de interdependencia basada en el Sistema de Clasificación Industrial de América del Norte (NAICS). El estudio destaca cuatro características clave del IIM. En primer lugar, los patrones de demanda posteriores a tales eventos se modelan y analizan utilizando datos de rendimiento disponibles basados en sectores. En segundo lugar, los datos de flujo de capital basados en NAICS publicados por primera vez en 2003 por la Oficina de Análisis Económico de los Estados Unidos permiten aplicar un IIM dinámico para describir el comportamiento temporal de los impactos económicos asociados con los eventos disruptivos. En tercer lugar, se presenta una discusión sobre la utilización de otras fuentes de datos, como la confianza del consumidor para predecir las interrupciones de la demanda específicas del sistema. En cuarto lugar, se presenta una herramienta de visualización para llevar a cabo una clasificación multicriterio de los sistemas más afectados utilizando las métricas de pérdida económica y de inoperatividad. En última instancia, el estudio ofrece ideas sobre cómo describir la sensibilidad de los sistemas económicos ante diversas clases de interrupciones. Desde una perspectiva más amplia, esto puede proporcionar orientación para las actividades de formulación de políticas.

Con la información recaudada de la investigación se puede afirmar que a mayor cantidad de nodos en una red aumenta el riesgo de propagación, es decir del perjuicio después de la materialización de una falla al interior del sistema en el que se opera, además los riesgos que son adsorbidos por el sistema que son producto de acontecimientos externos a la organización que pueden llegar a ocasionar grandes pérdidas sobre un agente también tienen repercusión sobre el sistema; por otro lado la gestión de riesgos se ha enfocado tradicionalmente en la reducción de la probabilidad de eventos perturbadores y la reducción de las consecuencias potenciales que pudiese tener el evento sobre el sistema, así como una síntesis de ambos. Con la cantidad de variables endógenas y exógenas que posee el mercado nacional de energía, propone un desafío mayor además de entender y representar el sistema, este debe tener un comportamiento que simbolice de una forma fiel al mercado real o una aproximación que permita tomar decisiones sobre este; además se ha detectado la necesidad de implementar métricas que ayuden a identificar problemas próximos o futuros, que permitan tomar medidas rápidas y en periodo de tiempo corto con base en los recursos internos del sistema, una de estas métricas es la cuantificación de la resiliencia interna de un sistema, la cual determina la capacidad que tiene un sistema para volver a un estado aceptable de operación después de haberse materializado un evento adverso.

Con base en los estudios anteriores se parte en la exploración de representaciones de un sistema económico, pero la cuantificación de la resiliencia el cual es el objetivo último de la investigación no ha sido muy ampliamente estudiada, pero los primeros avances fueron dados por Jose Emmanuel Ramirez-Marquez et al. En el año 2013 presentaron un artículo titulado Resilience-based network component importance measures en donde hace referencia de los impactos significativos generalizados cuando conducen al fracaso de los componentes de la red y, en última instancia, de la red más grande provocados por eventos disruptivos, ya sean ataques malévolos, desastres naturales, accidentes provocados por el hombre o fallas comunes, exaltando la relevancia de la capacidad que tiene una red para "rebotar" a un estado de rendimiento deseado que se conoce como resiliencia, por último determinaron la resiliencia de un sistema de interconexión vial dentro de un parque, propuesto por el Hillier

y Lieberman en el libro *Introduction to operations research*. (2009). Ramírez consideran un evento destructivo sobre el sistema, materializando el riesgo sistémico; que hace que ciertas conexiones queden inoperables, asumiendo una recuperación sistémica se determina la variación de la resiliencia a través del tiempo, para un segundo ejemplo se analiza un sistema compuesto por 30 nodos y 44 interconexiones en donde recae un evento destructivo y este ejercicio se realiza para distintos puntos de materialización del evento, la cuantificación de resiliencia se basó en el componente importante de medición  $\pi_F(t_r|e_j)$  Ecuación 19 determinando el impacto potencial adverso sobre el sistema resiliente en un tiempo  $t_r$ .

Raghav Pant et al. (2014) Realiza una investigación titulada *Stochastic measures of resilience and their application to container terminals* Se discute al interior de la investigación el paradigma de modelado para cuantificar la resiliencia del sistema, principalmente como una función de la vulnerabilidad (el impacto inicial adverso del sistema de la interrupción) y la capacidad de recuperación (la velocidad de recuperación del sistema). Para tener en cuenta la incertidumbre, se introducen medidas estocásticas de resiliencia, que incluyen Tiempo hasta la restauración total del sistema, Tiempo hasta la Completa resistencia del servicio del sistema y Tiempo hasta alpha-Resiliencia. Estas métricas se aplican para cuantificar la resiliencia de los puertos de navegación interior, centros importantes en el flujo de productos básicos, y el enfoque de resiliencia portuaria se implementa en un estudio de caso basado en datos para el Puerto de Catoosa en Oklahoma. Las contribuciones en este documento demuestran un punto de partida en el desarrollo de un marco de toma de decisiones de resiliencia. Por último, analizan el mismo sistema de Hillier y Lieberman, pero en esta ocasión el evento que altera al sistema recae sobre 4 líneas de conexión diferentes de manera paralela y determinan el comportamiento sistémico de la resiliencia sobre un determinado periodo de análisis; la medición estocástica de resiliencia esta propuesta con tiempo total de restauración y tiempo alfa de resiliencia.

Hiba Baroud publica *Importance measures for inland waterway network resilience* este trabajo demuestra un paradigma dependiente del tiempo para la resiliencia

y las métricas estocásticas asociadas en un contexto de transporte fluvial. Implementamos dos medidas de importancia de componentes basadas en la resiliencia estocástica que resaltan los enlaces críticos de vías navegables que contribuyen a la resiliencia de la red de vías navegables y desarrollan un enfoque de optimización que determina el orden en que se deben recuperar los enlaces interrumpidos para mejorar la resiliencia. Un estudio de caso impulsado por datos ilustra estas métricas para describir los flujos de mercancías a lo largo de los diversos enlaces del Sistema de navegación del río Mississippi de EE. UU. en donde se analiza el sistema fluvial interno del río Mississippi en el cual se estima que se mueve alrededor de 25 millones de toneladas anuales de mercancía; en este sistema se materializa un riesgo sistémico que afecta a la red; Hilba cuantifica el impacto adverso potencial sobre la resiliencia del sistema en el momento  $t_r$  cuando la ruptura  $e_j$  (evento adverso) afecta al enlace  $i$ . Análogamente a la reducción del riesgo que vale CIM común en la literatura de ingeniería de confiabilidad, mide la contribución proporcional del enlace  $i$  al tiempo requerido para lograr la plena resiliencia del servicio de red.

Por otra parte, Raghav Pant junto a Kash Barker y Christopher W. Zobel desarrollaron la investigación que titularon *Static and dynamic metrics of economic resilience for interdependent Infrastructure and industry sectors* en este documento se aborda el problema de la estimación, cuantificación y planificación de la resiliencia económica de las infraestructuras interdependientes, donde la interconexión se suma a la complejidad del problema. Proponemos medidas estáticas y dinámicas para la resiliencia que confirman los conocidos conceptos de resistencia de robustez, rapidez, redundancia e ingenio. Las métricas cuantitativas propuestas aquí (métrica de resiliencia estática, nivel de operabilidad promediado en el tiempo, pérdida máxima de funcionalidad, tiempo de recuperación) guían un marco de toma de decisiones de preparación para promover la estimación de la resiliencia económica interdependiente. Usando las métricas, presentamos nuevas funciones de resiliencia multidimensional que permiten escenarios de asignación de recursos múltiples. A través de un problema de ejemplo, demostramos la utilidad de estas funciones para guiar la planificación de recursos para construir resiliencia, en este estudio también cuantifican la resiliencia económica para un sistema de sectores económico interdependientes de los Estados

Unidos para el año 2011, usando la metodología Input – Output para representar y miden las interconexiones; para un sistema dinámico, la resiliencia es indicativa de su capacidad para resistir los efectos de impacto inicial (como la elasticidad estática), pero también vuelve a una funcionalidad adecuada dentro de un tiempo deseable.

De las investigaciones que se han realizado hasta el momento se pueden analizar que la cuantificación resiliente, se han realizado sobre sistemas económicos globales que están compuestos por diversos mercados catalogados como predominantes al interior de una economía, adicionalmente se detalla que los estudios se han efectuado sobre una cantidad de nodos reducidos, pero nunca sobre un mercado específico y con muchos nodos de interconectividad interna, lo que exalta la importancia de la investigación propuesta en el presente trabajo, en donde la aplicación de la metodología con los ajustes necesarios para que se adapte al contexto del mercado de energía colombiano se puede catalogar como pionera; pero esta investigación parte del planteamiento de dos elementos principales que de alguna manera relacionan el problema del contexto nacional y que será abordado al interior del trabajo.

La investigación parte de la necesidad entender y aproximar un modelo conceptual con interacción interdependientes entre los actores de un mercado eléctrico colombiano con el fin de proporcionar mayor conocimiento sobre el sistema de energía nacional, su funcionamiento, el relacionamiento y que tan preparado se encuentran los agentes que influyen dentro del mercado para adsorber una perturbación, al mismo tiempo el cómo evaluar una métrica de cuantificación de resiliencia basado en un modelo estático que se ajuste al marco del trabajo, de manera que permita concluir cual es la capacidad del sistema para salir de un evento adverso; el primer aspecto exhorta a identificar modelos capaces de representar adecuadamente aspectos específicos de los actores del mercado eléctrico colombiano y el segundo aspecto lleva a determinar adecuadamente una métrica de resiliencia estática que se ajuste al este tipo de sistema.

Dada las diferentes necesidades que se deben satisfacer, que permitan conseguir una métrica integral útil de los agentes del sistema de energía, en consecuencia se plantea que la premisa principal parte de la aplicación de una métrica de cuantificación de resiliencia estática sobre el sistema construido a través de las teorías y las técnicas para la modelización conceptual y representación metodológica de interacciones interdependientes entre los agentes del mercado energético colombiano, lo que permitirá estudiar el comportamiento del mercado energético colombiano, la interacción de los diferentes componentes y proponer un modelo que permita estimar como el funcionamiento de las interacciones del mercado repercuten sobre la resiliencia del sistema. Para alcanzar la cuantificación de la resiliencia del sistema de manera óptima se debe elaborar de manera sistémica diferentes procesos que permitan progresar en la investigación de manera controlada, lo que permitirá obtener toda la información necesaria para entender y desarrollar el objetivo principal del trabajo bajo un marco estructurado y confiable.

Lo primero es sistematizar el estado del arte de la modelización conceptual y representación metodológica de interacciones aplicables a los mercados eléctricos y que se ajusten a la cuantificación de la métrica de resiliencia estática, lo cual se efectúa de manera explícita en capítulo 1 es en donde se inicia con el entendimiento de la funcionalidad del mercado de energía colombiano y se analiza cómo se va a llevar acabo la representación del sistema por medio de las relaciones matriciales del tipo Input – Output. En el capítulo 2 se profundiza en la estructura de las bases metodológicas que se aplicaran en la investigación, en este se explica las diferentes fases que se atraviesan y cada una de sus divisiones para la obtención de la cuantificación resiliente.

En el capítulo 3 se identifican cuáles son algunas de las diferentes métricas que se tienen a nivel mundial para la medición de resiliencia en un sistema, lo que permite desarrollar un modelo conceptual que contenga los principales agentes del sistema y permita comprender las interacciones entre cada uno de los agentes, en consecuencia se determinara cuáles son los agentes que se involucraran, se define la técnica de representación para el modelo propuesto con los agentes seleccionados y se realizara la evaluación y análisis de los resultados procedentes de la cuantificación de resiliencia estática en el mercado energético colombiano. Para finalizar se presentan las principales conclusiones y recomendaciones profundizar del tema de investigación.

# **1.MERCADO ELÉCTRICO, REPRESENTACIÓN DE MERCADOS Y RESILIENCIA: ESTADO DEL ARTE**

## **1.1 Mercado Eléctrico Colombiano**

El mercado eléctrico mundial ha sufrido grandes transformaciones en los últimos años, por su pretensión de llegar a aumentar la competitividad y el desarrollo pero que sea rentable para las organizaciones. Muchas economías a nivel mundial tienen grandes monopolios u oligopolios, donde el derecho de la competencia de la oferta y demanda son gobernadas por sus funcionamiento.(Krause et al., 2006)

En el estado colombiano los servicios públicos domiciliarios están sujetos a las estipulaciones legales establecidas por la constitución política de 1991 en su artículo 365, estos servicios deben ser proporcionados por el estado y estas pueden ser prestadas de manera directa o indirectamente, por organizaciones o individuos bien estructurados; en cualquier caso, el estado mantendrá el control, la regulación y el monitoreo de los servicios. (Aguilar Diaz & Diaz Velasco, 2004) (Congreso de la República de Colombia, 1991)

A principio de los 90's se inició con un análisis de los diferentes acontecimientos administrativos que acontecían en el sector energético nacional; el cual arrojó un balance muy desfavorable por parte de las empresas que participaban del mercado, lo que llevo al estado a tomar medidas políticas que frenaran la debacle del sistema que llevo a tener falta de energía, además que después de varios años de operación las empresas contaban con muchas irregularidades en términos de eficiencia administrativa, operativa y financiera. (UPME, 2015)

Las decisiones que se tomaron comenzaron por el Decreto 2119 de 1992, con el cuál se crea la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) la cual regula al

sector energético, electricidad y gas, con el fin de asegurar la adecuada calidad del servicio (Colombia. Ministerio de Minas y Energía, 1992) y se crea la Unidad de Planeación Minero Energético UPME entidad adscrita al Ministerio de Minas y Energía, la cual es regida por la Ley 143 de 1994 y por el Decreto 255 de 2004; (J. A. Botero, García, & Vélez, 2013)

En 1994 el estado promulgó la Ley 142 y la Ley 143, Ley de Servicios Públicos y Ley Eléctrica respectivamente, en las cuales se diseñó y consolidó una estructura institucional efectiva, separaron las actividades de regulación y control, y se introduce la competencia en el mercado de energía mayorista. De esta manera, se buscó alcanzar metas frente a la sostenibilidad social y económica, encarnadas en la constitución, además fundamentan en la creación de condiciones de competencia en las actividades de generación y comercialización y monopolio regulado para la transmisión y distribución. (Aguilar Díaz & Diaz Velasco, 2004)

El 20 de julio de 1995 entró en funcionamiento el Mercado de Energía Mayorista, (MEM), mediante la Bolsa de Energía y monitoreado por la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG). El objetivo del MEM es organizar a cada uno de los participantes acerca de la compra y venta de energía y así garantizar una libre competencia. (Sandoval, 2004). Otra de las características de MEM es categorizar de contratos energéticos entre los generadores y los comercializadores como activos financieros, para establecer los excedentes o escaseces resultantes de las transacciones, logrando también la cuantificación de pérdidas y beneficios frente a la demanda real, dejando las interacciones como un problema del mercado. (Manco, Botero, & Medina, 2016)

La gestión del MEM fue delegada al Administrador del Sistema de Intercambios Comerciales (ASIC), el cual se encarga de proyectar la demanda de los consumidores y el suministro de generadores. Con la información es posible realizar la programación ideal de despacho y obtener el precio en el mercado, de la intersección de la oferta y la demanda. La Centro Nacional de Despacho (CND) se encarga de la operación del sistema y en menor medida los Centros Regionales de Despacho (CRDs). El Sistema

Nacional de Transmisión (STN) establece las restricciones para el despacho ideal horario.(Cruz Rodriguez et al., 2013)

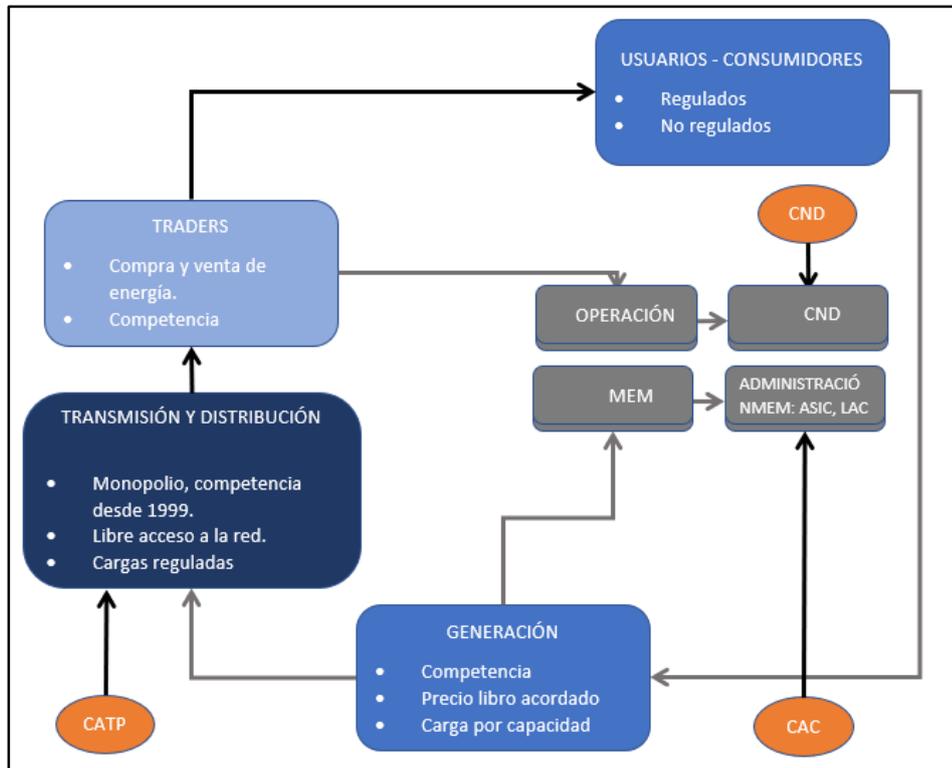
Por otra parte la autoridad delegada para desarrollar proyectos asociados a los planes de planeación integral, indicativa, constante y coordinada de las entidades del sector minero energético (públicas como privadas), del mercado energético, que está en línea con los planes nacionales de desarrollo, es la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) También es responsable de registrar los proyectos de generación y transmisión, evaluar los conceptos de viabilidad técnica y financiera, los planes de futuros para la conexión a la STN y participar activamente en las decisiones encabezadas por el Ministerio de Minas y Energía ante el cumplimiento de Orden constitucional. (Cruz Rodriguez et al., 2013)

La vigilancia y supervisión de las organizaciones participantes en el mercado energético se delega a la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (SSPD), quien tiene el poder para castigar e intervenir las empresas que violen de manera reiterada las normas establecidas. (Sandoval, 2004) En la Figura 1 se observan las entidades que producen la energía, transportan, comercializan, las que supervisan a todas las anteriores, las que reglamentan las políticas generales, las que regulan las normas para la buena calidad del productos a un precio aceptable y las que monitorean que todos cumplan las normas.



