UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

METODOLOGÍA PARA EL MONITOREO DE MICRORREDES POR MEDIO DE INDICADORES DE RESILIENCIA

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MENCIÓN ELÉCTRICA

OSCAR FERNANDO NÚÑEZ MATA

PROFESOR GUÍA:
RODRIGO PALMA-BEHNKE

PROFESOR CO-GUÍA:
FELIPE VALENCIA ARROYAVE

MIEMBRO DE LA COMISIÓN:
DORIS SÁEZ HUEICHAPAN
MARCELO CORTÉS CARMONA

ESTE TRABAJO HA SIDO FINANCIADO POR AGCI, LA UNIVERSIDAD DE COSTA RICA Y LA COMISIÓN NACIONAL DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA DE COSTA RICA

SANTIAGO DE CHILE
MARZO 2014

RESUMEN

Las microrredes son una alternativa viable para suministrar electricidad a comunidades, con la particularidad de facilitar la integración de fuentes de energía renovables. Esta solución requiere de la cuantificación de su sustentabilidad, con el objetivo de establecer si el sistema perdurará en el tiempo, manteniendo sus funcionalidades. Sin embargo, el concepto de sustentabilidad es difícil de definir y llevar a la práctica, principalmente por las dificultades en su cuantificación. En esta tesis se propone una metodología de monitoreo de microrredes basada en la resiliencia, por ser un atributo de la sustentabilidad, como una forma de hacerla práctica y cuantificable. La resiliencia es un concepto tomado de la ciencia de materiales, definido como la capacidad del material de soportar fuerzas externas que lo deforman, sin producir alteraciones permanentes. En este sentido, al considerar la respuesta de los distintos elementos que constituyen la microrred ante estímulos externos, y sus interacciones, será factible cuantificar si el sistema es capaz de soportar las consecuencias de estos estímulos y recuperarse. Consecuentemente, una microrred resiliente es aquella que tiene la capacidad de regresar a su estado original, cuando es sometida a perturbaciones de tipo social, ambiental, técnica y/o económica, entendiendo estado original como las condiciones de operación previas a la perturbación.

La metodología inicia con el análisis de la microrred como sistema socio-técnico, luego se pasa a la selección de indicadores, y finalmente se establecen los índices de resiliencia. Los indicadores seleccionados se agrupan en las siguientes cinco categorías: administración ambiental con dieciocho indicadores, avance tecnológico con dieciséis indicadores, desarrollo social con veintitrés indicadores, desarrollo económico con once indicadores y desarrollo de la gestión diecisiete indicadores. Se definen tres índices de resiliencia, los que construyen a través de una ponderación lineal de los indicadores de desempeño, reflejando su contribución en las tres facetas de resiliencia: evitar, soportar y recuperar.

La propuesta es validada en el Sistema ESUSCON, en Huatacondo, para demostrar su aplicabilidad y utilidad en el seguimiento de microrredes. El análisis se realiza para el periodo comprendido entre enero de 2011 y setiembre de 2013, basado en la información disponible, lo que permitió evaluar doce indicadores de desempeño, los que a su vez permiten una estimación mensual de los tres índices de resiliencia.

En el ámbito de la investigación futura se sugiere analizar la relación entre resiliencia y vulnerabilidad, que aporte al análisis de la dinámica del sistema en estudio, junto con desarrollar temas de modelación de sistemas socio-técnicos.

Dedicatoria

A toda mi familia, por su cariño y permanente apoyo, en especial a mi esposa e hijo.

Agradecimientos

Agradezco a la Agencia de Cooperación Internacional de Chile, a la Universidad de Costa Rica y a la Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica de Costa Rica, por el apoyo entregado en estos años de estudio.

Gracias a mi profesor guía Rodrigo Palma, y al equipo de trabajo compuesto por la Profesora Doris Sáez, y los Profesores Felipe Valencia, Roberto Hernández y Marcelo Cortes, por el apoyo permanente a este trabajo de tesis, sus consejos y guías fueron importantes.

Gracias al grupo de trabajo de la Unidad de Microrredes del Centro de Energía, y del Departamento de Ingeniería Eléctrica: Guillermo, Lorenzo, Bernardo, Fernando, Kim, Karen, Antonio, Ricardo, Álvaro, Mónica, Loreto, Ignacio, Paola, Eliana.

Finalmente, gracias al grupo de compañeros y compañeras de postgrado: Nataly, Fabián, Enrique, Benjamín, Jorge, Henry, Diego A., Diego O., Jacqueline, Osvaldo, Alexis, Christopher, Jannick, Mirko, Vilma, Jessica, Gonzalo, Marcelo, Aramis, Jan, por su permanente apoyo.

Tabla de contenido

Listado de abreviaciones XI

Capítulo 1 Introducción 1

1.1 Sistemas socio-técnicos 1

1.2 Sustentabilidad en sistemas socio-técnicos 2

1.3 Resiliencia como medida de sustentabilidad 5

1.4 Microrredes resilientes 7

1.5 Objetivos de la tesis 7

1.6 Estructura de la tesis 8

Capítulo 2 Sistemas socio-técnicos 10

2.1 Introducción 10

2.2 Concepto de sistema socio-técnico 10

2.3 Dimensión social y dimensión técnica 11

2.4 Transición en sistemas socio-técnicos 12

2.4.1 Elección racional 13

2.4.2 Teoría de la evolución 13

2.4.3 Estructuralismo 13

2.4.4 Constructivismo 14

2.4.5 Funcionalismo 15

2.4.6 Conflictos y luchas de poder 16

2.4.7 Relacionismo 16

2.4.8 Transición hacia la sustentabilidad 16

2.5 Resumen 19

Capítulo 3 Sustentabilidad y resiliencia 20

3.1 Introducción 20
3.2 Definición de sustentabilidad 20
3.3 Definición de resiliencia 22
3.3.1 Ingeniería de resiliencia 23
3.3.2 Perturbaciones 23
3.3.3 Facetas de resiliencia 25
3.4 Resiliencia como medida de sustentabilidad 28
3.5 Microrred resiliente 29
3.5.1 Definición de microrred 29
3.5.2 Definición de microrred resiliente según las facetas de resiliencia 31
3.6 Resumen 32
Capítulo 4 Propuesta metodológica 33
4.1 Introducción 33
4.2 Metodología 33
4.3 Propuesta de medición de resiliencia 39
4.3.1 Prueba de resiliencia 45
4.3.2 Índices evitar, soportar y recuperar 48
4.3.3 Índice de resiliencia 49
4.4 Resumen 50
Capítulo 5 Caso de Estudio: Sistema ESUSCON 51
5.1 Introducción 51
5.2 Descripción caso de estudio 51
5.3 Análisis del sistema ESUSCON 52
5.4 Objetivos del sistemaESUSCON 55
5.5 Calculo de indicadores 55

5.6 Cálculo de indicadores 59

5.7 Cálculo de índices 61

5.8 Análisis de resultados 63

5.9 Análisis de falla en planta PV 67

5.10 Conclusiones caso de estudio 72

5.11 Resumen 73

Capítulo 6 Conclusiones y trabajo futuros 74

6.1 Conclusiones 74

6.2 Trabajos futuros 75

Referencias Bibliográficas 77

Anexo A: Listado de Indicadores para microrredes 84

Anexo B: Indicadores e índices 87

Anexo C: Descripción del sistema ESUSCON y la comunidad de Huatacondo 90

Anexo D: Estimación población diaria de Huatacondo 97

Anexo E: Consumo energía, consumo de Diesel y emisiones CO2 98

Anexo F: Análisis de correlaciones entre indicadores 100

Anexo G: Teoría de microrredes 102

Anexo H: Prueba resiliencia para indicadores caso de estudio 111

Anexo I: Tablas para cálculo de Índices de resiliencia caso de estudio 112

Índice de ilustraciones

Figura 1: Ciclo de aprendizaje cognitivo.....15

Figura 2: Comportamiento de un material ante tensión 22

Figura 3: Facetas de la resiliencia.....25

Figura 4: Arquitectura típica de Microrredes 30

Figura 5: Metodología de monitoreo propuesta 34

Figura 6: Método para análisis del sistema 35

Figura 7: Método de pre selección de indicadores 38

Figura 8: Modelo de la propuesta metodológica 40

Figura 9: Propuesta de agrupación de indicadores de resiliencia.....41

Figura 10: Método de cálculo de índices.....48

Figura 11: Factor de Planta PV 59

Figura 12: Desviación de Tensión y Frecuencia 60

Figura 13: Producción eléctrica con fuentes de energía renovable 60

Figura 14: Índices Evitar, Soportar y Recuperar año 2012 62

Figura 15: Índices Evitar, Soportar y Recuperar año 2013 62

Figura 16: Evolución del Índice de Resiliencia 2012 y 2013.....63

Figura 17: Índice Resiliencia y radiación global horizontal - 2012 64

Figura 18: Índice Resiliencia y radiación global horizontal - 2013 65

Figura 19: Comportamiento delageneración por fuente de energía 2011-2013.....66

Figura 20: Producción con fuente renovable alrededor de la falla en planta PV 68

Figura 21: Factor de planta alrededor de la falla en planta PV 69

Figura 22: Desviación de tensión alrededor de la falla en planta PV.....69

Figura 23: Desviación de frecuencia alrededor de la falla en planta PV.....70

Figura 24: Índices Evitar, Soportar y Recuperar alrededor de la falla en planta PV.....70

Figura 25: Índice Resiliencia al rededor de la falla en planta PV 71

Índice de tablas

Tabla 1: Esquema de la Prueba de Resiliencia para indicadores.....46

Tabla 2: Prueba de Resiliencia para indicadores.....47

Tabla 3: Establecimiento de fronteras y alcance sistema ESUSCON.....53

Tabla 4: Indicadores para evaluación de resiliencia sistema ESUSCON.....57

Tabla 5: Pesos para cada indicador normalizado 61

Tabla 6: Descripción de la falla en Planta PV 67

Listado de abreviaciones

AENS: Average Energy Not Supplied.

ANSI: American National Standards Institute.

ASAI: Average Service Availability Index.

BESS: Battery Energy Storage System.

CERTS: Consortium for Electric Reliability Technology Solutions.

EISA: Energy Independence and Security Act.

EMS: Energy Management System.

ENS: Energy Not Supplied.

ER: Energía Renovable.

ESUSCON: Electricidad Sustentable Condor.

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers.

MIC: Monitoring Interchange and Control.

NIST: National Institute of Standards and Technology.

OECD: The Organization for Economic Co-operation and Development.

ONU: Organización de la Naciones Unidas.

PCC: Point Common Coupling.

PV: Planta de generación Fotovoltaica.

RD: Recurso Distribuido.

RGH: Radiación Global Horizontal.

SAIDI: System Average Interruption Duration Index.

SAIFI: System Average Interruption Frequency Index.

SCADA: Supervisory Control And Data Acquisition

SEP: Sistema Eléctrico de Potencia.

Capítulo 1 Introducción

Este capítulo presenta los antecedentes y motivación que guían esta tesis. En la Sección 1.1 se hace una descripción de los sistemas socio-técnicos basados en microrredes, como objeto de estudio. En la Sección 1.2 se discute el tema de sustentabilidad en sistemas socio-técnicos, como forma de abordar su estudio. En la Sección 1.3 se incluye el concepto resiliencia como medida de sustentabilidad de sistemas socio-técnicos. La Sección 1.4 define el concepto de microrred resiliente. Finalmente, la Sección 1.5 define la estructura de la tesis, contenido, objetivos, metodología y contribuciones.

1.1 Sistemas socio-técnicos

Un sistema Socio-Técnico lo define la interacción de un sistema social con la tecnología, uniendo los requerimientos sociales con los técnicos. Este sistema emerge fruto de la relación entre múltiples actores, creando y reforzando un sistema particular, con expectativas y objetivos asociados a las distintas visiones presentes [1]. El término lo introduce el Instituto Tavistock de Relaciones Humanas de Londres en 1950, debido a la necesidad de la industria manufacturera por incorporar los requerimiento sociales de las comunidades locales [2].

El estudio de estos sistemas no trata solamente de aplicar principios sociológicos a efectos técnicos, sino que además busca entender cómo se integran aspectos sociales y técnicos en un nuevo sistema, que muestra propiedades emergentes. En estos sistemas lo *Técnico* incluye tanto los equipos tecnológicos, así como programas computacionales (en inglés Hardware y Software); por otro lado, lo *Social* se refiere a las personas y sus interrelaciones, junto con sus creencias y normas [2].

Es posible analizar una microrred como un sistema socio-técnico, entendida como una agrupación de elementos eléctricos en baja tensión, que incluye unidades de generación, de almacenamiento y cargas [3]. Este nuevo esquema de red eléctrica permite establecer la

producción de energía en el nivel comunal, y de la interacción de la microrred con la comunidad se establece un sistema socio-técnico.

El objetivo que se plantea en esta tesis es desarrollar una metodología de monitoreo y seguimiento de una microrred, que cuenta con la participación de la comunidad, lo que configura un sistema socio-técnico. Se propone una mirada multidimensional para este propósito, que incluya en el análisis diversos aspectos presentes, con el objetivo de dar un seguimiento a las tendencias y transiciones que sigue el sistema en su fase operativa, y que esto sea un aporte a la toma de decisiones frente a su operación y planificación.

De la revisión bibliográfica, fue posible encontrar que una forma de integrar distintos aspectos en el monitoreo y seguimiento de sistemas en general, es basar el análisis en la Sustentabilidad, entendida como la satisfacción de las necesidades de hoy, sin comprometer a las futuras generaciones [4]. Las necesidades que plantea la definición son de naturaleza económica, social y ambiental, y se sugiere mantener un balance entre estas. De este modo, aplicar el concepto de sustentabilidad para el desarrollo de una metodología de monitoreo y seguimiento de la microrred es un enfoque posible.

1.2 Sustentabilidad en sistemas socio-técnicos

La sustentabilidad se concibe de manera dinámica, multidimensional, y específica a un determinado contexto y espacio temporal. Los sistemas socio-técnicos de manejo sustentable permanecen cambiando, para lo cual deben mantener la capacidad de ser productivos, de auto regularse y de transformarse, sin perder su funcionalidad [5]. Es así como estas capacidades de los sistemas socio-técnicos sustentables pueden ser analizadas mediante un conjunto de atributos o propiedades sistémicas fundamentales, que son: productividad, confiabilidad, estabilidad, autogestión, equidad, adaptabilidad, y resiliencia [5]. Una forma de hacer operativo el concepto de sustentabilidad en sistemas socio-técnicos es por medio de metodologías de evaluación, pues han permitido clarificar y reforzar los aspectos teóricos de este concepto, así como guiar el manejo de los sistemas [5].

La evaluación de sustentabilidad inicia con la definición del sistemas de manejo, u objeto de estudio de la evaluación, luego se sigue un proceso jerárquico, a partir de la

identificación de las fortalezas y las debilidades en cuanto a los atributos antes mencionados, para obtener así un conjunto de indicadores de sustentabilidad que toman en cuentas los aspectos presentes, tradicionalmente son: económicos, ambientales y sociales. Estos indicadores deben quedar coherentemente ligados con los atributos [5]. Se han desarrollado distintas métricas orientadas a cuantificar la sustentabilidad, lo que inició en 1983 con la descripción no cuantitativa de la necesidad por un desarrollo sustentable, y los modos para alcanzarlo [6]. Fue en 1987 cuando la Comisión de Ambiente y Desarrollo de la ONU presentó la agenda global de desarrollo sustentable y la definición, donde el concepto de sustentabilidad tomó fuerza [4].