**Figura 1** Estructura global del sector energético colombiano  
Fuente: Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG)

En la Figura 2 se esquematiza la operación del mercado eléctrico, indicando la estructura de la industria y la forma como la interacción de los agentes y/o entidades participantes:



**Figura 2 Estructura operacional del mercado eléctrico**  
Fuente: Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG)

Donde:

- ASIC: Administrador del Sistema de Intercambios Comerciales
- CND: Centro Nacional de Despacho
- CON: Centro Nacional de Operación
- CAC: Comité Asesor de Comercialización
- CAPT: Comité Asesor de Planeamiento de la Transmisión
- LAC: Liquidador y Administrador de Cuentas del STN
- MEM: Mercado Mayorista De Electricidad

## 1.2 Operación del mercado eléctrico colombiano

La operación de los mercados eléctricos es « la más compleja máquina nunca antes inventada » (Amin, 2003). Durante las últimas dos décadas, se ha experimentado un proceso mundial de reestructuración de las instalaciones de energía eléctrica y desnacionalización de los mercados de servicios basados en estos servicios. Este proceso transforma a la industria de monopolios de la electricidad que se encontraban verticalmente integrados a diversas compañías autónomas y reemplaza el mercado centralizado de costos a la competencia basada en la oferta y la demanda. El principal objetivo de esta reforma es promover la conservación de energía y tecnologías de energía alternativa y reducir el consumo de petróleo y gas a través de la mejora tecnológica y las regulaciones (Federal Energy Regulatory Commission, 2005)

En este marco de referencia, se estimuló la participación de cuatro tipos de agentes: generadores, transportadores, distribuidores, comercializadores y consumidores. (Vargas, Luis; Palma, Rodrigo; Moya, 2001) En la Figura 3 se observan los agentes que intervienen en el mercado mayorista de energía colombiano, además de indicar cuales son las agencias que encargadas de la operación y administración de la red.



Figura 3 Funciones del mercado eléctrico operador en Colombia

Fuente: xm

Los agentes tienen diferentes funciones y roles dentro del mercado de energía, a continuación, se presenta el concepto para cada uno de los agentes.

**Generadores:** Representa las empresas generadoras de la red y corresponde a las empresas propietarias de las centrales térmicas e hidroeléctricas convencionales que son los proveedores en un MEM. (Vargas, Luis; Palma, Rodrigo; Moya, 2001) En el mercado mayorista, todos los generadores venden su electricidad a través de un mercado de subastas o contratos bilaterales (Comisión de Regulación de Energía y Gas - Creg, 2006). Los generadores deben establecer el calendario de generación de energía diaria, planificar su expansión de capacidad y hacer frente a posibles problemas asociados con la producción de electricidad, como emisiones de CO<sub>2</sub>. (Macias & Andrade, 2014)

**Comercializadores:** Son agentes intermediarios de energía eléctrica los cuales compran la energía eléctrica en el MEM y su posterior venta a los demandantes a los usuarios finales, regulados (Consumo inferior al 0.1 MW), no regulados o ambos. (Sandoval, 2004)

**Transmisión:** Se refiere a las empresas de transmisión que operan en niveles de tensión especificados ya que tienen prohibido participar en la comercialización o en la generación por el monopolio de la operación. Transportan energía eléctrica desde los centros de generación a los de consumo. (Pastrana, Guzmán, & Ovalle, 2005)

**Distribución:** Son las empresas encargadas del transporte de la energía dentro de los diferentes sistemas de distribución. Estos sistemas de distribución corresponden a sistemas de transmisión regional los cuales se centran en el nivel de tensión menores a 220 kV.

**Clientes:** Los consumidores cierran el ciclo dada su posición final de demanda de la energía producida. Son personas naturales o grupo de personas que solicitan

este producto para su operación o para las actividades, por lo que el consumidor determina las fluctuaciones en la oferta de acuerdo al comportamiento de la economía.(Manco et al., 2016)

### **1.3 Representación De Mercados Matriz De Input - Output (I-O)**

El desarrollo del moderno análisis input-output (Insumo – Producto) recae sobre Vasily W. Leontief (1985), quien definió el método como “una adaptación de la teoría neoclásica del equilibrio general al estudio de la interdependencia cuantitativa que existe entre aquellas actividades económicas que guardan entre sí una relación recíproca” (Chraki, 2016)

Leontief propuso un modelo de sistemas de ecuaciones lineales cuyos agentes deben tener significado económico es decir no deben ser negativos. Este modelo I-O divide al sistema en  $n$  agentes, en tanto que la producción bruta efectiva se define como  $X_n$ . Debido a que la matriz de Leontief es un análisis de los flujos inter-agentes, estos se denotan como  $X_{ij}$ ; de igual forma,  $X_{ij}$  representa la cantidad de producto del agente  $i$  consumida por el agente  $j$  y  $X_{(in)}=0$  para los sectores que no demanden como insumo el producto del sector  $i$ .(Costa, Tavares de Araújo, Fernandes Bezerra, & Virginio Melo, 2005)

No todo el producto se destina a los agentes con quien interactúa, una parte de la producción se destina a una demanda final, el cual puede ser:

- Consumo individual o privado.
- Consumo público.
- Formación bruta de capital fijo.
- Variación de existencias y adquisiciones menos cesiones de objetos valiosos.

Se hace una abstracción con agentes organizados en una tabla input-output, donde se recogen las relaciones inter-agentes para un periodo determinado.(Ramírez, 1992)

**Tabla 1 Esquema de una tabla Input - Output**

	Agentes como consumidores	Demanda Final	Output Total
Agentes	$X_{(ixj)}$	$D_{(ixs)}$	$X_{(ix1)}$
Inputs primarios	$V_{(kxj)}$		
Inputs Totales	$X_{(1xj)}$		

Fuente: Adaptado de (Navarro Gálvez, 2012)

Desagregando lo que corresponde a las filas de la matriz de I – O se podría obtener de manera clara los componentes que influyen en el output total para cada uno de los agentes, como lo muestra la Tabla 2.

**Tabla 2 I-O De n sectores**

Output Total	Agentes como consumidores	Demanda
$X_1$	$Z_{11} \quad Z_{12} \quad Z_{13} \quad Z_{1n}$	$D_1$
$X_2$	$Z_{21} \quad Z_{22} \quad Z_{23} \quad Z_{2n}$	$D_2$
$X_3$	$Z_{31} \quad Z_{32} \quad Z_{33} \quad Z_{3n}$	$D_3$
$X_n$	$Z_{n1} \quad Z_{n2} \quad Z_{n3} \quad Z_{nn}$	$D_N$

Fuente: Elaboración propia

Se deduce que la producción total efectiva de un agente es igual a la suma de flujos de los agentes con los que interactúa más la demanda final para ese mismo sector, obteniendo así que:

$$\sum_{i=1}^n \left[ \sum_{j=1}^n Z_{ij} + \sum_{j=1}^n D_{ij} \right] = X_i \tag{Ecuación 1}$$

La matriz de insumo-producto describe los flujos entre los distintos agentes para un periodo establecido y ofrece información que puede ser de utilidad para ciertos propósitos, pero aún no ofrece ningún contenido del orden analítico. Para ello, se debe

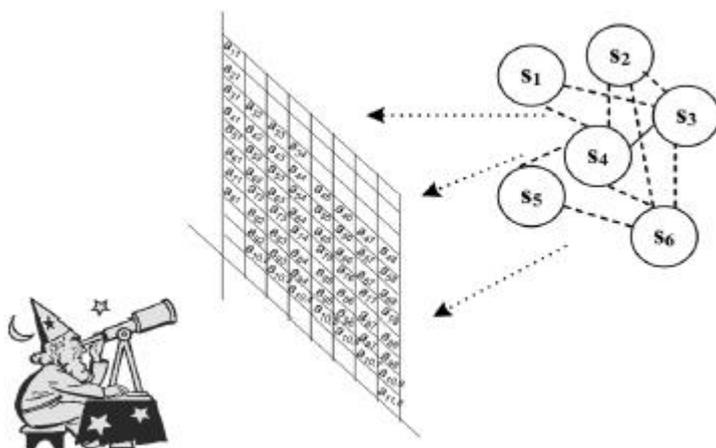
transformar toda esta información en un modelo analítico de insumo-producto por lo que se debe definir los coeficientes técnicos de producción o los también llamados coeficientes de requerimientos directos, estos son denotados por  $a_{ij}$  y su manera de cálculo es la dividiendo  $Z_{ij}$  del cuadro de transacciones inter-agentes por  $X_i$ , que es la producción bruta del agente que compró tal insumo (Avalos, 2011):

$$a_{ij} = \frac{Z_{ij}}{X_i} \tag{Ecuación 2}$$

Después de calculados los factores para cada uno de los agentes se podría reagrupar toda la información en una nueva matriz de  $n$  filas por  $n$  columnas, la cual se denomina o conoce como matriz de requerimientos técnicos (González Veiga & Rodríguez Uría, 1995):

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix} \tag{Ecuación 3}$$

La matriz  $A$  es una proyección de interdependencias reales en una matriz de factores que capturan proporciones lineales de los requisitos actuales de producción de equilibrio. Figura 4 ilustra esta proyección.



**Figura 4 Ilustración conceptual de la matriz técnica A**

Fuente: Adaptado de (Sharman & Yassine, 2004)

Se supone que estos coeficientes son fijos e independientes del nivel de producto de cada uno de los sectores industriales:

$$X = AX + D \quad \text{Ecuación 4}$$

Reemplazando la Ecuación 2 en la Ecuación 4 se obtiene

$$X_i = \sum_j a_{ij}x_j + D_i \quad \text{Ecuación 5}$$

En donde se supone que cada agente produce un producto, para la investigación el producto se asocia a la salida de cada uno de los agentes que se encuentran en la matriz; el modelo económico de insumo - producto explica como la oferta y la demanda se encuentran en equilibrio para una economía que consiste en sectores o agentes en interacción (Puchet Anyul & Punzo, 2001), pero la estimación interdependiente de la resiliencia económica requiere primero un modelo de evaluación de la interrupción interdependiente. Es por esto que se debe acudir a utilizar modelos que son derivados del modelo económico de insumo-producto (Bruneau et al., 2003), como el modelo de economía de Wassily Leontief presenta equilibrio económico y es capaz de describir el grado de interconexión lógica entre varios sectores de la economía (Crowther & Haines, 2005), uno de estos es el modelo de insumo-producto de inoperabilidad se denomina IIM el cual se basa en la estructura básica de Leontief, que combina los supuestos de proporcionalidad y el balance de salida que definen una economía en equilibrio (Santos, 2005) en la inoperatividad se propaga a través de los agentes interconectados (Santos & Haines, 2004).

Desde el IIM, los analistas de interdependencia pueden estimar la alteración de propagación de un evento que causará inoperabilidad y pérdidas económicas debido a que (i) los usuarios no pueden recibir suministros (por ejemplo, los usuarios no pueden recibir energía durante un corte de energía) y (ii) la incapacidad de los proveedores para satisfacer las demandas (por ej., la compañía eléctrica no puede suministrar electricidad cuando la red eléctrica está deshabilitada).(Crowther & Haines, 2005)

La IIM es utilizada en condiciones de análisis de interdependencia para evaluar el impacto económico directo e indirecto. La estructura del modelo es el siguiente:

$$q = A^* q + D^* \quad \text{Ecuación 6}$$

Dónde:

- $q$  es el vector que expresa la inoperancia en términos de pérdidas económicas normalizadas.
- $A^*$  es la matriz de interdependencia que indica el grado de acoplamiento del agente industrial.
- $D^*$  es el vector de la perturbación en la demanda expresada en términos de normalización degradado la demanda final.

Para normalizar el vector de la inoperancia “ $q$ ” en términos de las pérdidas económicas se realiza de la siguiente manera:

$$q = [Diag(\hat{x})]^{-1} [\hat{x} - \tilde{x}] \quad \text{Ecuación 7}$$

Dónde  $\hat{x}$  es la producción planificada y  $\tilde{x}$  la reducción de la producción. Si esta inoperancia “ $q$ ” se representa en términos de sus elementos escalares quedaría de la siguiente manera:

$$q_i = \frac{\hat{x}_i - \tilde{x}_i}{\hat{x}_i} \quad \text{Ecuación 8}$$

$$0 \leq q_i \leq 1$$

Para matriz interdependencia  $A^*$  está relacionado con la matriz tecnológica de Leontief  $A$  y el vector de producción planificada  $\hat{x}$ . Una representación escalar del elemento  $A^*$  se trata de la siguiente manera:

$$A^* = [Diag(\hat{x})]^{-1} [A][Diag(\hat{x})] \quad \text{Ecuación 9}$$

La perturbación en la demanda  $C^*$  se define como la degradación en la demanda final, y se determina así:

$$D^* = [Diag(\hat{x})]^{-1} [\hat{D} - \tilde{D}] \quad \text{Ecuación 10}$$

También puede ser expresada de la siguiente manera:

$$D_i^* = \frac{\hat{D}_i - \tilde{D}_i}{\hat{x}_i} \quad \text{Ecuación 11}$$

$$0 \leq D_i^* \leq \frac{\hat{D}_i}{x_i}$$

Remplazando todo en la Ecuación 6 se obtiene:

$$\begin{aligned} & [Diag(\hat{x})]^{-1} [\hat{x} - \tilde{x}] \\ & = [Diag(\hat{x})]^{-1} [A][Diag(\hat{x})][Diag(\hat{x})]^{-1} [\hat{x} - \tilde{x}] \quad \text{Ecuación 12} \\ & + [Diag(\hat{x})]^{-1} [\hat{D} - \tilde{D}] \Rightarrow q = A^*q + D^* \end{aligned}$$

Partiendo de este sistema de ecuaciones, la conocida solución del modelo IO, expresada en forma matricial, viene dada por:

$$q = (I - A^*)^{-1} D^* \quad \text{Ecuación 13}$$

Para que tenga sentido económico, interesa que la solución de la Ecuación 13 sea positiva;  $(I - A^*)^{-1} \equiv L$  expresa la matriz inversa de Leontief que se conoce, cuyo elemento característico  $l_{ij}$  indica la cantidad de output producido por el agente  $i$  por cada aumento unitario de la demanda final del agente  $j$ . Lo que quiere decir que recoge todos los efectos directos e indirectos que tiene sobre cada uno de los agentes del aumento en una unidad de la demanda final del agente  $j$ .(Navarro Gálvez, 2012)

## 1.4 Resiliencia

El termino resiliencia tiene su origen en el latín, más explícitamente de la palabra resilio, cuyo significado es volver atrás de un salto, en los diccionarios actuales denota su concepto a la resistencia de un cuerpo al maltrato físico o la capacidad de un material de recobrar su forma inicial después de haber sido sometido a una fuerza que le generase una deformación; esta definición procede inicialmente de la física e ingeniería civil pero con el pasar del tiempo se ha ido introduciendo a distintas área de conocimiento. (Becoña, 2006)

El problema que se presenta con la resiliencia es la vaguedad de su definición, ya que no hay unanimidad en su concepto, sin embargo se asume que implica recuperación y una efectiva respuesta al riesgo o a la adversidad (Luthar, Sawyer, & Brown, 2006), la resiliencia se refiere a «un proceso dinámico que comprende la adaptación positiva dentro de un contexto adverso significativo» (Luthar, Cicchetti, & Becker, 2000), «la habilidad de una entidad o sistema en retornar a condiciones normales después de la ocurrencia de un evento negativo que altera su estado» (Mitchell, Mannan, & Tareja, 2007).

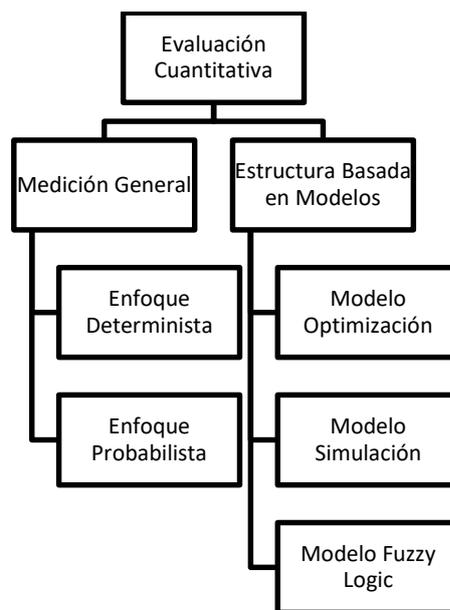
Resiliencia es un concepto que se ha trabajado en diferentes áreas del conocimiento en donde cada una de ella presenta su propia definición, a continuación, se presenta las definiciones para 4 áreas (TOSE por sus siglas en inglés):

1. Dominio Organizacional: La habilidad de una organización de absorber la tensión y enfrentar los cambios que aparecen como acontecimientos que producen crisis repentinas.(Vogus & Sutcliffe, 2007).
2. Dominio Social: Es la capacidad de predecir un riesgo, restringir sus consecuencias adversas y retornar rápidamente a través de la supervivencia, adaptándose y creciendo de cara a cambios de turbulencia. (Rose, 2009)
3. Dominio Económico: La capacidad de reconfigurar y adaptar su estructura (empresas, industrias, tecnologías, instituciones) a fin de mantener una senda de crecimiento aceptable en la producción, el empleo y la riqueza a través del tiempo.(Martin, 2012)

4. Dominio Ingeniería: La capacidad de un sistema para sostener las interrupciones externas e internas sin discontinuidad de la realización de la función del sistema o, si la función se desconecta, para recuperar completamente la función rápidamente. (Standard, Hazards, Education, & Draft, 2010).

## 1.5 Evaluación de la resiliencia

La evaluación de la resiliencia se desarrolla de manera cualitativa y cuantitativa (Tinker & Sadler, 2014) para esta investigación se centra el enfoque que brinda la mediciones cuantitativas, esta tipo de evaluación numérica se descompone de la siguiente manera:



**Figura 5 Estructura del enfoque de la evaluación Cuantitativa**

Fuente: Propia

## 1.6 Medición General

Las medidas generales de resiliencia proporcionan una respuesta que permite analizar y evaluar la resistencia de un sistema al cuantificar el rendimiento; las métricas de medición de la resiliencia genéricas definen la capacidad de recuperación mediante la comparación del desempeño del sistema antes y después de materialización

de un evento perturbador, sin concentrarse en las características específicas del sistema (aunque el rendimiento de modelado puede requerir la comprensión del comportamiento del sistema subyacente).(Hosseini, Barker, & Ramirez-marquez, 2016)

El enfoque cuantitativo de la resiliencia se podría agrupar de la siguiente manera:

- **Determinístico vs. Probabilístico:** El enfoque determinístico se apoyado en el rendimiento y no incorpora la incertidumbre dentro de la propuesta de métrica, mientras que un enfoque basado en el rendimiento probabilístico captura la estocasticidad (Que está sometido al azar y que es objeto de análisis estadístico.) asociada con el comportamiento del sistema.(Hosseini et al., 2016)
- **Dinámico vs. Estático:** el enfoque apoyado en el rendimiento dinámico representa el comportamiento que es dependiente del tiempo, mientras que el enfoque basado en el rendimiento estático está libre de medidas dependientes del tiempo de resiliencia.(Hosseini et al., 2016)

Cuando se habla de resiliencia hacemos referencia a las propiedades que esta tiene consigo las cuales son características fundamentales para que el sistema contenga una medida más aproximada del sistema.(Zobel, 2010)

- **Robustez:** Es la fuerza o la capacidad de los elementos, sistemas y otras unidades de análisis para resistir un determinado nivel de estrés o demanda sin sufrir degradación o pérdida de función.(Zobel, 2011)
- **Redundancia:** Es la medida en que existen elementos, sistemas u otras unidades de análisis que son sustituibles, es decir, capaces de satisfacer requisitos funcionales en caso de interrupción, degradación o pérdida de funcionalidad.(Bruneau et al., 2003)
- **Recurso:** Se define como la capacidad de identificar problemas, establecer prioridades y movilizar recursos cuando existen condiciones que amenazan con interrumpir algún elemento, sistema u otra unidad de análisis. La ingenuidad puede ser conceptualizada como consistente en la capacidad de aplicar mate-

riales (es decir, monetarios, físicos, tecnológicos e informativos) y recursos humanos para cumplir con las prioridades establecidas y alcanzar metas. (Luthar et al., 2000)

- Rapidez: Es la capacidad de cumplir las prioridades y lograr los objetivos de manera oportuna para contener las pérdidas y evitar futuros trastorno. (Mitchell et al., 2007)

### 1.6.1 Enfoque determinista Estático

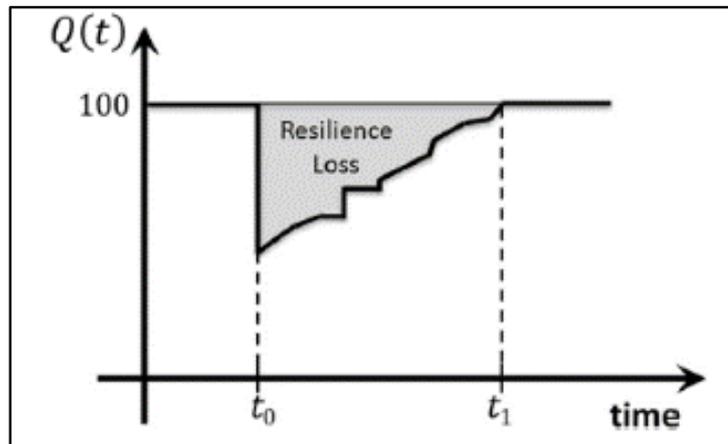
La cuantificación de la resiliencia nace desde la ingeniería civil en donde se propone la Ecuación 14 el cual es un modelo estático de medición para la cuantificación de la resiliencia; se toma 100 como referencia es decir el sistema antes del evento  $t_0$  y se compara con el mismo sistema después de la interrupción  $Q(t)$  (representa la calidad de la infraestructura del sistema en un momento dado  $t$ ). (Uday & Marais, 2015)

$$RL = \int_{t_0}^{t_1} [100 - Q(t)] dt$$

Ecuación 14

RL indica la resiliencia del sistema y es directamente proporcional al tiempo, lo que indica que a menor tiempo el indicador será menor. Este método es aplicado de manera general. (Bruneau et al., 2003); esta aproximación se dificulta cuando se trata de determinar cuál es el 100% del sistema antes de la afectación, además que se asume que los esfuerzos de recuperación comienzan inmediatamente. (Nicholson & Ramirez-Marquez, 2015)

En teorías disponibles, el tiempo de recuperación se aproximaría asintóticamente a cero. Prácticamente, incluso en presencia de enormes capacidades financieras y laborales, dado que existen las limitaciones humanas las cuales dictarán un tiempo mínimo práctico para la recuperación. (Bruneau & Reinhorn, 2007)



**Figura 6 Medición de Pérdidas de Resiliencia del Triángulo de Resiliencia**

Fuente: (Hosseini et al., 2016)

En la Figura 6 se ilustra la calidad de la infraestructura del sistema planificada  $Q(t)$  un momento dado  $t$ , comparada con la infraestructura degradada durante un periodo de recuperación. RL se evidencia en la zona sombreada. El eje vertical se puede considerarse que representa el nivel de robustez del sistema dado y el eje horizontal como representando la rapidez de recuperación asociada. (Bruneau & Reinhorn, 2007)

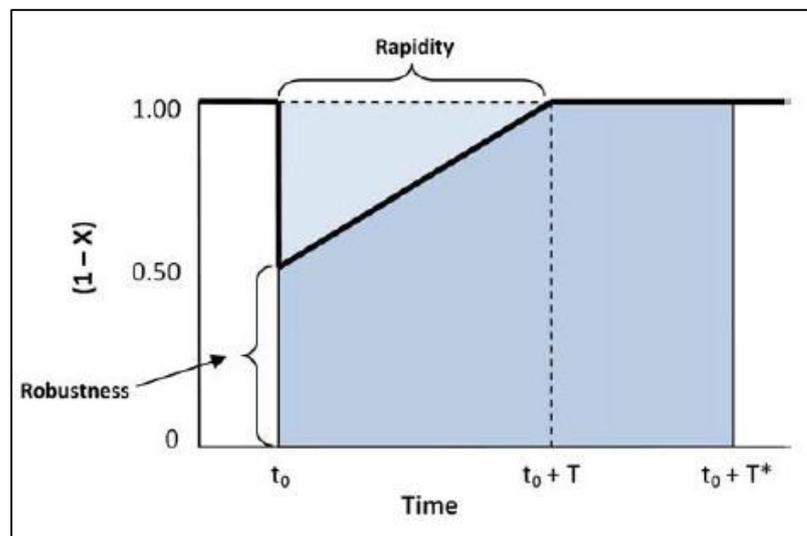
Los dos factores faltantes, “recurso y redundancia”, se consideran generalmente como los "medios" por los cuales se puede mejorar la resiliencia ante desastres y los "fines" correspondientes se miden típicamente por el impacto de tales mejoras en los dos primeros factores, robustez y rapidez (Bruneau et al., 2003).

Otras de las metodologías de cuantificación de resiliencia que se basa en la determinación de un área triangular es la propuesta por Zobel (Zobel, 2011), quien propone una métrica especificada calculando el porcentaje del posible total de pérdidas en un determinado intervalo de tiempo, la medición se lleva a cabo basado en la siguiente ecuación:

$$R(X, T) = \frac{T^* - \frac{XT}{2}}{T^*} = 1 - \frac{XT}{2T^*} \quad \text{Ecuación 15}$$

$R \in [0, 1]$  es el porcentaje de funcionalidad después de un evento destructivo  $T \in [0, T^*]$  tiempo requerido para que el sistema quede totalmente funcional  $T^*$  es el intervalo de tiempo con que se pierde una determinada funcionalidad

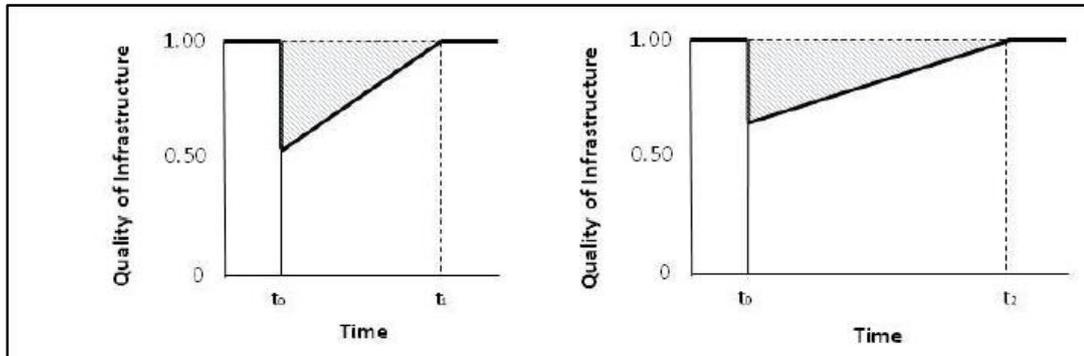
Debido a la definición original de RL, dada en la Ecuación 14, representa el área entre la curva  $Q(t)$  y la recta  $Q = 100$ , se crea una aproximación simple a su valor calculando el área del triángulo real formado por (1) la caída inicial en la funcionalidad y (2) el tiempo correspondiente a la recuperación (representado por las líneas de puntos en la Figura 7), como sugiere la obra de (Cimellaro, Reinhorn, & Bruneau, 2010).



**Figura 7 Una reinterpretación del triángulo de resiliencia**  
Fuente:(Zobel, 2011)

Sin embargo, es importante examinar la resiliencia que se mide cómo un solo número y que representa una función del área del triángulo de resiliencia, porque diferentes combinaciones de pérdida inicial y tiempo de recuperación pueden corresponder exactamente al mismo nivel de resiliencia. La resiliencia calculada de esta forma depende del producto escalado de estos dos factores, por ejemplo, una construcción que soporta una pequeña pérdida inicial pero que tiene un tiempo muy prolongado para recuperarse podría tener la misma medida de resiliencia que una pérdida significativa, pero con una rápida recuperación (véase la Figura 8). Estos dos acontecimientos representan situaciones muy diferentes, sin embargo, para un individuo que es tomador de decisiones puede tener una preferencia relativa de uno de estos dos

escenarios sobre el otro. En tal caso, sería deseable poder distinguir claramente entre el valor relativo de los dos escenarios para ese decisor particular. (Zobel, 2010)



**Figura 8 Dos triángulos con la misma resiliencia calculada, diferentes proporciones**  
 Fuente: (Zobel, 2010)

Para las métricas propuestas hasta el momento se asume que la recuperación se realiza de manera lineal lo que no ocurre en muchos sistemas, pero debido a su practicidad se calcula en muchas ocasiones como punto de partida. (Zobel & Khansa, 2014).

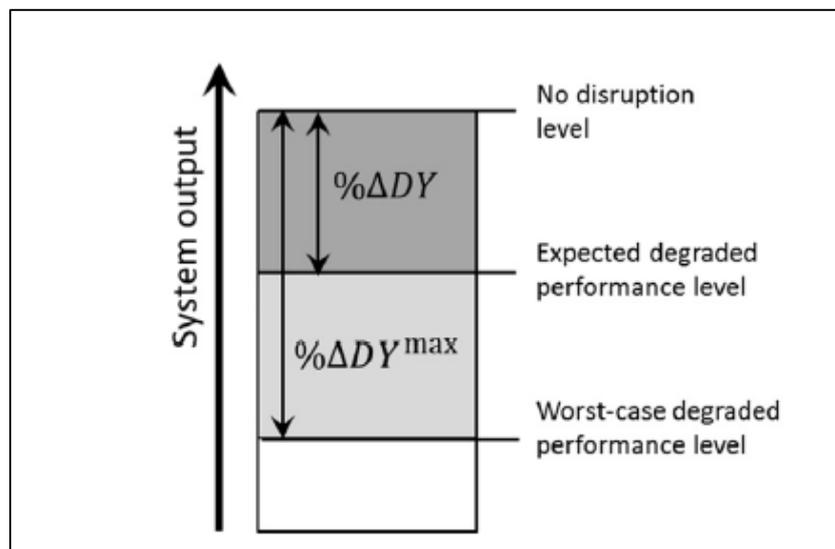
La medición que se ha desarrollado para cuantificar la resiliencia en los mercados se basa en modelos que fueron planteados para el área de la economía, esta metodología se define como la capacidad de recuperación económica estática directa (DSER por sus siglas en inglés static economic resilience), la cual se refiere al nivel de la empresa individual o industria y corresponde a lo que los economistas denominan " equilibrio parcial " análisis, o la operación de una misma entidad comercial o doméstica. (Rose, 2009)

$$DSER = \frac{\% \Delta DY^m - \% \Delta DY}{\% \Delta DY^m} = \text{Ecuación 16}$$

La métrica se representa en la Ecuación 16 en dónde  $\% \Delta DY^m$  es la diferencia entre el estado estable del sistema y el peor caso de materialización de un evento interrumpiendo el rendimiento del sistema y  $\% \Delta DY$  es la diferencia entre el estado estable del sistema y el evento de perturbación, puede ser difícil estimar el nivel de

rendimiento degradado esperado, especialmente para las interrupciones desconocidas, porque la profundidad, el ancho, y la intensidad de las interrupciones desconocidas pueden no ser precisamente estimable; En esencia DSER es el porcentaje que se podría evitar de la perturbación económica máxima que un determinado shock y se clasifica como un modelo estático determinista.(Rose, 2007)

Estos análisis utilizan como la medida de DSER la desviación de la relación de proporcionalidad lineal entre la interrupción de servicios públicos porcentaje y el porcentaje de reducción en la producción del cliente.(Rose, 2009)



**Figura 9 Cuantificación de la Resistencia Estratégica Estática**  
Fuente:(Hosseini et al., 2016)

La pérdida de efecto de reducción de la reparación y reparación acelerada del capital social de la forma en que la inversión se convierte en un insumo importante en la formulación como las prácticas habituales.

Whitson y Ramírez-Márquez redefine una medida de resiliencia estática interdependiente, con un concepto similar a la Ecuación 16 y lo presenta en la Ecuación 17. Donde  $q_{i,max}$  Es la máxima inoperabilidad posible que se podría experimentar después de un evento disruptivo. La resiliencia estática para el sector  $i$  se refiere a la convención  $\mathcal{R}_i^S$ , adoptando la notación  $\mathcal{R}$  de Whitson y Ramírez-Márquez como  $R$  a menudo se refiere a la fiabilidad (Pant, Barker, & Zobel, 2014)

$$\mathcal{R}_i^S = \frac{q_{i,max} - q_i}{q_{i,max}}$$

Ecuación 17

Definida para el agente de la industrial *i*, una métrica de resiliencia económica interdependiente, dónde *q<sub>i</sub>* captura la interdependencia entre los diferentes agentes del sistema, esta sinergia se debe establecer en términos económicos.

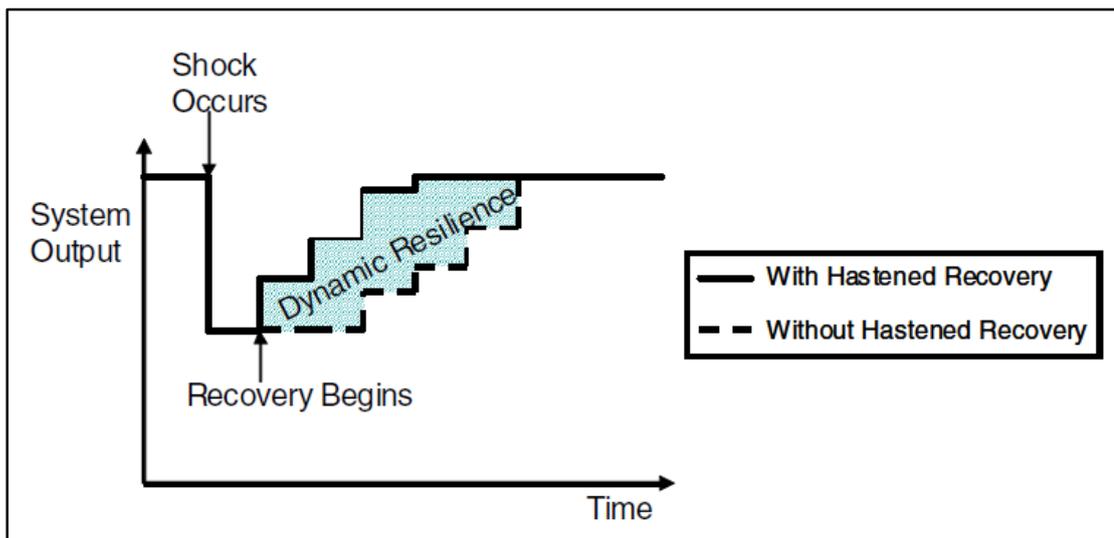
### 1.6.2 Enfoque determinista Dinámicos

Rose (2007) incorpora los aspectos dependientes del tiempo de la recuperación del sistema en su enfoque para medir la resiliencia económica dinámica.