Con el objetivo de establecer un conjunto de indicadores para cuantificarla sustentabilidad del sistema socio-técnico basado en microrredes, se estudiaron tres metodologías propuestas por organizaciones a nivel mundial, las cuales son de acceso público. Se encontró que las metodologías propone una serie de indicadores independientes, que enfatizan en uno o varios de los aspectos que tradicionalmente separan el estudio de la sustentabilidad, estos son: ambiental, económico y social [7]. Esto ha causado complicaciones en términos de entender la terminología para relacionarla directamente al estudio de microrredes, y la selección de indicadores específicos para los distintos aspectos de la sustentabilidad. Las metodologías revisadas en esta tesis fueron las siguientes:

1. La Organización para la Cooperación Económica y Desarrollo OECD desarrollo una metodología conocida como Indicadores Claves de Ambiente [8]. La metodología propuesta por la OECD fue diseñada para monitorear condiciones ambientales para desarrollo sustentable, e incluye 46 indicadores dirigidos al ambiente, lo social y lo económico [7].
2. La metodología conocida como Global Report Iniciative, es parte de una agrupación voluntaria de organizaciones a nivel mundial[9]. Consiste en 70 indicadores agrupados en tres dimensiones de sustentabilidad: económica, social y ambiental. Por medio de esta herramienta la organización puede analizar su desempeño sustentable. El propósito es proveer evaluaciones y seguimiento a los tomadores de decisión en múltiples niveles de la organización, incluyendo: gerencia, operaciones, y partes interesadas internas y externas [9].

3. La ONU tiene la metodología llamada Indicadores de Desarrollo Sustentable, como propuesta de evaluación de desarrollo sustentable [7]. Incluye 96 indicadores, categorizados en temas que toman en cuenta el desarrollo económico, social y ambiental. Los 14 temas son: pobreza, gobernanza, salud, educación, demografía, peligros naturales, ambiente, tierra, océanos y mares, agua dulce, biodiversidad, desarrollo económico, asociación económica global, y patrones de consumo y producción [10].

A pesar de los esfuerzos de las diversas organizaciones por presentar metodologías de monitoreo, éstas no se ajustan a los requerimientos de un sistema socio-técnico basado en microrredes, por los siguientes aspectos:

- Los métodos de cuantificación de sustentabilidad enfatizan en tres aspectos, estos son social, ambiental y económico, y deja por fuera la dimensión técnica, que no se toma en cuenta, y por tratarse de un análisis de un sistema socio-técnico esto no es admisible.
- Las metodologías revisadas presentan un grupo de indicadores individuales, agrupados por dimensiones, pero no incluyen una mirada integradora por medio de algún índice o indicador compuesto.

Además, utilizar el concepto de sustentabilidad como método de monitoreo y seguimiento de microrredes presenta limitaciones que lo hacen parcialmente aplicable, esta son:

- En la definición de sustentabilidad presentada en Sección 1.1, se puede cuestionar la dificultad en establecer el concepto de satisfacción de necesidades, de manera clara, práctica y de forma cuantitativa. En este mismo sentido, la noción de protección de las futuras generaciones se toma como una acción remota, es decir alejada en el tiempo.
- El concepto sustentabilidad es muchas veces asociado con restricción de recursos y mantenimiento del estatus quo, en lugar de verse como innovación continua, crecimiento, y prosperidad.
- Finalmente, la sustentabilidad no es un estado final que puede ser alcanzado; debe ser vista como una característica dinámica, parte de la evolución del sistema.

Por otro lado, los métodos revisados para el monitoreo de microrredes tradicionalmente se han centrado en el aspecto técnico, con indicadores principalmente de: calidad de energía, confiabilidad, eficiencia, y análisis económico [11], [12], [13], [14]. Este enfoque deja de lado los aspectos sociales y ambientales.

Por lo anterior, es necesario desarrollar una metodología para el monitoreo y seguimiento de microrredes, que incluya la dimensión técnica al análisis del sistema, junto con los aspectos económicos, sociales y ambientales que proponen las metodologías revisadas. Además, este nuevo enfoque debe incluir herramientas para el análisis del sistema, para así conocer las distintas interacciones que se presentan entre las partes, tanto a nivel interno, como en el externo. En este sentido, la metodología propuesta en esta tesis se basa en la definición y medición de resiliencia en la microrred, como uno de los principales promotores de sustentabilidad, dada su capacidad integradora, que logre abarcar aspectos claves del sistema, y que haga práctico el concepto de sustentabilidad.

1.3 Resiliencia como medida de sustentabilidad

En la Sección 1.2 se indicó que la resiliencia es un atributo de la sustentabilidad. Este concepto proviene de la ciencia de los materiales, y su uso se ha extendido a otros campos. Resiliencia se relaciona con la capacidad de un material de volver a su estado original, o de recuperación elástica, cuando es sometido a una tensión que lo dobla, estira o comprime, y luego ésta desaparece [15]. La resiliencia de un material no es una propiedad constante, cambia con el paso del tiempo, y su valor es afectado por factores tales como la magnitud del esfuerzo externo, el contenido de agua dentro del material, el método de fabricación, y los ciclos térmicos a que se somete [15].

En 1973, el concepto fue aplicado en el campo de la ecología de forma más académica por el ecologista canadiense C.S. Holling [16], y lo relacionó con el estudio de los procesos de los ecosistemas. Más tarde, pasa a otros campos, como los ámbitos sociales, sicológicos, y de ingeniería, donde éstos el concepto se desarrolló ampliamente. La razón del incremento en el uso de la resiliencia para el estudio de sistemas en general, es su capacidad integradora, que toma en cuenta la importancia de las partes constituyentes o dimensiones del sistema, y sus

interacciones tanto internas como externas, a lo largo de todo su ciclo de vida [17]. De ahí que aplicar la resiliencia a los sistemas socio-técnicos es posible, ya que esta propiedad es determinada desde el diseño y concepción del sistema, así comodepen de de las condiciones a que se somete durante su existencia. Por lo tanto, se plantea usar este concepto como base para establecer una metodología de monitoreo de microrredes.

En este sentido, diversos autores analizando distintos campos de aplicación, sostienen que la resiliencia es una propiedad de la sustentabilidad, aunque no es la única, pero enfatizan en que es esencial. Por ejemplo, Folke sostiene que resiliencia es una pre condición de la sustentabilidad [18]. Por otro lado, Lebel et al indican que el fortalecimiento de la capacidad de las sociedades para gestionar la resiliencia es fundamental para la aplicación eficaz de la sustentabilidad [19]. Finalmente, Perrings explica que la propiedad más cercana conectada con la sustentabilidad es la resiliencia, dado su aporte en la conservación de oportunidades presentes y futuras frente a perturbaciones, entendidas como eventos que interrumpen o impiden la operación normal del sistema, creando discontinuidad o desplazamiento del estado actual [20],[21]. Lo anterior se expresa en la contribución que hace la resiliencia a la sustentabilidad en tres aspectos fundamentales:

- 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 una perturbación.

Además, el concepto original permite reforzar los argumentos anteriores, ya que expresa que un cuerpo que es sometido a un esfuerzo, vuelve a su estado original cuando éste desaparece, lo que se conoce como la fase elástica, y significa que el material mantiene su forma a lo largo del tiempo. Por el contrario, cuando un cuerpo que se deforma irreversiblemente, producto del esfuerzo a que es sometido, se aleja de la zona elástica y deja de ser resiliente, y su forma original no perduró en el tiempo.

En este trabajo de tesis se propone aplicar el concepto de resiliencia al estudio de los sistemas socio-técnicos basados en microrredes, como atributo de la sustentabilidad. Para esto es necesario definir que es una microrred resiliente, así como las variables que se relacionen

con la capacidad de la microrred en hacer frente a perturbaciones, separando el análisis en tres facetas temporales, estas son: evitar, soportar y recuperar.

1.4 Microrredes resilientes

En esta sección se propone una definición de microrred resiliente, definida como: aquella que tiene la capacidad de regresar a su estado original, cuando es sometida a perturbaciones de tipo social, ambiental, técnica y/o económica, entendiendo estado original como las condiciones de operación de la microrred previas a la perturbación.

El estudio de resiliencia es posible separarlo en tres facetas en la dimensión temporal [22]. El objetivo de este enfoque es tomar en cuenta las acciones previas a una perturbación, de manera preventiva, en la faceta *evitar*; así como la respuesta del sistema cuando la perturbación ha ocurrido, en la faceta *soportar*; finalmente, incluye la habilidad de recuperación del estado original, en la faceta *recuperar*. Lo que se convierte en un ciclo de respuesta frente a perturbaciones, ya sea previo, durante y luego de la ocurrencia de un evento perturbador.