La medición de DR es función de la salida del sistema con recuperación acelerada SOHR y la salida del sistema sin recuperación acelerada SOWR durante *N* periodos de tiempo de recuperación en la Figura 10 se observa como es el comportamiento de la función con respecto al tiempo (Vugrin, Warren, Ehlen, & Camphouse, 2010).

$$DR = \sum_{i=1}^N SO_{HR}(t_i) + SO_{WR}(t_i)$$

Ecuación 18



**Figura 10 Resiliencia económica dinámica**

Fuente: (Vugrin et al., 2010)

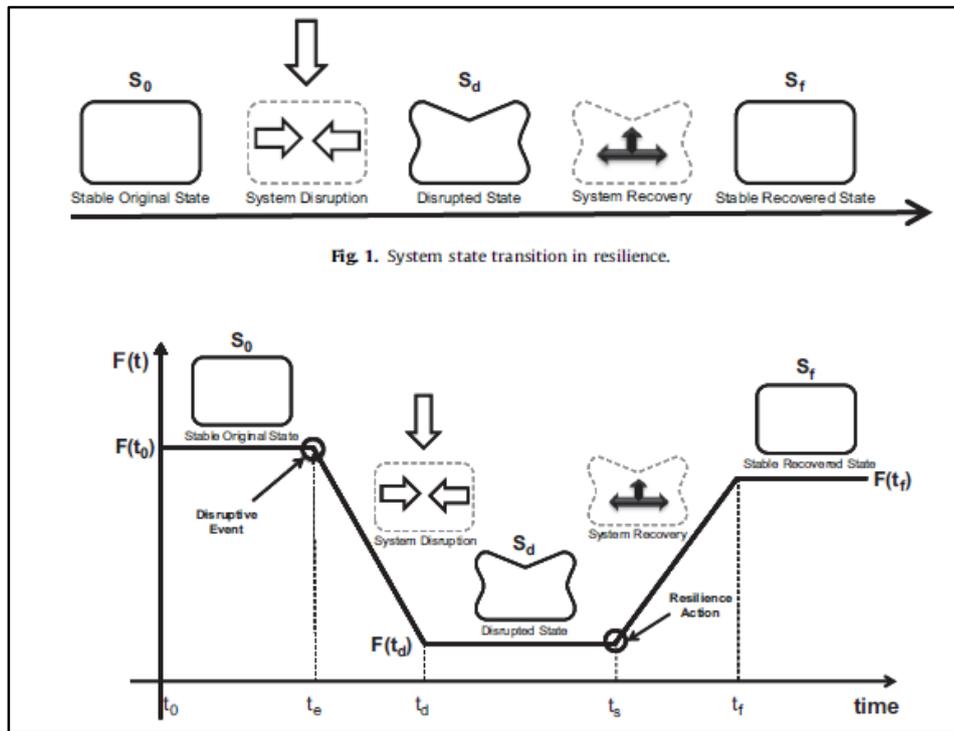
Otra métrica para resiliencia es la propuesta por Henry & Emmanuel Ramirez-Marquez la cual es muy útil para evaluar la tolerancia a fallos de una red dada (es decir, al analizar una red), así como en la elección de una topología de red apropiada y / o una distribución óptima de servicios a través de la red (es decir, al diseñar la red).(Rosenkrantz, Goel, Ravi, & Gangolly, 2009)

Desarrollaron una métrica de resiliencia dependiente del tiempo que cuantifica la resiliencia como la razón de recuperación a pérdida. Dado que el rendimiento del sistema en un punto en el tiempo se mide con el rendimiento  $\alpha_F(t_r|e_j)$ , tres estados del sistema que son importantes en la cuantificación de la resiliencia se representan en la Figura 11:

$$\alpha_F(t_r|e_j) = \frac{F(t_r|e_j) - F(t_d|e_j)}{F(t_0) - F(t_d|e_j)} \quad \text{Ecuación 19}$$

Sea  $\alpha_F(t)$  la resiliencia de un sistema en el tiempo  $t$ . La forma básica,  $\alpha_F(t)$  representa la relación de recuperación en el tiempo  $t$  con respecto a la pérdida sufrida por el sistema dado un evento adverso en algún momento anterior  $t_d$ . (Barker, Ramirez-Marquez, & Rocco, 2013). Esta fórmula básica está basada en el concepto de "resiliencia ingenieril", y es indicativo de la capacidad de un sistema para "rebotar" - esta relación muestra que, si la recuperación es igual a la pérdida, entonces el sistema es totalmente resistente  $\alpha_F(t) = 1$ , y si no hay recuperación, entonces no se exhibe resistencia. Sin embargo, los parámetros de la Ecuación 19 necesitan ser definidos adicionalmente para formular un enfoque cuantitativo consistente.(Henry & Emmanuel Ramirez-Marquez, 2012)

$$\alpha_F(t) = \frac{\text{Recuperación}(t)}{\text{Pérdidas}(t)} \quad \text{Ecuación 20}$$



**Figura 11 Sistema de estados de Transición y función de entrega en resiliencia.**

Fuente: (Henry & Emmanuel Ramirez-Marquez, 2012)

## **2.METODOLOGÍA PROPUESTA**

Los mercados eléctricos han sido un aliciente para el desarrollo de múltiples investigaciones que involucran el conocer, implementar y evaluar distintos eventos como el proceso de toma de decisiones y sus efectos en el desempeño del mercado. En esta tesis se plantea una metodología para abordar el tema de modelación y representación del mercado eléctrico colombiano con el fin de obtener información del comportamiento del sistema después de haber sufrido la materialización de un evento adverso, y cuantificar cual es la resiliencia, esta metodología se hace desde la premisa de la aproximación ya que la complejidad de las variables, de sus interacciones internas y externas, limitan la robustez del modelado y su representación.

La orientación metodológica propuesta para enfrentar estos problemas se realiza a través de tres fases que permitirá aproximar la cuantificación de resiliencia del mercado ante eventos adversos. La primera fase se designa como “Modelación” que arroja la creación de un modelo conceptual del problema. La segunda fase se denota como “Representación” que permite observar y evaluar el desempeño del sistema, logrando identificar las interacciones entre los diferentes agentes del sistema, y por último la tercera fase en la cual se calculara la resiliencia bajo una métrica establecida desde la bibliografía, tomando como base el problema propuesto en el modelo de la etapa anterior.

### **2.1 Fase de Modelación**

Esta fase de modelización tiene como objetivo principal identificar el problema y desarrollar un modelo conceptual del mismo. Primeramente, las características del sistema en estudio se deben utilizar para definir el contexto del modelo conceptual y enmarcar los límites. Las consideraciones del mercado energético colombiano real se deben describir. Por último, el modelo conseguido permitirá la creación aproximada del modelo conceptual que definirá cuáles son los datos ya sean económicos y técnicos del mercado, luego en base a esta estructura se definirá si se hará una minimización de costos o maximización de beneficios y esto se modelará a través de técnicas

matemáticas. En la Figura 12, el primer paso que se define es identificar el problema de estudio, seguido de dos bloques para crear el modelo y como resultado se tendrá el modelo a trabajar.

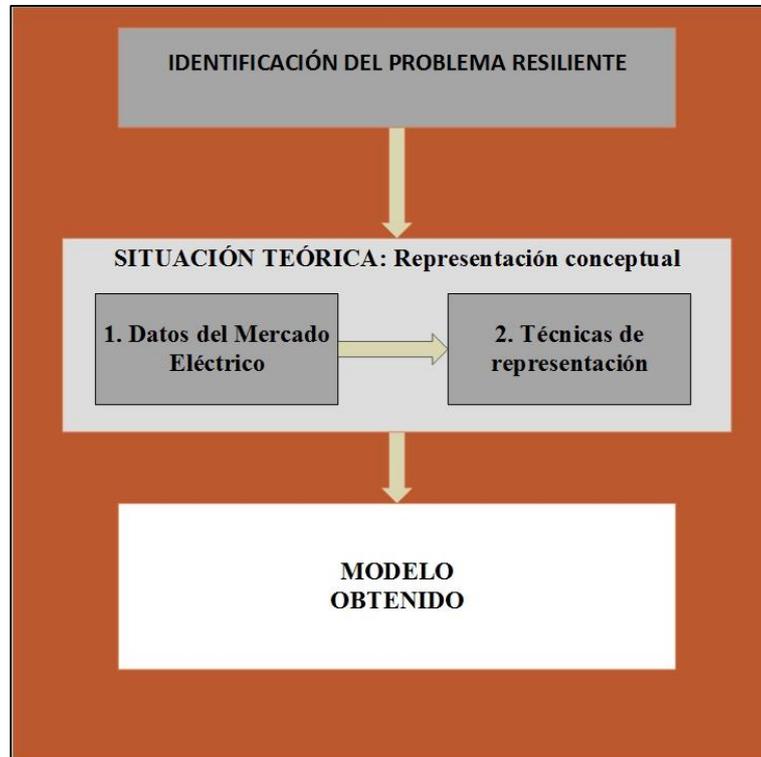
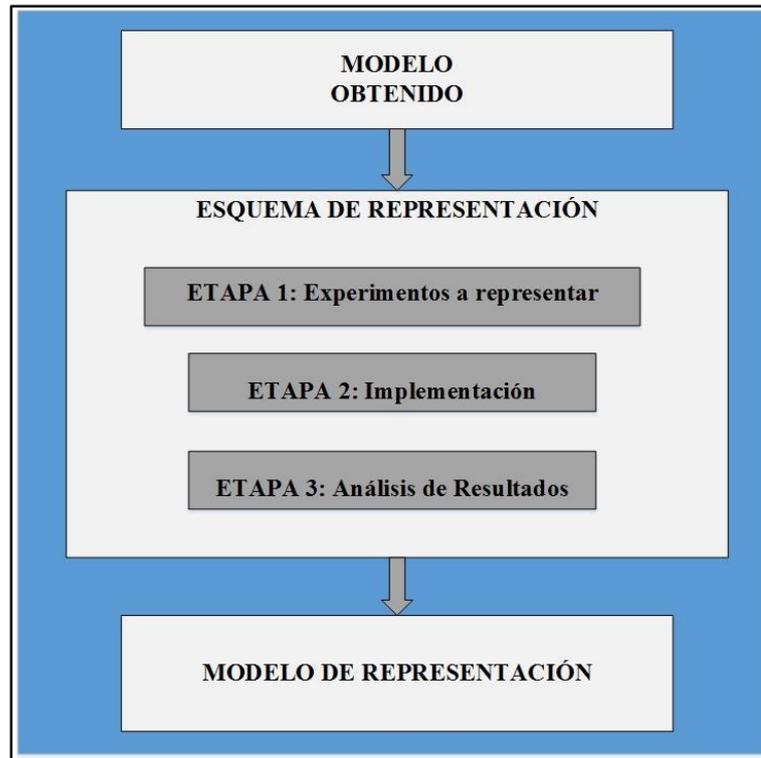


Figura 12 Fase de Representación del problema

## 2.2 Fase de Representación

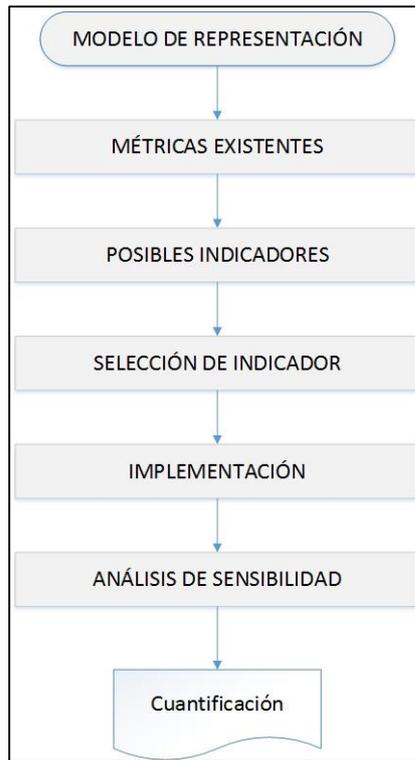
En esta fase de representación tiene como objetivo observar las interacciones entre los principales actores del sistema para comprender su funcionalidad, se emplea la técnica de representación teórica del problema modelado y se partirá del modelo propuesto en la anterior con el fin de enmarcarlo dentro de los parámetros y características propias del sistema, A continuación se detallan los bloques contenidos en esta etapa los cuales son esquematizados en la Figura 13.



**Figura 13 Fase de representación**

### **2.3 Fase de Cálculo de Resiliencia**

Como el objetivo de esta investigación es la cuantificación de resiliencia dentro del sistema energético colombiano, para este fin se analizará y seleccionará bajo unos parámetros cual métrica de las encontradas en la bibliografía es la más apropiada para ser implementada en el sistema con el fin de obtener la mejor aproximación posible en la Figura 14 se visualiza el algoritmo de búsqueda y selección de la métrica y su aplicabilidad al sistema.



**Figura 14 Cuantificación de resiliencia**

# **3.DESARROLLO, REPRESENTACIÓN IMPLEMENTACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO**

## **3.1 DESARROLLO DEL MODELO**

### **3.1.1 Identificación del sistema resiliente**

El sistema resiliente que se analizara es el mercado de energía de Colombia que durante los años ochenta, entró en una profunda crisis, junto a otros países de América Latina,(S. Botero & Cano, 2008) después de sobrepasar la crisis y el nacimiento del Mercado Energético Mayorista MEM, este se convirtió en una red compleja de diferentes agentes que interactúan entre sí de manera compleja, (Hurtado Moreno, Quintero Montoya, & García Rendón, 2014)

Por ser un sistema tan complejo se tomaran los agentes más distintivos del MEM para desarrollar la representación y cuantificación de la resiliencia, para obtener la representación más aproximada del comportamiento; se tomaron cuatro tipos de agentes que intervienen de manera distinta al interior del mercado y que representan la cadena logística energética de inicio a fin, el primer agente de selección sería la generación de energía de la cual se contempla tomar los tres generadores más importantes a nivel nacional los cuales tienen una cobertura del 61% del global nacional; los segundos agentes que se incluyen son los comercializadores, en este grupo se encuentran una gran cantidad de empresas dedicadas a esta labor, dado el objetivo y alcance de este proyecto además de conservar la mayor área de influencia se toman los comercializadores que pertenecen a los mismos grupos de inversión que las principales generadores; la tercera línea de agentes son los clientes o regiones de usuarios finales para la cual se optó por tomar aquellas áreas que son de mayor dominio para los agentes anteriores y representan las regiones de mayor conexión y consumo

para cada uno de los comercializadores; y por último se introdujo como un cuarto agente a la bolsa de energía de Colombia que es quien lleva a cabo todas las transacciones nacionales. En la Tabla 3 se resume la cantidad de agentes seleccionados para la representación del mercado.

**Tabla 3 Consolidado de los agentes**

<b>Nombre del agente</b>	<b>Agentes</b>	<b>Cantidad</b>
Z <sub>1</sub> , Z <sub>2</sub> , Z <sub>3</sub>	Generadores	3
Z <sub>4</sub> , Z <sub>5</sub> , Z <sub>6</sub>	Comercializadores	3
Z <sub>7</sub> , Z <sub>8</sub> , Z <sub>9</sub>	Clientes	3
Z <sub>10</sub>	Bolsa de energía	1
<b>Total</b>		<b>10</b>

### 3.1.2 Datos de mercado Eléctrico

Los datos que se obtuvieron de fuentes primarias como los boletines anuales de las diferentes empresas o grupos inversionistas en los cuales se encontraban la información más relevante para los agentes, para la información que no fue posible obtener por ser información sensible organizacional se estimaron a partir de datos secundarios encontrados en diversos documentos.

Para el desarrollo de la investigación se plantea los siguientes supuestos con el fin de complementar la información obtenida además de enmarcarla para un mejor tratamiento y análisis:

- El mercado tiene un comportamiento estable.
- Los datos expuestos se hallaron en informes puntuales pertenecientes a cada una de las organizaciones.
- El mercado regulado tiene una interacción directa con la empresa de generación de energía
- Los agentes generadores no tienen vínculos de transacción eléctrica o monetaria.

- Los usuarios son demandantes del servicio más no productor de ninguna índole.
- Los datos que se supusieron se hicieron bajo las garantías del comportamiento real del mercado.
- Los generadores solo comercializarían hasta un 50% de su producción a través de su empresa de comercialización.
- Se estableció un consumo interno a los generadores y los comercializadores no superior al 1% del total generado.
- Los datos suministrados determinan la energía transada para el año 2016 el cual se tomó como año base.
- El valor de transacción de energía para el 2016 se toma como 300 \$/kWh.
- Para la conversión se toma que 1 GWh es igual a 1'000.000 de kWh

### **3.1.2.1 Técnicas de representación**

Para determinar la fuerza de interacción entre cada uno de los agentes, se desarrolla una representación bajo la metodología topológica para el sistema que se analizará en la investigación; con el fin de obtener el primer acercamiento hacia el entendimiento del mercado, se parte de la idea de que cada uno de los agentes involucrados en el sistema tienen algún tipo de fuerza que les permite tener una conexión con el resto de los participantes del mercado. Cada línea que parte de los agentes del sistema ( $Z_i$ ) que se encuentra de manera visual en la Figura 15, representa un flujo de energía en GWh, esta cantidad de energía se transforma a un valor monetario para medir de manera más asertiva la resiliencia del sistema.