La definición de microrred resiliente es el primer paso para proponer una metodología de monitoreo del sistema, que tome en cuenta la separación en facetas, proponiendo un Índice de resiliencia, un índice evitar, índice soportar, e índice recuperar, construidos a partir de indicadores medidos en la microrred, que tome en cuenta las dimensiones económica, social, ambiental y técnica. Al cuantificar la resiliencia de la microrred a lo largo del tiempo, es posible que los distintas partes interesadas tomen decisiones en procura de mejorar el nivel de los índices, lo que redundará en una mejor capacidad de la microrred frente a las perturbaciones, y con esto se promoverá la sustentabilidad del sistema.

1.5 Objetivos de la tesis

Objetivo General

Proponer una metodología de monitoreo de microrredes, que incorpore su característica de resiliencia como un tema transversal a los aspectos técnicos, sociales,

económicos, ambientales y de gestión, para contribuir al seguimiento y evaluación del sistema, con miras a promover la sustentabilidad de la microrred en el mediano plazo.

Objetivos Específicos

Los objetivos específicos del presente trabajo de tesis son:

1. Describir la teoría de la resiliencia basada en sistemas complejos, que sirvan de fundamento teórico para la metodología propuesta.
2. Proponer una definición de la propiedad resiliencia para microrredes, desde un punto de vista sistémico, considerando la diversidad y complejidad del sistema.
3. Evaluar la metodología propuesta en la microrred ESUSCON, en Huatacondo, Norte de Chile, donde participa el Centro de Energía de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile.
4. Analizar los resultados obtenidos con el fin de entender la relación entre el Índice de Resiliencia en sus tres facetas (evitar, soportar, y recuperar), el involucramiento de la comunidad y el impacto en la toma de decisiones.

1.6 Estructura de la tesis

Los restantes capítulos de esta tesis se organizan de la siguiente manera:

- En el Capítulo 2 se presenta la teoría de sistemas socio-técnicos, con el objetivo de aplicar los conceptos a sistemas basados en microrredes, y conocer las características que éstos presentan, así como las distintas teorías que los estudian.
- El Capítulo 3 desarrolla la relación entre sustentabilidad y resiliencia, con el objetivo de justificar el enfoque hacia la medición de resiliencia como metodología de monitoreo del sistema. Además, se establece el concepto de microrred resiliente, de manera que se proponga una definición para el sistema, así como sus características fundamentales.
- En el Capítulo 4 se hace la propuesta metodológica, y se concreta por medio de los indicadores de resiliencia.

- En el Capítulo 5 se analiza el sistema ESUSCON con la metodología de monitoreo propuesta, como caso de estudio, para conocer su aplicabilidad y utilidad.
- Finalmente, el Capítulo 6 recoge las conclusiones y trabajos futuros propuestos.

Capítulo 2 Sistemas socio-técnicos

2.1 Introducción

Este capítulo presenta el concepto de sistema socio-técnico, que servirá de apoyo para el análisis de la microrred en la metodología propuesta. En la Sección 2.2 se define el sistema socio-técnico. La Sección 2.3 plantea algunas características de las dos dimensiones de estos sistemas: social y técnica. Finalmente, la Sección 2.4 presenta el concepto de transiciones en este tipo de sistemas, desde el punto de vista de diversas teorías de estudio, y profundiza en la transición hacia la sustentabilidad, explicando la postura de cada teoría revisada.

2.2 Concepto de sistema socio-técnico

Un sistema socio-técnico se define como aquel sistema social establecido sobre una base técnica [2]. Es así como el concepto de sistema socio-técnico es un modelo generalizado que reúne las características sociales y técnicas presentes. El concepto fue introducido en el año 1950, cuando se reconoció que los factores sociales y técnicos interactuaban para influir en los resultados alcanzados en un sistema, según las observaciones realizadas en casos particulares [23]. Los trabajos previos a 1950, y algunos actuales, argumentaron el llamado *determinismo tecnológico*, donde se esperaba que las implementaciones tecnológicas tendrían efectos directos positivos en los objetivos planteados [23]. Así, el determinismo tecnológico presume que si se conoce el estado de avance técnico se puede anticipar las consecuencias y resultados del sistema como un todo. Pero a partir del año 1950 el enfoque empezó a cambiar, al notarse que los resultados obtenidos en un sistema podrían ser comprendidos solamente cuando aspectos sociales, sicológicos, económicos, ambientales, y tecnológicos son evaluados como un todo [23]. Esta nueva perspectiva asume que los sistemas son formados por personas (el sistema social), usando herramientas, técnicas y conocimiento (el sistema técnico), para producir bienes y servicios que satisfacen alguna necesidad, y que se establecen en una zona geográfica específica (es parte de un ambiente externo) [23].

Si se recurre a la teoría general de sistemas, se establece que un sistema se forma cuando partes autónomas interactúan mutuamente para crear una nueva entidad autónoma, que actúa como un todo. En tales entidades se establecen distintos tipos de interacciones entre sus partes constitutivas internas, y con el exterior [2]. Un sistema socio-técnico no es solo un sistema social al lado de un sistema técnico, se trata de una entidad que actúa como un todo, trabajando entre sí, y que presenta características que se revisan en la siguiente sección.

2.3 Dimensión social y dimensión técnica

Los sistemas socio-técnicos se enfocan en estudiar cómo la dimensión social y técnica interactúan entre sí. Por ejemplo, la técnica establece requerimientos al tipo de organización social alrededor del sistema, sin embargo una organización tiene características sociales y psicológicas propias que son independientes de la tecnología, por tanto, es necesario conciliar ambos enfoques [23]. De esto se ocupa el estudio de los sistemas socio-técnicos, que incorpora ambas dimensiones.

La dimensión técnica incluye los siguientes aspectos [2]:

- Equipos (en inglés Hardware), entendido como el conjunto de elementos materiales que constituyen el nivel físico.
- Programas computacionales (en inglés Software), referido a los componentes no físicos de un sistema informático, que permiten a este ejecutar tareas específicas.

Por otro lado, la dimensión social es un término referido a las interacciones humanas, que se mantienen de frente a los cambios individuales, comunicacionales o ambientales [2].

El desempeño que alcance el sistema es una tarea que requiere un enfoque multidimensional, ya que puede variar según el aspecto que se revise. Por lo tanto, es posible separar la revisión de los requerimientos y características del sistema socio-técnico en sus cuatro niveles constitutivos, estos son [2]:

- En el nivel de equipos físicos, tiene que ver con las características técnicas que deben estar presentes, por ejemplo en una microrred la potencia generada y el consumo de energía.

- En el nivel de programas computacionales, se deben revisar aspectos como: la funcionalidad, autonomía, modularidad, seguridad contra ataques, entro otros.
- En el nivel personal, se refiere a la capacidad de cumplir tareas por parte de las personas. Además, desde el punto de vista humano se habla de flexibilidad y fiabilidad, para describir la capacidad de reacción ante cambios exteriores e internos.
- En el nivel comunal, tiene que ver con las expectativas de la comunidad y la organización, y toma en cuenta las normas de la sociedad, sus creencias, y la cultura. Igualmente la participación social, que utiliza la moral o el capital social, al igual que el conflicto. Finalmente, se fundamenta en la capacidad de una sociedad para soportar a los conflictos, y en su capacidad de innovar y reinventarse a sí misma.

Establecer un sistema socio-técnico implica procesos de transición y de transformación, que tome en cuenta los cuatro niveles antes explicados. En la siguiente sección se profundiza el concepto de transiciones en sistemas socio-técnicos, por medio de un enfoque que incorpora las expectativas y objetivos asociados a los niveles presentes.

2.4 Transición en sistemas socio-técnicos

Una transición o transformación que se presenta en un sistema socio-técnico es un fenómeno multidimensional, por lo cual éste debe estudiarse desde varios ángulos, por medio de diferentes disciplinas [24]. Las transiciones no son fenómenos que se dan fácilmente, porque los regímenes existentes generalmente se caracterizan por el bloqueo y la dependencia de la trayectoria existente. Es posible que surjan innovaciones dentro del sistema, donde los actores propician la alineación y el desarrollo hacia otros estados, para crear nuevas configuraciones. Estas innovaciones pueden cambiar el estado actual, si la evolución crea presiones sobre el régimen que conducen al rompimiento, a tensiones y a nuevas ventanas de oportunidades. Luchas subsiguientes entre innovación y regímenes actuales, y su posible reemplazo, tienen lugar en múltiples dimensiones del sistema socio-técnico (por ejemplo, en los mercados, las regulaciones, los significados culturales, la infraestructura), y son promovidas por actores que combaten, negocian, buscan, y aprenden a construir coaliciones, y a navegar por las transiciones [24]. El estudio de las transiciones y transformaciones en

sistemas socio-técnicos surgen como uno de los mayores desafíos, a continuación se presentan las distintas teorías que estudian este tema.

2.4.1 Elección racional

En la elección racional los agentes o actores buscan su propio interés. Las personas utilizan la racionalidad como mecanismo para elegir el curso de la acción, y buscan maximizar la utilidad con respecto a sus preferencias. Los actores eligen entre alternativas, y se supone además que tienen plena información acerca de éstas y sus consecuencias. En estas condiciones, los actores pueden hacer análisis costo-beneficio para determinar racionalmente la mejor alternativa [24].

2.4.2 Teoría de la evolución

En la teoría de la evolución el agente o actor es una población heterogénea. La conceptualización de los agentes se basa en la teoría del comportamiento de la empresa, en la que los actores son limitadamente racionales, debido a las limitaciones de procesamiento de información. Los actores utilizan rutinas de uso, heurística, y procedimientos operativos estándar en la toma de decisiones y la solución de problemas del día a día. Las empresas son agentes adaptativos que se dedican a la búsqueda de soluciones de los problemas que se presenten. En este enfoque, los actores no optimizan durante el proceso de toma de decisiones, pero satisfacen las necesidades planteadas, ya que no exploran un universo amplio de opciones, y se detienen cuando encuentran una alternativa que se percibe satisfactoria [24].

2.4.3 Estructuralismo

El estructuralismo percibe a los actores como parte de los colectivos sociales que comparten determinados sistemas de creencias, juegos simbólicos y categorías culturales que proporcionan significado y un sentido de dirección. Estas estructuras cognitivas son, por lo tanto, los agentes causales que definen lo que es deseable, aceptable y legítimo. Las empresas buscan crear aceptación ante la opinión pública. En entornos institucionales, las organizaciones compiten por la aptitud social, en lugar de la eficiencia económica. Esta lucha por la legitimidad social forma así un mecanismo que vincula el comportamiento

organizacional con sistemas de creencias más amplias y la opinión pública. Mientras que los primeros teóricos enfatizaron en la conformidad y la estabilidad, algunos estudiosos también han comenzado a investigar la variedad, y el cambio de la respuesta estratégica ante las presiones institucionales. El proceso básico para la transición es un cambio en los sistemas de creencias, ideologías y la opinión pública [24].

2.4.4 Constructivismo

El constructivismo es, como el estructuralismo, interesado en el "significado", pero toma una mayor orientación hacia el enfoque de la organización. El constructivismo percibe la creatividad y el compromiso de los actores de forma continua en el sentido que dan a las decisiones. La interpretación precede a las decisiones y estrategias, porque los actores necesitan dar sentido a los datos, a las señales y situaciones antes de actuar. Los mecanismos interactivos son conversaciones, debates, negociaciones, y procesos de aprendizaje. El aprendizaje no sólo incluye la práctica a través de la búsqueda y tratamiento de datos; sino también el aprendizaje cognitivo que enfatiza en la reflexión y la construcción de sentido. La acumulación de experiencias o datos dentro de marcos cognitivos constituye el aprendizaje de primer orden, mientras que la alteración de marcos cognitivos que constituye el aprendizaje de segundo orden [24].

La Figura 1 muestra el ciclo de aprendizaje cognitivo que explica la teoría constructivista. En esta el aprendizaje cognitivo y las interpretaciones se reproducen y/o son modificados de forma continua, y el sentido de decisiones. En esta se presenta un proceso continuo con los actores en la discusión e interpretación de los resultados y experiencias [24].

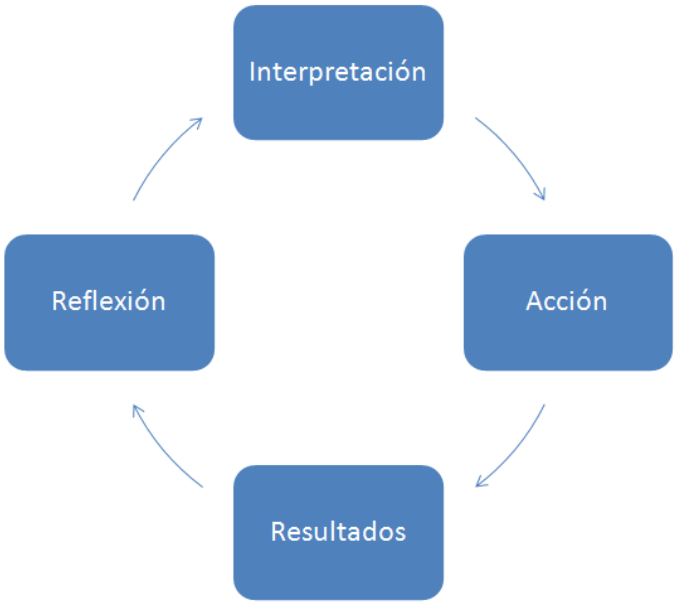


Figura 1: Ciclo de aprendizaje cognitivo

Fuente [24]

2.4.5 Funcionalismo

El agente causal en el funcionalismo es el sistema social, y el cumplimiento de las necesidades del sistema, establecidas por los actores en las metas planteadas, que definen también las funciones o tareas de las partes. Se distinguen cuatro funciones básicas en esta teoría que debe cumplir el sistema para mantener la continuidad [24]:

- Adaptación: se refiere a la interacción con la naturaleza para la producción de materias primas. Para alcanzarlo se han desarrollado industrias, mercados, la ciencia y la tecnología.
- Objetivos: el establecimiento de metas y la implementación de las decisiones apropiadas para su cumplimiento. Se han desarrollado las instituciones políticas para la consecución de objetivos.
- Integración: la creación de la armonía y la convergencia a través de los valores y normas compartida. La religión y la sociedad civil promueven la integración.
- Latencia: mantenimiento del sistema en el tiempo a través de la socialización de nuevos miembros. La instituciones de educación y las familias promueven la latencia.

Todos los grupos sociales deben contribuir al objetivo general: el funcionamiento estable del sistema social.

2.4.6 Conflictos y luchas de poder

Los agentes causales de este teoría son los colectivos sociales, estos son las clases, las asociaciones industriales, los movimientos sociales, los grupos con visión especiales con objetivos e intereses en conflicto. El mecanismo central es el conflicto y la lucha por el poder, donde el grupo dominante utiliza los medios de producción, caracterizados por la fuerza, la dominación, el control, y la exclusión. Se establece que los grupos protegen sus intereses frente a los grupos subordinados que buscan cambiar. Hay varias teorías de conflicto y de poder, que destaca diferentes fuentes de poder y los diferentes grupos sociales [24].

2.4.7 Relacionismo

El relacionismo es una teoría que critica las otras teorías antes presentadas por el supuesto de que la personas tienen atributos intrínsecos para la búsqueda de las causas últimas. El relacionismo por otro lado, asume que la identidad, las preferencias e intereses de las personas son constituidos por las relaciones y el curso de las interacciones, que son, por lo tanto, el agente causal. Las redes dinámicas entre las personas son los agentes primarios de cambios, y los actores son secundarios. Los mecanismos causales enfatizan los procesos tales como la alineación, la inscripción, los apegos, la traducción, la co-construcción y mutua constitución [24].