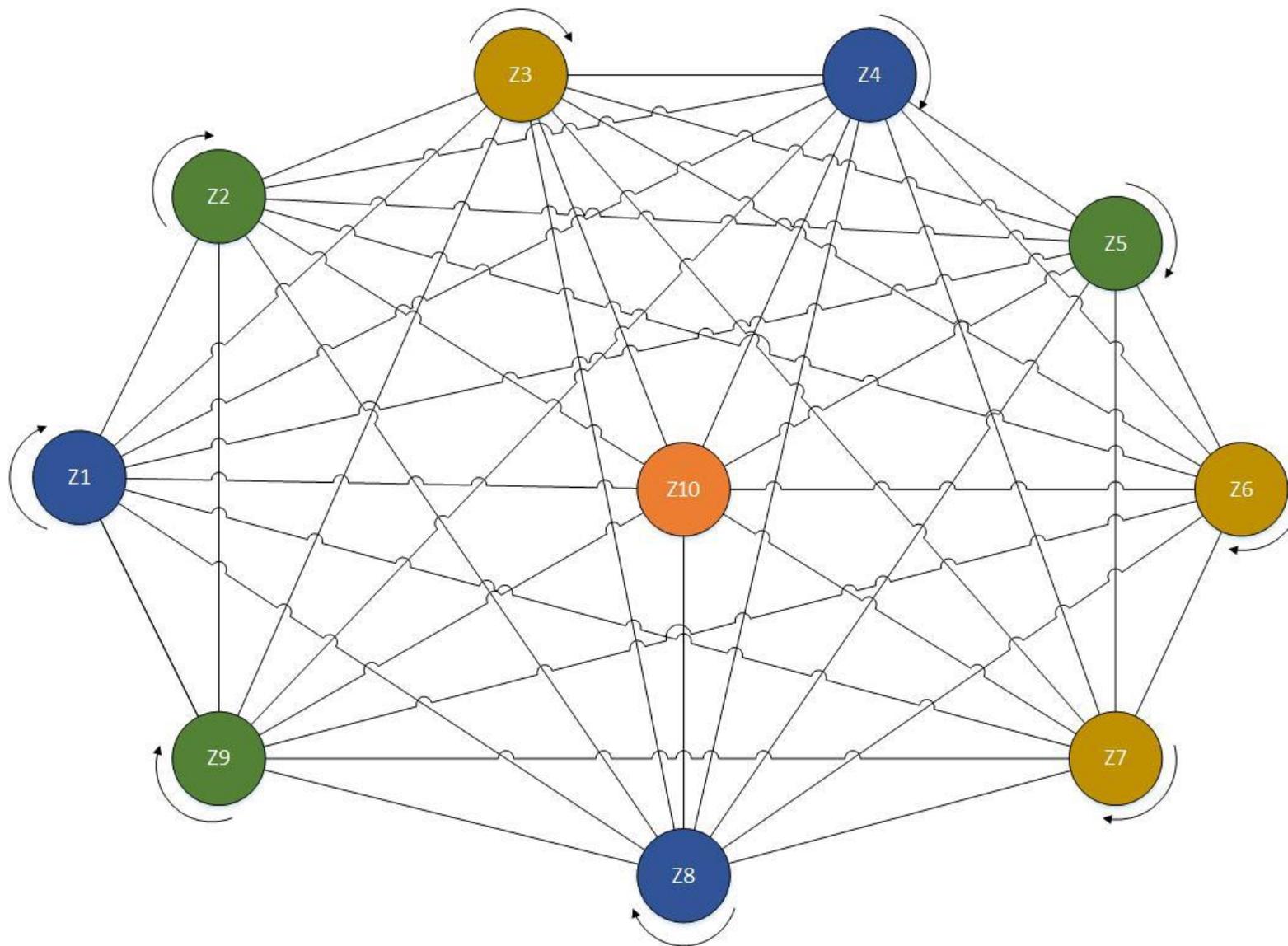


Figura 15 Representación topológica del comportamiento del mercado energético colombiano

### 3.1.3 Modelo de obtenido

Partiendo de este esquema de representación se plantea el siguiente modelo matricial base que comprende a todos los agentes del sistema:

$$\begin{aligned}
 Z_1 &= Z_{11} & \dots & Z_{1j} \\
 Z_2 &= Z_{21} & \dots & Z_{2j} \\
 \vdots & & & \vdots \\
 Z_i &= Z_{i1} & \dots & Z_{ij}
 \end{aligned}$$

Ejecutando el sistema propuesto como base se obtiene una matriz de representación (Tabla 4) directamente proporcional entre los que suceda en el agente que consume y el que ofrece el producto, la cual es la matriz de inicio para el método de I-O.

**Tabla 4 Datos en peso colombiano de las interacciones entre cada uno de los agentes**

	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8	Z9	Z10	Di	Total Xi
Z1	8,E+09	0,E+00	0,E+00	2,E+12	1,E+11	1,E+11	3,E+10	3,E+11	7,E+10	9,E+11	7,E+11	4,02,E+12
Z2	0,E+00	5,E+10	0,E+00	9,E+10	2,E+12	2,E+11	9,E+10	4,E+10	5,E+11	5,E+11	1,E+12	4,49,E+12
Z3	0,E+00	0,E+00	5,E+09	3,E+10	9,E+10	2,E+12	6,E+11	4,E+10	6,E+10	4,E+11	4,E+11	3,42,E+12
Z4	0,E+00	0,E+00	0,E+00	6,E+07	3,E+11	2,E+11	4,E+10	5,E+11	1,E+11	0,E+00	2,E+12	2,89,E+12
Z5	0,E+00	0,E+00	0,E+00	2,E+11	9,E+07	2,E+11	1,E+11	5,E+10	6,E+11	0,E+00	2,E+12	2,90,E+12
Z6	0,E+00	0,E+00	0,E+00	2,E+11	3,E+11	3,E+07	8,E+11	4,E+10	8,E+10	0,E+00	2,E+12	3,48,E+12
Z7	0,E+00	2,E+12	2,00,E+12									
Z8	0,E+00	1,E+12	1,15,E+12									
Z9	0,E+00	1,E+12	1,47,E+12									
Z10	0,E+00	0,E+00	0,E+00	7,E+11	2,E+11	7,E+11	0,E+00	0,E+00	0,E+00	0,E+00	5,E+12	6,04,E+12

## 3.2 Representación del modelo

Se empleará la técnica de representación teórica del problema partiendo del modelo propuesto anteriormente con el fin de enmarcarlo dentro de los parámetros y características propias del sistema y conseguir una aproximación con el sistema real.

### 3.2.1 Esquema de representación

El sistema que se representará se consolidó con valores reales para un periodo específico (año 2016), siendo el punto de partida para el cálculo de la resiliencia estática; en los siguientes apartados se detallará la transformación matricial hasta alcanzar la base para la cuantificación de la resiliencia.

#### 1. ETAPA 1 Experimentos a Representar:

Para proceder con la metodología propuesta por Leontief se debe partir de una transformación de los datos crudos a una relación o índice en los cuales garanticen la dependencia de cada uno de los agentes con la producción total del agente individual; para esto se aplica la Ecuación 2 con lo que se obtiene la siguiente matriz de fuerzas interdependientes:

**Tabla 5 Matriz de requerimientos técnicos A**

	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8	Z9	Z10
Z1	0,002	0	0	0,584	0,034	0,035	0,014	0,300	0,047	0,155
Z2	0	0,010	0	0,031	0,619	0,052	0,047	0,036	0,359	0,088
Z3	0	0	0,001	0,012	0,031	0,491	0,313	0,031	0,044	0,073
Z4	0	0	0	0	0,090	0,050	0,019	0,414	0,065	0
Z5	0	0	0	0,070	0	0,058	0,052	0,039	0,392	0
Z6	0	0	0	0,058	0,102	0	0,385	0,038	0,054	0
Z7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Z8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Z9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Z10	0	0	0	0,234	0,066	0,187	0	0	0	0

3. ETAPA 2 Implementación:

En la etapa de implementación se utilizan modelos derivados del modelo económico de insumo-producto, que ha sido ampliamente aceptado como una herramienta útil para analizar la conexión interdependiente entre sectores industriales IIM.

Se deben estimar los diferentes componentes partiendo por la matriz A; se inicia determinando la matriz de requerimientos técnicos de interdependencia entre los diferentes agentes A\*, para la cual se realiza la aplicación de la Ecuación 9, en la cual se relaciona el vector de producción planificada que corresponde a la columna Total de  $X_i$  de la Tabla 4; lo que garantiza que los cambios que se efectúen estén sujetos a la producción global y su afectación sobre el sistema, no solo sobre un elemento en particular.

**Tabla 6 Matriz de requerimientos técnicos entre los diferentes agentes A\***

	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8	Z9	Z10
Z1	0,002	0	0	0,420	0,024	0,030	0,007	0,086	0,017	0,232
Z2	0	0,010	0	0,020	0,400	0,040	0,021	0,009	0,118	0,119
Z3	0	0	0,001	0,010	0,026	0,500	0,183	0,010	0,019	0,129
Z4	0	0	0	0	0,090	0,060	0,013	0,164	0,033	0
Z5	0	0	0	0,070	0	0,070	0,035	0,016	0,198	0
Z6	0	0	0	0,048	0,085	0	0,221	0,013	0,023	0
Z7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Z8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Z9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Z10	0	0	0	0,112	0,032	0,108	0	0	0	0

La demanda de perturbación primaria es un vector expresado en términos de demanda final degradada normalizada, se ejecuta la Ecuación 10 en la cual se relaciona la demanda final.

**Tabla 7 Demanda de perturbación primaria**

Z1	1,8,E-01
Z2	2,6,E-01
Z3	1,2,E-01
Z4	6,4,E-01
Z5	6,1,E-01
Z6	6,1,E-01
Z7	1,0
Z8	1,0
Z9	1,0
Z10	7,5,E-01

Para determinar la ecuación solución del sistema se realiza una resta entre la matriz de requerimientos técnicos entre los diferentes agentes A\* y una matriz identidad

**Tabla 8 Matriz (I-A)**

	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8	Z9	Z10
Z1	0,998	0	0	-0,420	-0,024	-0,030	-0,007	-0,086	-0,017	-0,232
Z2	0	0,990	0	-0,020	-0,400	-0,040	-0,021	-0,009	-0,118	-0,119
Z3	0	0	0,999	-0,010	-0,026	-0,500	-0,183	-0,010	-0,019	-0,129
Z4	0	0	0	1,000	-0,090	-0,060	-0,013	-0,164	-0,033	0
Z5	0	0	0	-0,070	1,000	-0,070	-0,035	-0,016	-0,198	0
Z6	0	0	0	-0,048	-0,085	1,000	-0,221	-0,013	-0,023	0
Z7	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
Z8	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Z9	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Z10	0	0	0	-0,112	-0,032	-0,108	0	0	0	1

Un resultado natural de la Ecuación 12 que es la inoperabilidad interdependiente generalizada es impulsado por perturbaciones en la demanda en uno o más agentes.

**Tabla 9 Matriz (I-A)<sup>-1</sup>**

	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8	Z9	Z10
Z1	1,00	0	0	0,46	0,08	0,09	0,04	0,16	0,05	0,23
Z2	0	1,01	0	0,07	0,42	0,09	0,06	0,03	0,21	0,12
Z3	0	0	1,00	0,06	0,08	0,52	0,30	0,03	0,05	0,13
Z4	0	0	0	1,01	0,10	0,07	0,03	0,17	0,05	0
Z5	0	0	0	0,07	1,01	0,08	0,05	0,03	0,20	0
Z6	0	0	0	0,05	0,09	1,01	0,23	0,02	0,04	0
Z7	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
Z8	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Z9	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Z10	0	0	0	0,12	0,05	0,12	0,03	0,02	0,02	1

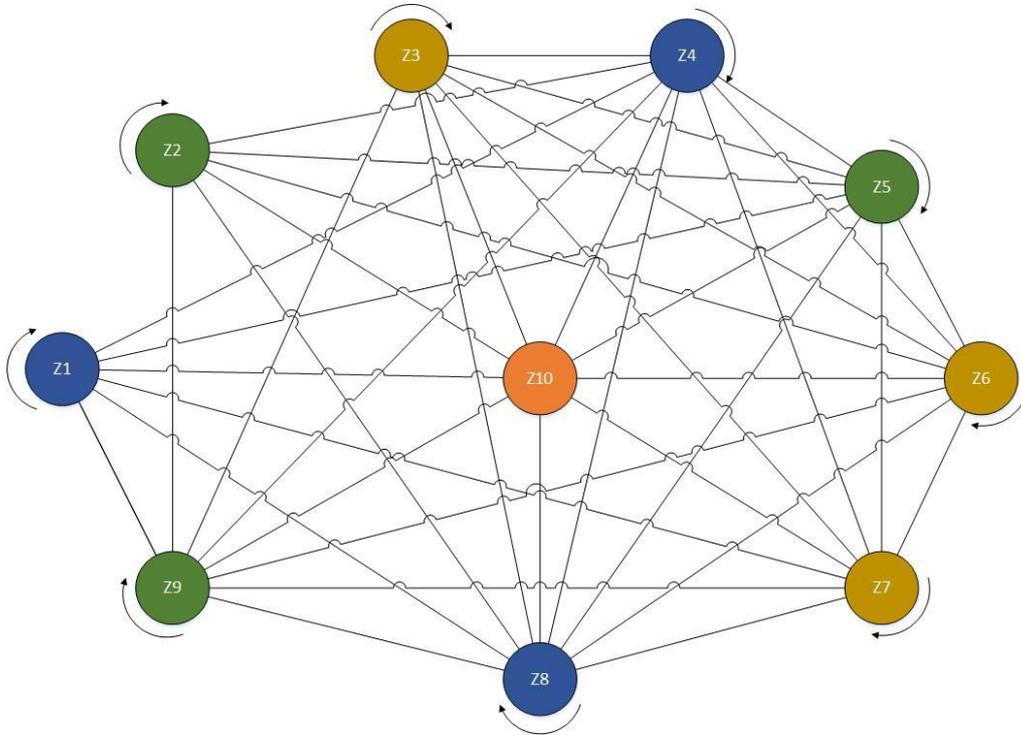
#### 4. ETAPA 3 Análisis de Resultados:

El modelo de Leontief de I-O brinda la capacidad de analizar de forma detallada, global y a su vez real, pero la visualización de la propagación de un efecto sobre el sistema no se observa de inmediato por lo que es necesario complementar la representación con el modelo IIM que mejora la capacidad del modelo básico de entrada-salida y también proporciona una representación más precisa de la complejidad e interdependencia de los sistemas.

Las interacciones interagentes no se producen entre cada uno de los agentes, esto se infiere de la Tabla 9 en donde se determina que los agentes que representan a los usuarios finales son los comercializadores, esto se debe a que los usuarios finales no producen ningún tipo de bien o servicio para el sistema energético colombiano, sólo son consumidores de los servicios otros agentes del mercado de energía.

Un agente generador no interactúa con ninguno de los otros agentes generadores como se estipuló en los supuestos para esta investigación y la bolsa de energía se ve influenciada por los comercializadores quienes son los encargados de realizar las transacciones internas y los usuarios finales.

### 3.2.1 Modelo de Representación



**Figura 16 Representación topológica del comportamiento del mercado energético colombiano real**

El modelo inicial ha mutado de tal forma que la representación es más acorde a la realidad que se plantea en la investigación.

## 3.3 Fase de Cálculo de Resiliencia

El sistema se depura y se observa entre quienes están sucediendo las interacciones dentro del sistema; para así iniciar la fase de cálculo de la resiliencia; para comenzar se establece que las líneas que unen a los diferentes agentes se denominarán como Alphas, los cuales determinarán la influencia de un agente demandante tiene sobre el agente oferente, lo que permitirá establecer el efecto producido sobre el oferente por un acontecimiento adverso en alguno de los agentes.

### 3.3.1 Métricas Existentes

Como se aprecia en el capítulo anterior se han desarrollado diferentes métricas para el cálculo de la resiliencia, pasando por aquellas denominadas dinámicas hasta

culminar en las estáticas; para el desarrollo de la investigación se indago a profundidad sobre las estáticas que se determinan como las más propicias para generar el primer acercamiento al sistema real.

### 3.3.2 Posibles indicadores

La cantidad de indicadores que se ha desarrollado para la cuantificación de la resiliencia abundan en la comunidad científica pero los que se exponen en la Tabla 10 son aquellos que se aplican a al tipo de sistemas económico que se aborda en la investigación.