2.4.8 Transición hacia la sustentabilidad

Una de las transiciones estudiadas de los sistemas socio-técnicos es hacia la sustentabilidad, la cual discute sobre las personas alrededor de sus prácticas cotidianas y formas de vida. Estudios han evidenciado que en los últimos 50 años se han presentado desplazamientos en prácticas sociales en aspectos como: la ducha, la calefacción y enfriamiento en la oficina, la lavandería, entre otros, lo que ha conducido al incremento en el uso de agentes químicos, agua, y energía [24]. Es así como se plantea la necesidad de dar mayor atención al análisis de estas transiciones en los sistemas socio-técnicos, construyendo

además lo que se podría definir como prácticas recomendadas para los usuarios. Se sugiere que cambios en las prácticas sociales hacia la sustentabilidad sea lograda a través de la integración, incorporando diversos elementos en el análisis [24].

Desde el punto de vista de las teorías estudiadas, cada una presenta su enfoque frente a la transición hacia la sustentabilidad [24]:

- Elección racional: asume las transiciones hacia la sostenibilidad como un dilema estratégico para las organizaciones, que tienen que equilibrar los riesgos y oportunidades asociados. La organización puede ser racional para posponer las inversiones debido a las incertidumbres futuras, por ejemplo en las regulaciones gubernamentales, fluctuaciones de los precios, el grado en que las preocupaciones ambientales puedan traducirse en una disposición a pagar más por productos sostenibles. Debido a estas incertidumbres se complican los cálculos racionales del retorno de la inversión, y puede ser racional esperar más claridad. Por otro lado, los líderes pueden encontrar ciertas ventajas, como el reconocimiento de marca, la creación de posiciones de mercado, liderazgo tecnológico, que crean posiciones favorables en las futuras carreras de innovación "verdes". Así, la sostenibilidad se constituye en una dimensión de los juegos estratégicos y competitivos.
- Teoría de la evolución: indica que las transiciones hacia sostenibilidad son impulsados por el desarrollo de nuevas tecnologías. Siguiendo una lógica evolutiva, el proceso consiste en los cambios propuestos, por ejemplo en inversiones en investigación y desarrollo, el desarrollo de competencias, los flujos de conocimiento, relación precio/rendimiento mejorada en las tecnologías sostenibles, y en el entorno de la selección por ejemplo más estrictas regulaciones ambientales o cambios en las preferencias del usuario.
- Estructuralismo: en una visión estructuralista, dos agendas y discursos se discuten en la actualidad por el futuro, estos son: la globalización, con nociones asociadas tales como la competitividad internacional, el crecimiento económico, la regulación limitada, basados en el mercado procesos, la privatización, las responsabilidades individuales; por otro lado, se habla de desarrollo sostenible con transformación social que propone

la modernización ecológica, los roles más fuertes de los gobiernos por regulación, a nivel corporativo se propone la responsabilidad social, y la participación ciudadana.

- Constructivismo: sostiene que las transiciones de sostenibilidad se ven obstaculizados por la ausencia de visiones compartidas. Indican que la sostenibilidad es un concepto ambiguo y controvertido, donde los actores no sólo tienen diferentes interpretaciones de un equilibrio adecuado entre la sostenibilidad social, económica y ambiental, sino que también tienen diferentes clasificaciones de los problemas ambientales, y diferentes puntos de vista sobre las (des) ventajas de las soluciones particulares y los paquetes de políticas más adecuadas. El desacuerdo y el debate es inevitable.
- Funcionalismo: para transiciones de sostenibilidad, el funcionalismo sostiene que las sociedades, especialmente los encargados de formular políticas, deberían fijar metas globales concretas, por ejemplo, las propuestas en el Protocolo de Kyoto. El sentido de urgencia hacia el ambiente será menor, comparado con proponer soluciones a los problemas detectados, como la congestión o la seguridad energética que afectan directamente sistemas de transporte y energía.
- Conflictos y luchas de poder: se sostiene que el problema para las transiciones de sostenibilidad es que muchos industrias catalogadas como no sostenibles tienen recursos económicos considerables y buenos contactos políticos, que pueden dificultar, retrasar o reducir el control estricto de las regulaciones ambientales. Sostiene que los intereses comerciales tienen un amplio margen en definir la política del orden del día. Aumentar la presión de la opinión pública hacia los políticos por un mayor enfoque hacia la sostenibilidad en los sectores económicos, puede presionar con éxito para suscitar los cambios regulatorios y su efectiva aplicación.
- Relacionismo: desplazan la atención sobre sostenibilidad hacia las prácticas de los usuarios y la vida cotidiana, esto significa que la gente experimenta y promulga cambios importantes en las prácticas sociales. Se sostiene que el debate ambiental está sesgado hacia problemas de lado de la oferta, ignorando importantes cambios de la demanda que dio lugar a grandes áreas de vivienda, más artículos para el hogar , mayor el consumo de carne , una mayor movilidad, viajes a más largas distancias. Por tanto, estos estudiosos piden una atención más analítico a la dimensión social en las

transiciones socio-técnicos y para el análisis de la construcción del estado de "normalidad" en las prácticas de los usuarios. El enfoque tiene como objetivo entender la transformación de rutinas y hábitos comunes.

2.5 Resumen

En este capítulo se presenta el concepto de sistema socio-técnico, como fundamento para analizar el sistema formado por la microrred y la comunidad. Se explicaron sus dos dimensiones: social y técnica. Además, se profundiza el tema de las transiciones en estos sistemas, como una forma de estudiar su comportamiento frente a cambios internos y externos. Para este efecto, se presentaron diversas teorías que se han ocupado de su estudio.

Finalmente, se recopila la postura de las distintas teorías estudiadas frente a la transición hacia la sustentabilidad, ya que debate sobre la conducta de las personas alrededor de las prácticas cotidianas y formas de vida, lo que puede ser seguido por medio de los indicadores e índices de resiliencia que se proponen más adelante en este trabajo de tesis.

Capítulo 3 Sustentabilidad y resiliencia

3.1 Introducción

Este capítulo presenta la definición de sustentabilidad en la Sección 3.2, y de resiliencia en la Sección 3.3. En la Sección 3.4 se presenta el enfoque de resiliencia como medida de sustentabilidad, que da soporte a esta tesis. Finalmente, en la Sección 3.5 se desarrolla el concepto de microrred y microrred resiliente.

3.2 Definición de sustentabilidad

El concepto general de sustentabilidad fue propuesto originalmente en 1987 por la Comisión Mundial en Ambiente y Desarrollo de la ONU, al definirla como: "satisfacer las necesidades del presente, sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones por satisfacer sus propias necesidades" [4]. De esta definición, se puede concluir que la idea de sustentabilidad es pragmática y antropocéntrica, ya que está centrada en el ser humano y su bienestar, es decir la base de la sustentabilidad son las necesidades humanas. Sin embargo, la sustentabilidad muestra una propiedad esencial que toma en cuenta el ambiente, en primera instancia al incorporar la mirada de largo plazo en su enfoque, y también al incluir la dimensión ambiental en sus consideraciones [25].

Por lo tanto, un sistema es sustentable si es capaz de mantenerse a lo largo del tiempo, y puede transformarse oportunamente, cuando las condiciones así lo exigen, para seguir funcionando. Para que esto ocurra, los recursos y procesos que lo hacen funcionar deben ser capaces de mantenerse en el tiempo. Esto implica que debe incluir los siguientes atributos: auto promoverse, auto regularse, coordinarse para ser compatibles, amortiguar las perturbaciones adversas, reorganizarse y adaptarse cuando se presenten cambios estructurales internos y externos [5]. Esta capacidad se puede describir de manera general por medio de los siguientes atributos, que determinan la sustentabilidad [5]:

- Productividad: se relaciona en el nivel de bienes y servicios producidos, que establece valores de: proceso por unidad de tiempo o insumo invertido. Se aplican aspectos como rendimientos, ganancias, retornos, etc.
- Estabilidad: un sistema para ser estable debe tener mecanismos internos que regulen el estado de sus variables críticas, de manera que sean mantenidas en un rango de valores que permitan el funcionamiento.
- Confiabilidad: está relacionado con la probabilidad de que las variables críticas del sistema se alejen de los límites de tolerancia.
- Adaptabilidad: se relaciona con la capacidad del sistema de reorganizarse para seguir funcionando cuando experimenta cambios internos o externos irreversibles.
- Autogestión: un sistema tiene autogestión si su capacidad para funcionar, regularse y evolucionar dependen en mayor medida de sus recursos propios, interacciones y procesos internos, y menos de intervenciones y procesos externos que no controla.
- Equidad: está relacionado con la distribución de manera apropiada de los beneficios y costos entre los agentes participantes, tanto entrecomo inter generacional.
- Resiliencia: este atributo es el objeto de estudio de esta tesis, y se define en la siguiente sección.