**Tabla 10 Indicadores para sistemas económicos**

Propuesta	Indicador	Ecuación
(Zobel, 2010)	$R(X, T) = \frac{T^* - \frac{XT}{2}}{T^*} = 1 - \frac{XT}{2T^*}$	Ecuación 15
(Pant, Barker, & Zobel, 2014)	$\mathfrak{R}_i^S = \frac{q_{i,max} - q_i}{q_{i,max}}$	Ecuación 17
(Vugrin et al., 2010)	$DR = \sum_{i=1}^N SO_{HR}(t_i) + SO_{WR}(t_i)$	Ecuación 18
(Barker et al., 2013)	$\mathfrak{R}_F(t_r e_j) = \frac{F(t_r e_j) - F(t_d e_j)}{F(t_0) - F(t_d e_j)}$	Ecuación 19

### 3.3.3 Selección de indicador

Las características del IIM permiten realizar una igualdad con la formula esencial de la resiliencia lo más conveniente es implementar la Ecuación 17, lo que brinda la posibilidad de ejecutar la cuantificación en base a lo propuesto por Leontief y obteniendo la sensibilidad del sistema con respecto a afectaciones externas. Definida para el agente de la industria i, una métrica de resiliencia económica interdependiente, dónde  $q_i$  captura la interdependencia, Ecuación 7 ya se calcula a través de la diferencia de las producciones planificadas y la reducción consecuencia del evento adverso.

Este es un enfoque orientado a la demanda para la inoperabilidad, por lo tanto, la capacidad de recuperación es consistente con la idea de que la resiliencia económica estática es un resultado de la utilización eficiente de los recursos y no de la reparación del sistema (Rose, 2007). Usando la convención  $C^* = [c_{ij}^*] = [I-A^*]^{-1}$ , tenemos  $q = C^* D^*$ , lo que significa que la inoperabilidad en el agente  $i$  puede ser representada con la siguiente ecuación:

$$q_i = \sum_{j=1}^n C_{ij}^* D_j^* \quad \text{Ecuación 21}$$

Reemplazando la ecuación anterior en la Ecuación 17 se obtiene la ecuación para medir la resiliencia de un sistema estático en función de la inoperabilidad, viene dada por:

$$\begin{aligned} \mathfrak{R}_i^S &= \frac{\sum_{j=1}^n C_{ij}^* D_{j,max}^* - \sum_{j=1}^n C_{ij}^* D_j^*}{\sum_{j=1}^n C_{ij}^* D_{j,max}^*} \\ &= \frac{\sum_{j=1}^n C_{ij}^* D_{j,max}^* - \sum_{j=1}^n C_{ij}^* D_j^*}{\sum_{j=1}^n C_{ij}^* D_{j,max}^*} \end{aligned} \quad \text{Ecuación 22}$$

En el numerador se establece una sustracción entre el sistema en estado estable y la inoperatividad sobre el sistema en estado estable; se realiza una serie de transformaciones que permiten obtener una ecuación de fácil interpretación.

$$\begin{aligned} \mathfrak{R}_i^S &= \frac{\sum_{j=1}^n C_{ij}^* D_{j,max}^* (1 - f(\beta))}{\sum_{j=1}^n C_{ij}^* D_{j,max}^*} \\ &= 1 - \sum_{j=1}^n \left( \frac{C_{ij}^* D_{j,max}^*}{\sum_{j=1}^n C_{ij}^* D_{j,max}^*} \right) f(\beta) \end{aligned} \quad \text{Ecuación 23}$$

$f(\beta)$ . Es la función de planificación de cada uno de los agentes involucrados en el sistema y  $\alpha_{ij}^* = \frac{C_{ij}^* D_{j,max}^*}{\sum_{j=1}^n C_{ij}^* D_{j,max}^*}$ , por lo que la ecuación se puede volver a definir de la siguiente manera.

$$\mathfrak{R}_i^S = 1 - \sum_{j=1}^n \alpha_{ij}^* f(\beta_j) \quad \text{Ecuación 24}$$

Lo que indica que a mayor valor de  $\alpha_{ij}^*$  menor será el valor deseado para la función  $f(\beta)$ , ya que un bajo valor de  $\alpha_{ij}^* f(\beta_j)$  revela una mayor resiliencia del agente al interior del sistema. Realizar la comparación de cada uno de los diferentes  $\alpha_{ij}^* \forall j$  es útil como un indicador para estimar los valores posibles para función  $f(\beta_j) \forall j$ , de esta manera determinar dónde poner más esfuerzo en la planificación. Los impactos interdependientes que se generen en los sectores que se han representado a través de los alphas pueden ser útiles para indicar posibles estrategias a la hora de realizar la asignación de recursos.

Otra medida es la derivada de la resiliencia estática, y se convierte en un indicador útil para la planificación, ya que contiene la sensibilidad de la resiliencia del sector  $\mathcal{R}_i^S$  con respecto a la inversión  $\beta_j$ .

$$\frac{\delta \mathcal{R}_i^S}{\delta \beta_j} = - \alpha_{ij}^* \frac{\delta f(\beta_j)}{\delta \beta_j} \tag{Ecuación 25}$$

Se observa que  $\frac{\delta f(\beta_j)}{\delta \beta_j}$  es negativo porque  $\delta f(\beta_j)$  es una función decreciente de  $\beta_j$ . La sensibilidad enseña la efectividad que tiene el esfuerzo de la planificación para lograr la reducción de la resiliencia. Si la magnitud de  $\frac{\delta \mathcal{R}_i^S}{\delta \beta_j}$  es grande, incluso un pequeño esfuerzo de planificación para el sector  $j$  tendrá un mayor impacto en el aumento de la resiliencia del sector  $i$ .

La dupla;  $(\mathcal{R}_i^S, \frac{\delta \mathcal{R}_i^S}{\delta \beta_j})$  se puede usar como una medida multidimensional del valor de diferentes escenarios de resiliencia y planificación para la toma de decisiones estratégicas. (Pant et al., 2014)

### 3.3.4 Implementación

Un resultado natural de la Ecuación 13 es la inoperabilidad interdependiente generalizada, la cual es impulsada por perturbaciones en la demanda ocurridas en uno o más agentes, lo que permite examinar los efectos de impacto iniciales y las trayectorias posteriores entre los diferentes sectores a medida que avanzan hacia la recuperación o hacia un mayor declive. Esto ayuda a un planificador de preparación a

modelar la recuperación de línea de base y también a estimar cómo se pueden mejorar las trayectorias de recuperación a través de estrategias de preparación eficientes.

La Tabla 11 indica los valores de la inoperabilidad en el sector  $i$ , en la matriz encontramos valores de cero “0”, lo que indica que la relación entre estos agentes es nula es decir que la ocurrencia de alguna eventualidad no tendría repercusiones directas sobre el agente demandante.

**Tabla 11 Matriz  $(I-A)^{-1} * D_{max}$**

		Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8	Z9	Z10
Z1	W1	0,182	0	0	0,292	0,049	0,054	0,035	0,163	0,050	0,174
Z2	W2	0	0,266	0	0,043	0,257	0,053	0,056	0,028	0,206	0,090
Z3	W3	0	0	0,122	0,035	0,049	0,320	0,302	0,027	0,048	0,096
Z4	W4	0	0	0	0,646	0,059	0,041	0,032	0,168	0,054	0
Z5	W5	0	0	0	0,048	0,619	0,046	0,054	0,029	0,205	0
Z6	W6	0	0	0	0,035	0,056	0,617	0,227	0,023	0,043	0
Z7	W7	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
Z8	W8	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Z9	W9	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Z10	W10	0	0	0	0,078	0,032	0,072	0,030	0,022	0,017	0,748

Sistema sin ningún tipo de perturbación la matriz Matriz  $(I-A)^{-1} * D_{max}$  se hace igual a los Alphas del sistema mercado colombiano de energía, esto por la sumatoria que se presenta en el denominador tiene como resultante 1, lo que garantiza que el sistema se encuentre en equilibrio.

En aras del desarrollo de la investigación del cálculo de resiliencia para el mercado de energía colombiano se evaluará bajo la suposición que la función de planificación es igual para todos los agentes del sistema  $f(\beta) = e^{-\beta}$  donde  $\beta_i \geq 0$ , que indica la cantidad de inversión en millones de USD que se realizará para la planificación de la resiliencia.

De las expresiones que se observan en la Tabla 12 se puede inferir que la resiliencia de los diferentes agentes generadores dependen sustancial mente de los agentes comercializador y cliente final adscritos a su servicio en medidas de preparación para la protección de los ya mencionados, debido a que comparte una gran índice

que indica la fuerza de impacto, por su parte al momento de evaluar a los comercializadores se encuentra que la dependencia es con relación con las medidas que se opten para la planificación y protección de sí mismo.

En la Tabla 13 se confirman estas observaciones porque de los valores de las ecuaciones de generación después de realizar las derivadas pertinentes  $(\frac{\delta \pi_1^S}{\delta \beta_4}, \frac{\delta \pi_1^S}{\delta \beta_8}, \frac{\delta \pi_2^S}{\delta \beta_5}, \frac{\delta \pi_2^S}{\delta \beta_9}, \frac{\delta \pi_3^S}{\delta \beta_6}, \frac{\delta \pi_3^S}{\delta \beta_7})$  muestra que la resiliencia en el agente generador es muy sensible a las inversiones de los otros agentes de su grupo particular, y los comercializadores son mucho menos sensibles a las inversiones en los otros agentes, mientras que los otros valores de sensibilidad validan que la inversión del sector comercializadores es crítica para ambos sectores. Esta información indica que puede haber una preferencia por invertir en la planificación del sector de los comercializadores. En términos físicos, esto implica que es favorable invertir más en proteger a los agentes comercializadores porque es fundamental para muchos agentes de la economía del mercado eléctrico colombiano.

**Tabla 12 Resiliencia de un sistema estático en función de la inoperabilidad**

Я1	Z1	1	-	0,182	$e^{-\beta 1}$	-	0,292	$e^{-\beta 4}$	-	0,049	$e^{-\beta 5}$	-	0,054	$e^{-\beta 6}$	-	0,035	$e^{-\beta 7}$	-	0,163	$e^{-\beta 8}$	-	0,050	$e^{-\beta 9}$	-	0,174	$e^{-\beta 10}$
Я2	Z2	1	-	0,266	$e^{-\beta 2}$	-	0,043	$e^{-\beta 4}$	-	0,257	$e^{-\beta 5}$	-	0,053	$e^{-\beta 6}$	-	0,056	$e^{-\beta 7}$	-	0,028	$e^{-\beta 8}$	-	0,206	$e^{-\beta 9}$	-	0,090	$e^{-\beta 10}$
Я3	Z3	1	-	0,122	$e^{-\beta 3}$	-	0,035	$e^{-\beta 4}$	-	0,049	$e^{-\beta 5}$	-	0,320	$e^{-\beta 6}$	-	0,302	$e^{-\beta 7}$	-	0,027	$e^{-\beta 8}$	-	0,048	$e^{-\beta 9}$	-	0,096	$e^{-\beta 10}$
Я4	Z4	1	-	0,646	$e^{-\beta 4}$	-	0,059	$e^{-\beta 5}$	-	0,041	$e^{-\beta 6}$	-	0,032	$e^{-\beta 7}$	-	0,168	$e^{-\beta 8}$	-	0,054	$e^{-\beta 9}$						
Я5	Z5	1	-	0,048	$e^{-\beta 4}$	-	0,619	$e^{-\beta 5}$	-	0,046	$e^{-\beta 6}$	-	0,054	$e^{-\beta 7}$	-	0,029	$e^{-\beta 8}$	-	0,205	$e^{-\beta 9}$						
Я6	Z6	1	-	0,035	$e^{-\beta 4}$	-	0,056	$e^{-\beta 5}$	-	0,617	$e^{-\beta 6}$	-	0,227	$e^{-\beta 7}$	-	0,023	$e^{-\beta 8}$	-	0,043	$e^{-\beta 9}$						
Я7	Z7	1	-	1,000	$e^{-\beta 7}$																					
Я8	Z8	1	-	1,000	$e^{-\beta 8}$																					
Я9	Z9	1	-	1,000	$e^{-\beta 9}$																					
Я10	Z10	1	-	0,078	$e^{-\beta 4}$	-	0,032	$e^{-\beta 5}$	-	0,072	$e^{-\beta 6}$	-	0,030	$e^{-\beta 7}$	-	0,022	$e^{-\beta 8}$	-	0,017	$e^{-\beta 9}$	-	0,748	$e^{-\beta 10}$			

**Tabla 13 Derivada de la resiliencia estática del sistema en estado estable**

$\frac{\delta \mathcal{R}_1^s}{\delta \beta_j}$	Z1	0,182	$e^{-\beta 1}$	0,292	$e^{-\beta 4}$	0,049	$e^{-\beta 5}$	0,054	$e^{-\beta 6}$	0,035	$e^{-\beta 7}$	0,163	$e^{-\beta 8}$	0,050	$e^{-\beta 9}$	0,174	$e^{-\beta 10}$
$\frac{\delta \mathcal{R}_2^s}{\delta \beta_j}$	Z2	0,266	$e^{-\beta 2}$	0,043	$e^{-\beta 4}$	0,257	$e^{-\beta 5}$	0,053	$e^{-\beta 6}$	0,056	$e^{-\beta 7}$	0,028	$e^{-\beta 8}$	0,206	$e^{-\beta 9}$	0,090	$e^{-\beta 10}$
$\frac{\delta \mathcal{R}_3^s}{\delta \beta_j}$	Z3	0,122	$e^{-\beta 3}$	0,035	$e^{-\beta 4}$	0,049	$e^{-\beta 5}$	0,320	$e^{-\beta 6}$	0,302	$e^{-\beta 7}$	0,027	$e^{-\beta 8}$	0,048	$e^{-\beta 9}$	0,096	$e^{-\beta 10}$
$\frac{\delta \mathcal{R}_4^s}{\delta \beta_j}$	Z4	0,646	$e^{-\beta 4}$	0,059	$e^{-\beta 5}$	0,041	$e^{-\beta 6}$	0,032	$e^{-\beta 7}$	0,168	$e^{-\beta 8}$	0,054	$e^{-\beta 9}$				
$\frac{\delta \mathcal{R}_5^s}{\delta \beta_j}$	Z5	0,048	$e^{-\beta 4}$	0,619	$e^{-\beta 5}$	0,046	$e^{-\beta 6}$	0,054	$e^{-\beta 7}$	0,029	$e^{-\beta 8}$	0,205	$e^{-\beta 9}$				
$\frac{\delta \mathcal{R}_6^s}{\delta \beta_j}$	Z6	0,035	$e^{-\beta 4}$	0,056	$e^{-\beta 5}$	0,617	$e^{-\beta 6}$	0,227	$e^{-\beta 7}$	0,023	$e^{-\beta 8}$	0,043	$e^{-\beta 9}$				
$\frac{\delta \mathcal{R}_7^s}{\delta \beta_j}$	Z7	1,000	$e^{-\beta 7}$														
$\frac{\delta \mathcal{R}_8^s}{\delta \beta_j}$	Z8	1,000	$e^{-\beta 8}$														
$\frac{\delta \mathcal{R}_9^s}{\delta \beta_j}$	Z9	1,000	$e^{-\beta 9}$														
$\frac{\delta \mathcal{R}_{10}^s}{\delta \beta_j}$	Z10	0,078	$e^{-\beta 4}$	0,032	$e^{-\beta 5}$	0,072	$e^{-\beta 6}$	0,030	$e^{-\beta 7}$	0,022	$e^{-\beta 8}$	0,017	$e^{-\beta 9}$	0,748	$e^{-\beta 10}$		

### 3.3.5 Análisis de sensibilidad

En el apartado se observará el comportamiento del sistema después de ser sometidos a diferentes eventos adversos, para el análisis del sistema se efectuarán 3 escenarios distintos de eventos adversos que recaerán sobre los agentes de generación y comercialización los cuales son los agentes que están directamente vinculados con el servicio de energía.

#### 1. Escenario 1

Se parte de la base que el sistema sufre una transformación después de un evento adverso del 30% de pérdida en la demanda sobre la generación de energía, los datos resultantes se muestran en la Tabla 14 y se observa que la ecuación en la que se relaciona el agente oferente generación (Z1, Z2, Z3) sufre una disminución o incremento en la relación resiliente que tienen con los agentes demandantes, debido a un evento adverso que se sufre; de la Tabla 15 se puede analizar las diferencias que se tiene con respecto al sistema en estado estable que el agente Z2 al ser el de mayor generación del mercado tiene una mayor reducción del índice con relación consigo mismo, lo que indica que la fuerza .

#### 2. Escenario 2

En este escenario la transformación del sistema se realiza sobre la comercialización después de un evento adverso del 30% de pérdida en la demanda energía y se reflejan en la Tabla 16 que permite constatar que las fuerzas que recaen sobre los agentes comercializadores son de vital importancia para el mercado, esto se demuestra por que el evento que solo recayó sobre los comercializadores se propagó hasta el punto que las afectaciones se vieron reflejadas en los agentes generadores (ver Tabla 17) y estas afectaciones sobre los agentes generadores se efectuó de forma inversa a la ocurrencia del escenario 1, en donde las diferencias que en el punto anterior eran positivas en este escenario es negativa y viceversa, lo que indica que algunos agentes aumentan (signo +) su sinergia con algunos agentes mientras que con los otros sucede lo contrario (signos -).

### 3. Escenario 3

Para el escenario 3 se efectúa una combinación de los dos escenarios anteriores con el fin de ver el comportamiento del sistema, por lo tanto la transformación del sistema después de un evento adverso del 30% de pérdida en la demanda sobre la generación y comercialización de energía; en la Tabla 18 se encuentran las estimaciones de las fuerzas del impacto directo e indirecto sobre los agentes del mercado debido a la perturbación de la demanda los agentes Z1, Z2, Z3, Z4, Z5, Z6, lo que influye en la resiliencia interdependiente del sistema, las ecuaciones determinan que a pesar de estar bajo un evento adverso en conjunto, el sistema no se comporta igual que afectaciones de manera focalizada entre agentes del mismo género, es por esto que las ecuaciones no son idénticas para ninguno de los escenarios.

**Tabla 14 Perdida del 30% sobre la generación de energía**

Я1	Z1	1	- 0,135 $e^{-\beta 1}$	- 0,309 $e^{-\beta 4}$	- 0,052 $e^{-\beta 5}$	- 0,057 $e^{-\beta 6}$	- 0,037 $e^{-\beta 7}$	- 0,173 $e^{-\beta 8}$	- 0,053 $e^{-\beta 9}$	- 0,184 $e^{-\beta 10}$
Я2	Z2	1	- 0,202 $e^{-\beta 2}$	- 0,047 $e^{-\beta 4}$	- 0,280 $e^{-\beta 5}$	- 0,058 $e^{-\beta 6}$	- 0,061 $e^{-\beta 7}$	- 0,031 $e^{-\beta 8}$	- 0,224 $e^{-\beta 9}$	- 0,098 $e^{-\beta 10}$
Я3	Z3	1	- 0,089 $e^{-\beta 3}$	- 0,037 $e^{-\beta 4}$	- 0,051 $e^{-\beta 5}$	- 0,332 $e^{-\beta 6}$	- 0,313 $e^{-\beta 7}$	- 0,029 $e^{-\beta 8}$	- 0,050 $e^{-\beta 9}$	- 0,100 $e^{-\beta 10}$
Я4	Z4	1	- 0,646 $e^{-\beta 4}$	- 0,059 $e^{-\beta 5}$	- 0,041 $e^{-\beta 6}$	- 0,032 $e^{-\beta 7}$	- 0,168 $e^{-\beta 8}$	- 0,054 $e^{-\beta 9}$		
Я5	Z5	1	- 0,048 $e^{-\beta 4}$	- 0,619 $e^{-\beta 5}$	- 0,046 $e^{-\beta 6}$	- 0,054 $e^{-\beta 7}$	- 0,029 $e^{-\beta 8}$	- 0,205 $e^{-\beta 9}$		
Я6	Z6	1	- 0,035 $e^{-\beta 4}$	- 0,056 $e^{-\beta 5}$	- 0,617 $e^{-\beta 6}$	- 0,227 $e^{-\beta 7}$	- 0,023 $e^{-\beta 8}$	- 0,043 $e^{-\beta 9}$		
Я7	Z7	1	- 1,000 $e^{-\beta 7}$							
Я8	Z8	1	- 1,000 $e^{-\beta 8}$							
Я9	Z9	1	- 1,000 $e^{-\beta 9}$							
Я10	Z10	1	- 0,078 $e^{-\beta 4}$	- 0,032 $e^{-\beta 5}$	- 0,072 $e^{-\beta 6}$	- 0,030 $e^{-\beta 7}$	- 0,022 $e^{-\beta 8}$	- 0,017 $e^{-\beta 9}$	- 0,748 $e^{-\beta 10}$	

**Tabla 15 Diferencia del sistema en estado estable y el escenario 1**

Я1	Z1	-0,047 $e^{-\beta 1}$	0,017 $e^{-\beta 4}$	0,003 $e^{-\beta 5}$	0,003 $e^{-\beta 6}$	0,002 $e^{-\beta 7}$	0,009 $e^{-\beta 8}$	0,003 $e^{-\beta 9}$	0,010 $e^{-\beta 10}$
Я2	Z2	-0,064 $e^{-\beta 2}$	0,004 $e^{-\beta 4}$	0,022 $e^{-\beta 5}$	0,005 $e^{-\beta 6}$	0,005 $e^{-\beta 7}$	0,002 $e^{-\beta 8}$	0,018 $e^{-\beta 9}$	0,008 $e^{-\beta 10}$
Я3	Z3	-0,033 $e^{-\beta 3}$	0,001 $e^{-\beta 4}$	0,002 $e^{-\beta 5}$	0,012 $e^{-\beta 6}$	0,011 $e^{-\beta 7}$	0,001 $e^{-\beta 8}$	0,002 $e^{-\beta 9}$	0,004 $e^{-\beta 10}$

**Tabla 16 Perdida del 30% sobre la comercialización de energía**

Я1	Z1	1	-	0,206	$e^{-\beta 1}$	-	0,232	$e^{-\beta 4}$	-	0,039	$e^{-\beta 5}$	-	0,043	$e^{-\beta 6}$	-	0,040	$e^{-\beta 7}$	-	0,185	$e^{-\beta 8}$	-	0,057	$e^{-\beta 9}$	-	0,198	$e^{-\beta 10}$
Я2	Z2	1	-	0,297	$e^{-\beta 2}$	-	0,034	$e^{-\beta 4}$	-	0,202	$e^{-\beta 5}$	-	0,042	$e^{-\beta 6}$	-	0,063	$e^{-\beta 7}$	-	0,031	$e^{-\beta 8}$	-	0,231	$e^{-\beta 9}$	-	0,101	$e^{-\beta 10}$
Я3	Z3	1	-	0,139	$e^{-\beta 3}$	-	0,028	$e^{-\beta 4}$	-	0,039	$e^{-\beta 5}$	-	0,255	$e^{-\beta 6}$	-	0,344	$e^{-\beta 7}$	-	0,031	$e^{-\beta 8}$	-	0,055	$e^{-\beta 9}$	-	0,110	$e^{-\beta 10}$
Я4	Z4	1	-	0,583	$e^{-\beta 4}$	-	0,053	$e^{-\beta 5}$	-	0,037	$e^{-\beta 6}$	-	0,041	$e^{-\beta 7}$	-	0,217	$e^{-\beta 8}$	-	0,069	$e^{-\beta 9}$						
Я5	Z5	1	-	0,042	$e^{-\beta 4}$	-	0,551	$e^{-\beta 5}$	-	0,041	$e^{-\beta 6}$	-	0,068	$e^{-\beta 7}$	-	0,037	$e^{-\beta 8}$	-	0,261	$e^{-\beta 9}$						
Я6	Z6	1	-	0,031	$e^{-\beta 4}$	-	0,049	$e^{-\beta 5}$	-	0,548	$e^{-\beta 6}$	-	0,288	$e^{-\beta 7}$	-	0,030	$e^{-\beta 8}$	-	0,054	$e^{-\beta 9}$						
Я7	Z7	1	-	1,000	$e^{-\beta 7}$																					
Я8	Z8	1	-	1,000	$e^{-\beta 8}$																					
Я9	Z9	1	-	1,000	$e^{-\beta 9}$																					
Я10	Z10	1	-	0,058	$e^{-\beta 4}$	-	0,024	$e^{-\beta 5}$	-	0,054	$e^{-\beta 6}$	-	0,031	$e^{-\beta 7}$	-	0,024	$e^{-\beta 8}$	-	0,018	$e^{-\beta 9}$	-	0,792	$e^{-\beta 10}$			

**Tabla 17 Diferencia del sistema en estado estable y el escenario 2**

Я1	Z1	0,024	$e^{-\beta 1}$	-0,060	$e^{-\beta 4}$	-0,010	$e^{-\beta 5}$	-0,011	$e^{-\beta 6}$	0,005	$e^{-\beta 7}$	0,022	$e^{-\beta 8}$	0,007	$e^{-\beta 9}$	0,023	$e^{-\beta 10}$
Я2	Z2	0,032	$e^{-\beta 2}$	-0,009	$e^{-\beta 4}$	-0,056	$e^{-\beta 5}$	-0,012	$e^{-\beta 6}$	0,007	$e^{-\beta 7}$	-0,022	$e^{-\beta 8}$	0,024	$e^{-\beta 9}$	0,011	$e^{-\beta 10}$
Я3	Z3	0,017	$e^{-\beta 3}$	-0,007	$e^{-\beta 4}$	-0,010	$e^{-\beta 5}$	-0,065	$e^{-\beta 6}$	0,042	$e^{-\beta 7}$	-0,288	$e^{-\beta 8}$	0,007	$e^{-\beta 9}$	0,013	$e^{-\beta 10}$
Я4	Z4	-0,063	$e^{-\beta 4}$	-0,006	$e^{-\beta 5}$	-0,004	$e^{-\beta 6}$	0,009	$e^{-\beta 7}$	0,049	$e^{-\beta 8}$	0,038	$e^{-\beta 9}$				
Я5	Z5	-0,005	$e^{-\beta 4}$	-0,068	$e^{-\beta 5}$	-0,005	$e^{-\beta 6}$	0,015	$e^{-\beta 7}$	0,008	$e^{-\beta 8}$	0,207	$e^{-\beta 9}$				
Я6	Z6	-0,004	$e^{-\beta 4}$	-0,006	$e^{-\beta 5}$	-0,069	$e^{-\beta 6}$	0,061	$e^{-\beta 7}$	0,006	$e^{-\beta 8}$	-0,172	$e^{-\beta 9}$				
Я10	Z10	-0,020	$e^{-\beta 4}$	-0,008	$e^{-\beta 5}$	-0,019	$e^{-\beta 6}$	0,002	$e^{-\beta 7}$	0,001	$e^{-\beta 8}$	-0,012	$e^{-\beta 9}$	0,043	$e^{-\beta 10}$		

**Tabla 18 Perdida del 30% sobre la generación y comercialización de energía**

Я1	Z1	1	-	0,154	$e^{-\beta 1}$	-	0,247	$e^{-\beta 1}$	-	0,042	$e^{-\beta 1}$	-	0,046	$e^{-\beta 1}$	-	0,043	$e^{-\beta 1}$	-	0,198	$e^{-\beta 1}$	-	0,061	$e^{-\beta 1}$	-	0,211	$e^{-\beta 1}$
Я2	Z2	1	-	0,228	$e^{-\beta 2}$	-	0,037	$e^{-\beta 2}$	-	0,221	$e^{-\beta 2}$	-	0,046	$e^{-\beta 2}$	-	0,069	$e^{-\beta 2}$	-	0,035	$e^{-\beta 2}$	-	0,254	$e^{-\beta 2}$	-	0,110	$e^{-\beta 2}$
Я3	Z3	1	-	0,101	$e^{-\beta 3}$	-	0,029	$e^{-\beta 3}$	-	0,040	$e^{-\beta 3}$	-	0,266	$e^{-\beta 3}$	-	0,359	$e^{-\beta 3}$	-	0,033	$e^{-\beta 3}$	-	0,057	$e^{-\beta 3}$	-	0,115	$e^{-\beta 3}$
Я4	Z4	1	-	0,583	$e^{-\beta 4}$	-	0,053	$e^{-\beta 4}$	-	0,037	$e^{-\beta 4}$	-	0,041	$e^{-\beta 4}$	-	0,217	$e^{-\beta 4}$	-	0,069	$e^{-\beta 4}$						
Я5	Z5	1	-	0,042	$e^{-\beta 4}$	-	0,551	$e^{-\beta 4}$	-	0,041	$e^{-\beta 4}$	-	0,068	$e^{-\beta 4}$	-	0,037	$e^{-\beta 4}$	-	0,261	$e^{-\beta 4}$						
Я6	Z6	1	-	0,031	$e^{-\beta 4}$	-	0,049	$e^{-\beta 4}$	-	0,548	$e^{-\beta 4}$	-	0,288	$e^{-\beta 4}$	-	0,030	$e^{-\beta 4}$	-	0,054	$e^{-\beta 4}$						
Я7	Z7	1	-	1,000	$e^{-\beta 7}$																					
Я8	Z8	1	-	1,000	$e^{-\beta 8}$																					
Я9	Z9	1	-	1,000	$e^{-\beta 9}$																					
Я10	Z10	1	-	0,058	$e^{-\beta 4}$	-	0,024	$e^{-\beta 4}$	-	0,054	$e^{-\beta 4}$	-	0,031	$e^{-\beta 4}$	-	0,024	$e^{-\beta 4}$	-	0,018	$e^{-\beta 4}$	-	0,792				

**Tabla 19 Diferencia del sistema en estado estable y el escenario 3**

Я1	Z1	-0,028	$e^{-\beta 1}$	-0,045	$e^{-\beta 4}$	-0,008	$e^{-\beta 5}$	-0,008	$e^{-\beta 6}$	0,007	$e^{-\beta 7}$	0,034	$e^{-\beta 8}$	0,010	$e^{-\beta 9}$	0,036	$e^{-\beta 10}$
Я2	Z2	-0,037	$e^{-\beta 2}$	-0,006	$e^{-\beta 4}$	-0,036	$e^{-\beta 5}$	-0,007	$e^{-\beta 6}$	0,013	$e^{-\beta 7}$	0,006	$e^{-\beta 8}$	0,047	$e^{-\beta 9}$	0,021	$e^{-\beta 10}$
Я3	Z3	-0,021	$e^{-\beta 3}$	-0,006	$e^{-\beta 4}$	-0,008	$e^{-\beta 5}$	-0,054	$e^{-\beta 6}$	0,057	$e^{-\beta 7}$	0,005	$e^{-\beta 8}$	0,009	$e^{-\beta 9}$	0,018	$e^{-\beta 10}$
Я4	Z4	-0,063	$e^{-\beta 4}$	-0,006	$e^{-\beta 5}$	-0,004	$e^{-\beta 6}$	0,009	$e^{-\beta 7}$	0,049	$e^{-\beta 8}$	0,016	$e^{-\beta 9}$				
Я5	Z5	-0,005	$e^{-\beta 4}$	-0,068	$e^{-\beta 5}$	-0,005	$e^{-\beta 6}$	0,015	$e^{-\beta 7}$	0,008	$e^{-\beta 8}$	0,056	$e^{-\beta 9}$				
Я6	Z6	-0,004	$e^{-\beta 4}$	-0,006	$e^{-\beta 5}$	-0,069	$e^{-\beta 6}$	0,061	$e^{-\beta 7}$	0,006	$e^{-\beta 8}$	0,012	$e^{-\beta 9}$				
Я10	Z10	-0,020	$e^{-\beta 4}$	-0,008	$e^{-\beta 5}$	-0,019	$e^{-\beta 6}$	0,002	$e^{-\beta 7}$	0,001	$e^{-\beta 8}$	0,001	$e^{-\beta 9}$	0,043	$e^{-\beta 10}$		

### 3.3.1 Cuantificación

Para determinar de manera cuantitativa el valor de la resiliencia sobre el sistema que se plantea en la investigación se recolectaron los valores que los diferentes agentes del mercado estipula para eventos adversos, algunos de estos valores se encontraron de manera no explícita en su diversificación para cada agente; por consiguiente se procede a dividir el monto total en partes iguales incluyendo al cliente final más importante para cada una de las organizaciones, como se evidencia en la Tabla 20, y para el grupo de agentes que no se encontró valor en ningún documento se realizó una estimación en base a los aportes de los otros dos paquetes de agentes y la producción energética asociada.

**Tabla 20 Inversiones por agentes**

Agentes		Valores de inversión		
$\beta_1$	Z1	1,2E+12	4,2E+11	4,2*
$\beta_4$	Z4		4,2E+11	4,2*
$\beta_8$	Z8		4,2E+11	4,2*
$\beta_2$	Z2	5,0E+11	1,7E+11	1,7*
$\beta_5$	Z5		1,7E+11	1,7*
$\beta_9$	Z9		1,7E+11	1,7*
$\beta_3$	Z3	2,0E+12	6,6E+11	6,6*
$\beta_6$	Z6		6,6E+11	6,6*
$\beta_7$	Z7		6,6E+11	6,6*
$\beta_{10}$	Z10	2,0E+10	2,0E+10	0,2*

Nota: \* son valores se encuentran en miles de millones de pesos

Los valores se encontraron en los diferentes informes de planeación de la organización

Los valores de cada uno de los  $\beta_j$  (inversión) se evaluó en las ecuaciones que se presentaron en la Tabla 13, arrojando los siguientes datos de resiliencia, de los cuales se infiere que los agentes se encuentran bien salvaguardados puesto los índices son superiores a 0,8 a excepción de  $\beta_2$ , lo cual se debe a una baja inversión con relación a la cantidad de energía producida.

**Tabla 21 Resultados la estrategia de inversión basado en decisiones de resiliencia planificadas.**

Miles de millones		Resiliencia	
$\beta_1$	4,2	$\gamma_1$	0,83
$\beta_2$	1,7	$\gamma_2$	0,79
$\beta_3$	6,6	$\gamma_3$	0,90
$\beta_4$	4,2	$\gamma_4$	0,97
$\beta_5$	1,7	$\gamma_5$	0,85
$\beta_6$	6,6	$\gamma_6$	0,98
$\beta_7$	6,6	$\gamma_7$	1,00
$\beta_8$	4,2	$\gamma_8$	0,98
$\beta_9$	1,7	$\gamma_9$	0,81
$\beta_{10}$	0,2	$\gamma_{10}$	0,08

# CONCLUSIONES

En la investigación se desarrolla un modelo conceptual y práctico para poder representar la interconexión de los agentes en el mercado eléctrico colombiano con características del mercado. Sobre la base de la información recopilada, que cubre el estado del arte a escala internacional y los principales resultados, se pueden extraer las conclusiones detalladas a continuación.

Este documento ilustra la importancia del análisis de interdependencia como parte del proceso de evaluación y cuantificación de la resiliencia. Los enfoques clásicos de este proceso a menudo ignoran la interdependencia en sus intentos de evaluar y analizar holísticamente los eventos que se desenvuelven en cascada al interior de un sistema. El Modelo de Input - Output (IIM) de Inoperabilidad proporciona un medio para analizar la interdependencia de los sistemas interconectados a gran escala en casos donde las suposiciones de modelos de Input - Output son apropiadas. Lo logra usando datos de transacciones energéticas como base para los cálculos de interdependencia. Esto cuantifica las transacciones entre los agentes económicos.

El análisis de interdependencia proporciona una forma de conexión de todos los agentes del mercado colombiano de energía para observar los efectos de la propagación de una falla a través de las interdependencias del sistema que al ser evaluado identifico cuales podrían ser los agentes críticos dentro del sistema complejo a los que la inversión debe garantizar la protección y así lograr que dado un evento adverso la perturbación del sistema sea el mínimo o de poco impacto.