Sobre la base de la definición original, es posible extender el concepto de sustentabilidad para el sistema socio-técnico basado en microrredes, definiendo una microrred sustentable como: -Aquella que alcanza satisfacer las necesidades energéticas presentes de una comunidad, sin comprometer la habilidad de las futuras generaciones en la satisfacción de sus propias necesidades energéticas.-

La definición de sustentabilidad tiene implícito una dificultad para su medición y cuantificación, como lo explica Lior [6], debido a que el espacio de interés y su contenido/fin puede cambiar con el tiempo. Además, el ciclo de vida de un sistema varía con el tiempo, ya sea por nueva legislación, el descubrimiento de nueva información, cambios en las actitudes, en la población, nuevos eventos, y otros. Es así como se propone un nuevo enfoque hacia la medición y cuantificación de sustentabilidad por medio de resiliencia, como una propiedad del sistema. A continuación se discute al respecto.

3.3 Definición de resiliencia

El concepto resiliencia proviene de la ciencia de los materiales, y tiene que ver con una magnitud que cuantifica la cantidad de energía por unidad de volumen que almacena un material al deformarse elásticamente debido a una tensión aplicada. Por lo tanto, es aquella zona donde el material que se somete a una tensión, éste se deforma, y al desaparecer la tensión el material vuelve a su estado original, sin deformarse permanentemente [15]. La Figura2 muestra el comportamiento de un material frente a una fuerza de tensión, evidenciando la zona resiliente, como aquella zona elástica. Sobrepasar la zona resiliente implica el no regreso al estado original, con la posibilidad de llegar a la ruptura del material si la tensión sigue aumentando.

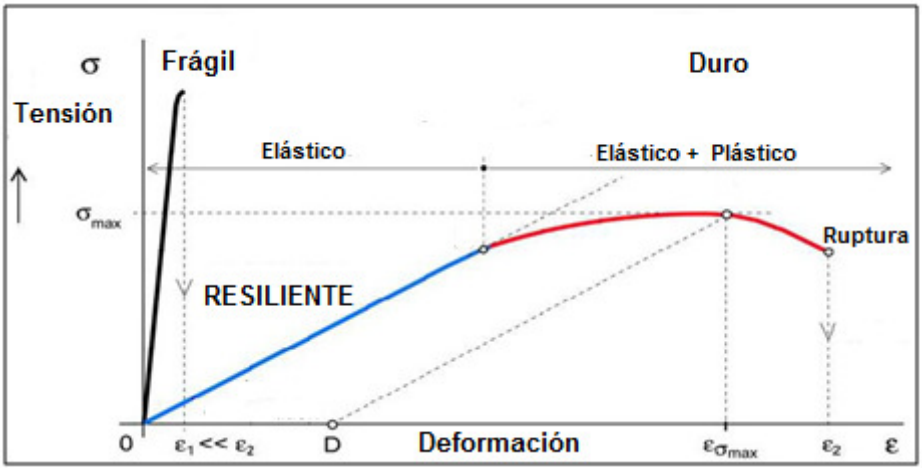


Figura 2: Comportamiento de un material ante tensión

Fuente: [15]

En el año 1973, C. S. Holling define resiliencia para los sistemas ecológicos como la "medida de la persistencia de relaciones dentro de un sistema, y es una medida de la habilidad de los sistemas para absorber cambios de variables de estado, de conducción, parámetros, y aún persistir, retornando a su estado original [16]."En vista de que Holling aplica el concepto al campo de la ecología, el término persistirse relaciona con mantener los sistemas ecológicos a lo largo del tiempo.

Los conceptos relacionados con resiliencia se revisan a continuación.

3.3.1 Ingeniería de resiliencia

El campo de la ingeniería de resiliencia enfatiza en la importancia de medir la resiliencia, y sugiere el desarrollo de metodologías para analizarla, así como su promoción en los sistemas [21]. En este sentido, se hace necesario desarrollar métricas que midan esta propiedad de los sistemas, y que sean útiles para la toma de decisiones en procura de su mejoramiento [26]. Además, se hace necesario modelar y predecir en el corto y largo plazo los efectos que traerán cambios y decisiones que se tomen para la resiliencia del sistema. Los retos para desarrollar una métrica de resiliencia son los siguientes [26]:

- La medición de resiliencia es una tarea que requiere comprender la complejidad de las interrelaciones e interdependencias de un sistema y su ambiente.
- La resiliencia es un atributo emergente de un sistema, el cual requiere de ciertas condiciones para medirse.
- Es una característica dinámica, más que estática, y requiere mayor comprensión del sistema y metodologías de medición.

Además, se requiere analizar las propiedades sistémicas siguientes [26]:

- Articulación del propósito del sistema, y de esto definir la frontera del sistema.
- Identificación de los diferentes componentes del sistema o elementos, que requiere para alcanzar su propósito.
- Análisis de las relaciones entre los distintos componentes y elementos para comprender cómo éstos trabajan entre sí para alcanzar el propósito del sistema.
- Revisión de la interacción del sistema con el ambiente, la influencia del mismo sobre el ambiente y cómo los efectos del ambiente cambian dentro del sistema.

Un concepto presente en el estudio de la resiliencia es el de perturbación, que se estudia a continuación.

3.3.2 Perturbaciones

Se define perturbación como las condiciones o eventos que interrumpen o impiden la operación normal creando discontinuidad o desplazamiento [21]. Cuando se presenta una

perturbación, la reacción del sistema pueden tomar diversas formas, desde el punto de vista de la resiliencia se distinguen dos tipos, estas son: reacción y adaptabilidad. La reacción implica la inmediatez y el corto plazo en las acciones; mientras que adaptación tiene que ver con el aprendizaje a largo plazo [21].

Existen dos tipos de perturbaciones, según su origen, a continuación se definen y analizan.

3.3.2.1 Perturbaciones externas

Causadas por factores externos al sistema. Es clave que el sistema cuente con la capacidad de detectarlas y desarrollar apropiadas acciones correctivas. Sin embargo, asegurar resiliencia en un sistema es un reto cuando la magnitud de una potencial perturbación no puede ser predicha. El concepto de magnitud de la interrupción externa es altamente debatible. La primera implicación sobre perturbaciones externas es que se debe construir sistemas con un margen de seguridad que tome en cuenta la incertidumbre [21].

3.3.2.2 Perturbaciones internas

Es una alteración de la función o la capacidad del sistema. Esto se manifiesta en fallas de componentes que forman parte del sistema. Se distinguen por el origen en: agentes humanos, sistemas automatizados o combinación de ambas, esta son [21]:

- Agentes humanos: los agentes humanos son fuentes potenciales de perturbaciones, esto significa que su actuación es impredecible, aunque por otro lado, son capaces de aprender y adaptarse.
- Agentes automatizados: relacionado con los componentes automatizados presentes en los sistemas, los cuales pueden provocar perturbaciones.
- Combinaciones: son perturbaciones producto de combinaciones de agentes humanos y automatizados. Pueden tomar distintas formas, según la cantidad de agentes involucrados y los tipos de conflictos entre estos.

3.3.3 Facetas de resiliencia

Es posible analizar la resiliencia de un sistema como la separación de los siguientes momentos temporales o facetas [21]:

- Anticipación y preparación antes de un evento perturbador.
- Soportar la perturbación, con el requisito de sostener la operación.
- Recuperar el estado luego del evento perturbador, el cual puede ser el mismo estado previo u otro distinto.