Los efectos de propagación pueden ser estimados al aplicar los mismos métodos utilizados para conectarse con los agentes del sistema, en la fase de evaluación se encontró que se debe: (1) seleccionar los sectores más críticos para el fortalecimiento; (2) identificar oportunidades para reexaminar las interdependencias entre sectores; (3) evaluar los segmentos más importantes de la fuerza de trabajo para una mejor respuesta para la recuperación; y (4) evaluar las actividades de alerta temprana.

Esta investigación permite obtener una mejor comprensión de la resiliencia económica interdependiente a través de una representación estática sobre el mercado de energía colombiano. Integrando un constructo matemático de resiliencia con un modelo de interdependencia basado en el riesgo basado en datos, el modelo de entrada-salida de inoperabilidad (IIM) y métricas de resiliencia derivadas de representaciones estáticas del modelo de interdependencia.

El objetivo principal de medición de resiliencia basado en estática, cuantifica la capacidad del sistema de energía colombiano de manera interdependientes entre los agentes para pasar de un estado de equilibrio a otro después de la interrupción debido a un evento adverso. Lo que se traduce en que el modelo tiene la capacidad de capturar la reorganización del sistema, lo que indica una existencia de resiliencia.

El análisis de interdependencia en esta investigación abarca los temas importantes de identificación, evaluación, y cuantificación de la resiliencia derivados de la interconexión inherente a los agentes del mercado de energía actual. Es muy probable que las perturbaciones aplicadas por variables exógenas a la operación "tal como se planificó" de un agente determinado puedan presentar riesgos adicionales para otros sectores dependientes. El análisis de interdependencia es capaz de producir clasificaciones sectoriales basadas en los impactos económicos estimados asociados con las perturbaciones que se originan en un agente.

## **RECOMENDACIONES**

El trabajo futuro utilizará esta métrica para describir el desarrollo de un marco de toma de decisiones de preparación para promover la resiliencia económica interdependiente de un mercado de energía.

Se debe realizar una investigación con herramientas de inteligencia artificial, basada en un sistema dinámico y desarrollar una comparación entre los dos trabajos y enriquecer el conocimiento sobre resiliencia.

Se debe estimar con base a una metodología diferente la cuantificación de la resiliencia y realizar un análisis comparativo, que permita determinar los resultados obtenidos sobre el mismo sistema energético.

Es deseable que la información del mercado tenga el mayor detalle y calidad posible o disponer de información secundaria que aporten relevancia y permita eliminar los faltantes de información, cuando no exista o no se encuentre disponible.

Es importante que el sistema de medición implemente un esquema que permita reducir los problemas que se presentan en la medición especialmente en las interconexiones del mercado. La calibración es un requisito indispensable para el registro de nuevas cuantificaciones, con lo cual se asegura el cumplimiento.

# BIBLIOGRAFÍA Y FUENTES DE INFORMACIÓN

- Aguilar Diaz, A., & Diaz Velasco, J. A. (2004). *Una visión del mercado eléctrico colombiano. Unidad de planeación minero energética–UPME*. Bogota. Colombia. Retrieved from [http://www.upme.gov.co/Docs/Vision\\_Mercado\\_Electrico\\_Colombiano.pdf](http://www.upme.gov.co/Docs/Vision_Mercado_Electrico_Colombiano.pdf)
- Amin, M. (2003). North America's electricity infrastructure: Are we ready for more perfect storms? *IEEE Security & Privacy Magazine*, 1(5), 19–25. <https://doi.org/10.1109/MSECP.2003.1236231>
- Avalos, A. (2011). Estimación del impacto económico de los juegos panamericanos Guadalajara 2011: Análisis de insumo-producto. *EconoQuantum*, 8(1), 35–60.
- Barker, K., Ramirez-Marquez, J. E., & Rocco, C. M. (2013). Resilience-based network component importance measures. *Reliability Engineering and System Safety*, 117, 89–97. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2013.03.012>
- Becoña, E. (2006). Resiliencia: Definición, características y utilidad del concepto. *Psicopatología y Psicología Clínica*, 11(3), 125–146. Retrieved from [http://aepcp.net/arc/01.2006\(3\).Becona.pdf](http://aepcp.net/arc/01.2006(3).Becona.pdf)
- Botero, J. A., García, J. J., & Vélez, L. G. (2013). Mecanismos utilizados para monitorizar el poder de mercado en mercados eléctricos: Reflexiones para Colombia. *Cuadernos de Economía (Colombia)*, 32(60), 571–597. Retrieved from <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84886743701&partnerID=tZOtx3y1>
- Botero, S., & Cano, J. (2008). Análisis de series de tiempo para la predicción de los precios de la energía en la bolsa de Colombia. *Cuadernos De Economía*, 48, 173–208. <https://doi.org/10.15446/cuad.econ>
- Bruneau, M., Chang, S. E., Eguchi, R. T., Lee, G. C., Rourke, D. O., Reinhorn, A. M., ... Winterfeldt, D. V. O. N. (2003). A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities. *Earthquake Spectra*, 19(4), 733–752. <https://doi.org/10.1193/1.1623497>

- Bruneau, M., & Reinhorn, A. (2007). Exploring the concept of seismic resilience for acute care facilities. *Earthquake Spectra*, 23(1), 41–62. <https://doi.org/10.1193/1.2431396>
- Chraki, F. B. (2016). Análisis input-output de encadenamientos productivos y sectores clave en la economía. *Finanzas, Política y Economía*, 8(1), 55–81.
- Cimellaro, G. P., Reinhorn, A. M., & Bruneau, M. (2010). Seismic resilience of a hospital system. *Structure and Infrastructure Engineering*, 6(1–2), 127–144. <https://doi.org/10.1080/15732470802663847>
- Colombia. Ministerio de Minas y Energía. (1992). DECRETO 2119 DE 1992. Ministerio de Minas y Energía. *Bogotá: Diario Oficial*, (40.704), 1–27. Retrieved from <http://www.minminas.gov.co/documents/10180/655199/Decreto-2119-1992.pdf/12aab25e-82a2-4f0a-afee-6495892c50d3>
- Comisión de Regulación de Energía y Gas - Creg. (2006). *Cargo por confiabilidad: Esquema regulatorio para asegurar la confiabilidad en el suministro de energía eléctrica en Colombia, una visión de largo plazo*. Retrieved from [http://www.ariae.org/download/cursos/V\\_Edicion\\_Curso\\_Ariae/sesion de clausura/N 31\\_1\\_R RAMIREZ\\_ARIAE\\_CargoxConfiabilidad.pdf](http://www.ariae.org/download/cursos/V_Edicion_Curso_Ariae/sesion%20de%20clausura/N%2031_1_R%20RAMIREZ_ARIAE_CargoxConfiabilidad.pdf)
- Congreso de la República de Colombia. (1991). *Constitución Política Nacional Colombiana de 1991*. Bogotá. Colombia. Retrieved from [http://www.corteconstitucional.gov.co/inicio/Constitucion politica de Colombia - 2015.pdf](http://www.corteconstitucional.gov.co/inicio/Constitucion%20politica%20de%20Colombia%20-2015.pdf)
- Costa, E. de F., Tavares de Araújo, I., Fernandes Bezerra, J., & Virginio Melo, M. (2005). Matriz de Insumo-Producto de Pernambuco para 1999: Metodología de cálculo e subsídios ao planejamento regional. *Economia Aplicada*, 9(4), 595–621. <https://doi.org/https://dx.doi.org/10.1590/S1413-80502005000400005>
- Crowther, K. G., & Haines, Y. Y. (2005). Application of the inoperability Input – Output Model ( IIM ) for systemic risk assessment and management of interdependent infrastructures. *Systems Engineering*, 8(4), 323–341. <https://doi.org/10.1002/sys.20037>
- Cruz Rodriguez, R. D., Torres Sanchez, H., Montoya Giraldo, M., Barrientos Marín, J., Pineda Martines, L. M., Niebles Anzola, L. M., ... Franco Pachón, C. A. (2013). *Caracterización del sector eléctrico Colombiano*. (Servicio Nacional de

- Aprendizaje, Ed.) (Tercera). Bogota. Colombia.
- Federal Energy Regulatory Commission. (2005). *Report to congress on competition in wholesale and retail markets for electric energy. government report.* washington. EEUU.
- González Veiga, M. C., & Rodríguez Uría, M. V. (1995). *Matrices semipositivas y análisis interindustrial: Aplicaciones al estudio del modelo de Sraffa-Leontief.* Madrid. España: Facultad de ciencias económicas y empresariales.
- Guevara Cedeño, J. Y. (2012). *Modelización y simulación de la acción de los agentes en los mercados eléctricos.* Universidad de Chile.
- Henry, D., & Emmanuel Ramirez-Marquez, J. (2012). Generic metrics and quantitative approaches for system resilience as a function of time. *Reliability Engineering and System Safety, 99*, 114–122. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2011.09.002>
- Hosseini, S., Barker, K., & Ramirez-marquez, J. E. (2016). A review of definitions and measures of system resilience. *Reliability Engineering and System Safety, 145*, 47–61. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2015.08.006>
- Hurtado Moreno, L., Quintero Montoya, O. L., & García Rendón, J. J. (2014). Estimacion del precio de oferta de la energia electrica en Colombia mediante inteligencia artificial. *Revista De Metodos Cuantitativos Para La Economía Y La Empresa, (18)*, 54–87.
- Krause, T., Beck, E. V., Cherkaoui, R., Germond, A., Andersson, G., & Ernst, D. (2006). A comparison of Nash equilibria analysis and agent-based modelling for power markets. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 28*, 599–607. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2006.03.002>
- Kuong, J. L. (2004). Estabilidad dinamica de los mercados eléctricos. *Revista de La Facultad de Ciencias Económicas de La UNMSM., 14*, 115–122. Retrieved from [http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/publicaciones/economia/14/pdf/estabilidad\\_mercados.pdf](http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/publicaciones/economia/14/pdf/estabilidad_mercados.pdf)
- Luthar, S. S., Cicchetti, D., & Becker, B. (2000). Research on Resilience : Response to Commentaries. *Child Development, 71(3)*, 573–575. <https://doi.org/10.1111/1467-8624.00168>
- Luthar, S. S., Sawyer, A. J., & Brown, P. J. (2006). Conceptual issues in studies of resilience. *National Institutes of Health, 1094*, 105 – 115.

<https://doi.org/10.1196/annals.1376.009>

- Macias, A. M., & Andrade, J. (2014). Estudio de generación bajo escenarios de cambio climático. *Unidad de Planeación Minero Energética, Republica de Colombia*. Retrieved from [http://www1.upme.gov.co/sites/default/files/generacion\\_electrica\\_bajo\\_escenarios\\_cambio\\_climatico.pdf](http://www1.upme.gov.co/sites/default/files/generacion_electrica_bajo_escenarios_cambio_climatico.pdf)
- Manco, O., Botero, O., & Medina, S. (2016). Complex system modeling and platform implementation for financial risk management in energy markets. *Journal of Ubiquitous Systems & Pervasive Networks*, 3(1), 00–00. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.04.226>
- Martin, R. (2012). Regional economic resilience , hysteresis and recessionary shocks. *Journal of Economic Geography*, 12(1), 1–32. <https://doi.org/https://doi.org/10.1093/jeg/lbr019>
- Micola, A. R. (2010). De Gas Natural Y Electricidad. *Cuadernos Económicos de ICE*, 79, 93–116. Retrieved from [http://www.revistasice.com/CachePDF/CICE\\_79\\_\\_\\_D89E4C55EC8058488FDEA14CEDF83B77.pdf](http://www.revistasice.com/CachePDF/CICE_79___D89E4C55EC8058488FDEA14CEDF83B77.pdf)
- Mitchell, S. M., Mannan, M. S., & Tareja, R. (2007). Resilient engineered systems: Development of an inherent system property. In *Proceedings of the First International Conference on Self Healing Materials* (pp. 1–8). The Netherlands. Retrieved from [extras.springer.com/2007/978-1-4020-6250-6/.../40.pdf%0A](http://extras.springer.com/2007/978-1-4020-6250-6/.../40.pdf%0A)
- Navarro Gálvez, F. (2012). *Modelos multisectoriales input-output en el estudio de los impactos ambientales: Una aplicación a la economía de Cataluña*. Universitat Autònoma de Barcelona. Retrieved from <http://hdl.handle.net/10803/107905>
- Pant, R., Barker, K., & Zobel, C. W. (2014). Static and dynamic metrics of economic resilience for interdependent infrastructure and industry sectors. *Reliability Engineering and System Safety*, 125, 92–102. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2013.09.007>
- Pastrana, M. M., Guzmán, J. A., & Ovalle, D. A. (2005). Simulación basada en agentes inteligentes del proceso de negociación del mercado de energía eléctrica en Colombia. *Revista Del Instituto de Energía*, 33, 25–36.
- Puchet Anyul, M., & Punzo, L. F. (2001). La tabla de insumo-producto desde una

- perspectiva dinámica estructural en homenaje a Wassily Leontief. *Investigación Económica*, 61(238), 13–35. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/42779000>
- Ramírez, P. (1992). *El Sistema de Leontief y su solución matemática. Lecturas de Economía*. Medellín. Colombia. Retrieved from <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4833812.pdf>
- Rose, A. (2007). Economic resilience to natural and man-made disasters: Multidisciplinary origins and contextual dimensions. *Environmental Hazards*, 7, 383–398. <https://doi.org/10.1016/j.envhaz.2007.10.001>
- Rose, A. (2009). *Economic resilience to disasters. Institute Community and regional resilience, (CARRI) Research report 8*. Los Angeles. EEUU.
- Rosenkrantz, D. J., Goel, S., Ravi, S. S., & Gangolly, J. (2009). Resilience metrics for service-oriented networks: A service allocation approach. *IEEE Transactions on Services Computing*, 2(3), 183–196. <https://doi.org/10.1109/TSC.2009.18>
- Sandoval, A. M. (2004). *Documento 272 Monografía del sector de electricidad y gas colombiano: Condiciones actuales y retos a futuro*. Dirección de estudios económicos. Retrieved from <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/EstudiosEconomicos/272.pdf>
- Santos, J. R. (2005). Modeling of disruptions to interdependent economic systems. *Wiley InterScience*, 9(1), 20–34. <https://doi.org/10.1002/sys.20040>
- Santos, J. R., & Haines, Y. Y. (2004). Modeling the demand reduction input-output (I-O) inoperability due to terrorism of interconnected infrastructures. *Risk Analysis*, 24(6), 1437–1451. <https://doi.org/10.1111/j.0272-4332.2004.00540.x>
- Sharman, D. M., & Yassine, A. A. (2004). Characterizing complex product architectures. *Systems Engineering*, 7(1), 35–60. <https://doi.org/10.1002/sys.10056>
- Standard, R. A., Hazards, M., Education, H., & Draft, I. (2010). *A risk analysis standard for natural and man-made hazards to higher education institutions*. ASME Innovative Technologies Institute, LLC (Tercera). Washington. EEUU: ASME.
- Tinker, A., & Sadler, E. (2014). A systematic review of qualitative studies on adjusting after stroke: Lessons for the study of resilience. *Disability and Rehabilitation an International, Multidisciplinary Journal*, 36(9), 716–726. <https://doi.org/10.3109/09638288.2013.814724>

- Uday, P., & Marais, K. (2015). Designing Resilient Systems-of-Systems : A Survey of Metrics , Methods , and Challenges. *Wiley*, 18(5), 491–510. <https://doi.org/10.1002/sys>
- UPME. (2015). *Plan energetico nacional Colombia: Ideario energético 2050*. Unidad de Planeación Minero Energética, Republica de Colombia. Bogota. Colombia: Ministerio de Minas y Energía Tomás. Retrieved from [http://www.upme.gov.co/Docs/PEN/PEN\\_IdearioEnergetico2050.pdf](http://www.upme.gov.co/Docs/PEN/PEN_IdearioEnergetico2050.pdf)
- Vargas, Luis; Palma, Rodrigo; Moya, O. (2001). Mercados Electricos y bolsas de energia: Aspectos criticos para su implementacion en Chile. *Revista Chilena de Ingeniería*, 9, 37–45. Retrieved from <http://hdl.handle.net/10533/37707>
- Vogus, T. J., & Sutcliffe, K. M. (2007). Organizational resilience: Towards a theory and research agenda. *Systems, Man and Cybernetics, 2007. ISIC. IEEE International Conference On*, 3418–3422. <https://doi.org/10.1109/ICSMC.2007.4414160>
- Vugrin, E., Warren, D., Ehlen, M., & Camphouse, C. (2010). A framework for assessing the resilience of infrastructure and economic systems. In K. Gopalakrishnan & S. Peeta (Eds.), *Sustainable and resilient critical infrastructure system* (pp. 1–272). Berlin. Alemania: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-11405-2>
- Wilson, R. (2002). Architecture of Power Markets. *Econometrica*, 70(4), 1299–1340. Retrieved from <http://www.jstor.org.ezproxy.unal.edu.co/stable/3082000>
- Zobel, C. W. (2010). Comparative visualization of predicted disaster resilience. *Paper Presented at the Proceedings of the 7th International ISCRAM Conference*, 1–6.
- Zobel, C. W. (2011). Representing perceived tradeoffs in de fining disaster resilience. *Decision Support Systems*, 50(2), 394–403. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2010.10.001>
- Zobel, C. W., & Khansa, L. (2014). Computers & Operations Research Characterizing multi-event disaster resilience. *Computers and Operation Research*, 42, 83–94. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2011.09.024>

Fecha de presentación: 03 de Mayo de 2018