Este enfoque muestra tres facetas, que definen el comportamiento del sistema alrededor de una perturbación en el tiempo, y se denomina como *análisis temporal asociado al incidente perturbador* [27]. La Figura 3 presenta la propuesta anterior, donde: $\delta(t)$ es la medición de resiliencia del sistema; t_0 es el tiempo de inicio de la observación; t_e es el tiempo en que un evento perturbador incide sobre el sistema; t_d es el tiempo de la etapa soportar, donde está incluida la detección de la perturbación; t_s es el tiempo en que el sistema inicia la recuperación; t_f es el tiempo final de la observación; y $\Delta\delta(t)$ es el cambio de resiliencia del sistema en el periodo de observación. De esta forma: $\delta(t_0)$ es el estado inicial de resiliencia; $\delta(t_d)$ es el estado de resiliencia al final de la faceta soportar; y $\delta(t_f)$ es el estado de resiliencia en el tiempo final de la observación.

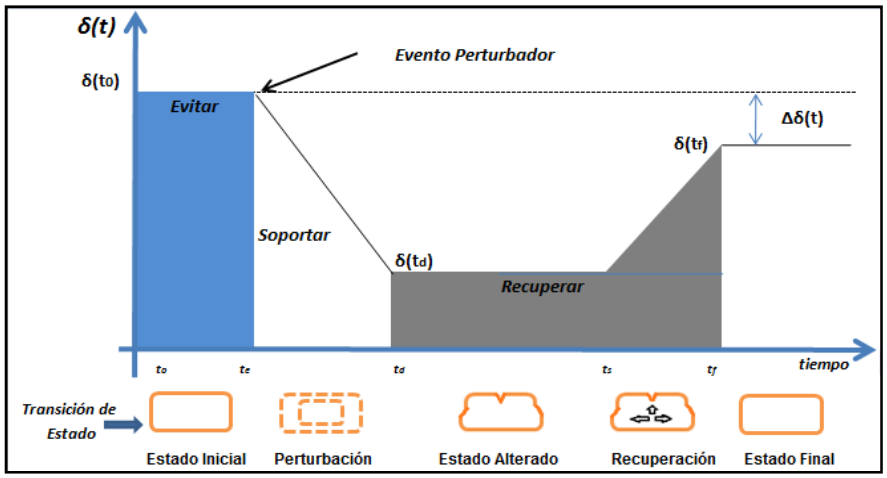


Figura 3: Facetas de la resiliencia

Fuente: [27]

Se define el cambio de resiliencia del sistema en el periodo de observación, comprendido entre t_0 y t_f, como:

$$\Delta\delta(t) = \delta(\mathrm{t}_f) - \delta(\mathrm{t}_0) \tag{1.1}$$

Si $\Delta\delta(t) = 0$ entonces el nivel de resistencia en el estado final es el mismo que el inicial, y se puede concluir quela resiliencia se mantiene; pero si $\Delta\delta(t) > 0$se concluye que en el estado final se incrementa la resiliencia respecto al inicial; finalmente, si $\Delta\delta(t) < 0$ la conclusión es que se presenta una pérdida de resiliencia comparando el estado inicial con el final.

Cada faceta de resiliencia se presenta continuación:

3.3.3.1 Faceta evitar

Evitar significa anticiparse a las perturbaciones, que tome en cuenta acciones de predicción de eventos, además de acciones pro activas para evitar su ocurrencia o consecuencias [21]. A continuación se enumeran las principales características de la faceta evitar, incorporando aspectos relacionados con microrredes:

- Es una propiedad emergente del sistema.
- Inherente al diseño del sistema.
- Incluyen los planes de prevención.
- En ausencia de la perturbación la operación del sistema lo rige su confiabilidad.
- Identificación y gestión de riesgos.
- Mantenimiento preventivo.
- Mantenimiento predictivo y monitoreo de la condición.
- Retroalimentación a la comunidad.
- Cumplimiento de normativas y estándares.
- Programas de capacitación.
- Diversidad entendida como la existencia de múltiples partes y distintos comportamientos.

La faceta evitar se fundamenta en dos conceptos claves, estos son: diversidad y anticipación. En primer lugar, la diversidad se define por la variedad de partes constituyentes, múltiples configuraciones posibles, diversidad de estrategias y acciones, y la redundancia de partes físicas y funcionales. De manera que el sistema se prepare para responder ante perturbaciones [28]. Por otro lado, la anticipación envuelve la habilidad de mirar hacia adelante, determinando cómo cambiarán las condiciones futuras, para direccionar la toma de decisiones en el presente que promueva resultados deseables y evitar consecuencias indeseable de posibles perturbaciones [21].

3.3.3.2 Faceta soportar

Soportar perturbaciones requiere de un sistema robusto, entendido como aquel que absorbe el choque de la perturbación, con los recursos propios, sin hacer cambios significativos en el sistema para responder [21]. A continuación se enumeran las principales características de la faceta soportar incorporando aspectos relacionados con microrredes:

- Refleja la capacidad de absorción del sistema.
- Uso adecuado de protecciones.
- Capacidad del sistema para responder a perturbaciones.
- Asociado con la vulnerabilidad.
- Respuesta rápida y eficiente.
- Estrategias de control.
- Márgenes de Reserva.
- Procedimientos de emergencia.
- Planes de contingencia comunitarios.

La faceta soportar se presenta dos características fundamentales, que son: cohesión y eficiencia. En primera instancia, la cohesión permite evidenciar aquellas fuerzas unificadoras dentro del sistema, que promuevan la reacción del mismo como un todo frente a perturbaciones. Se expresa en situaciones como desarrollo de la identidad, fuertes alianzas, cooperación, coordinación, entre otras [28]. Por otra parte, la eficiencia se relaciona con el desempeño logrado por medio de un consumo moderado de recursos. Es aplicado en muchos campos, incluye por ejemplo, la medición del valor producido por unidad de recurso

consumido. Además, es posible establecer procesos toma de decisión eficientes, y de procesos de conversión de energía eficientes [28].

3.3.3.3 Faceta recuperar

Por ser un análisis en el tiempo, la siguiente etapa es la faceta recuperar, que se presenta en caso de que la perturbación provoque una caída mayor de resiliencia, y no sea superada en la faceta anterior. Esta etapa implica la reconfiguración del sistema por medio de sus variables de control, para restaurar el estado al nivel previo a la perturbación, o el más cercano posible. Esta faceta incorpora la capacidad adaptiva del sistema, al adecuarse a las nuevas circunstancias [21].

Recuperar presenta dos características fundamentales como son: adaptación y aprendizaje. En primer lugar, adaptación envuelve la habilidad del sistema para ajustarse ante perturbaciones, con la capacidad y recursos disponibles. Implica la reorganización, donde el sistema se reestructura en respuesta al evento perturbador [21]. Fiskel define adaptabilidad como la flexibilidad para cambiar en respuesta a nuevas presiones [28]. Por otro lado, el aprendizaje explica la permanente adquisición de conocimiento sobre el funcionamiento del sistema, esto se refleja en la operación del mismo, al mejorar la organización y la bases del sistema [21].

3.4 Resiliencia como medida de sustentabilidad

Un indicador de sustentabilidad debe medir la capacidad del sistema para adaptarse y seguir funcionando, de forma que mantenga un estado o función deseada a lo largo del tiempo. Lo anterior depende de los atributos del sistema que le permiten adaptarse a los cambios y absorber perturbaciones. Además, una medida útil de la sustentabilidad no sólo debe describir el estado del sistema, si no también debe proporcionar alertas tempranas de problemas que pueden presentarse. La resiliencia refleja esta capacidad del sistema para absorber las tensiones y adaptarse al cambio, al igual que dar alertas tempranas de cambios de estado. Convertirla en un indicador de sustentabilidad debe tener en cuenta los riesgos e incertidumbre que afecta al sistema, así como la capacidad de absorber perturbaciones del sistema, y las interrelaciones entre las variables. En la investigación de la sustentabilidad se ha utilizado con

frecuencia la perspectiva hacia la resiliencia [29]. Como se explicó en la Sección 1.2, desarrollar métricas para cuantificar la sustentabilidad del sistema conlleva dificultades y limitaciones que promueven la búsqueda de otras alternativas, por lo que esta tesis propone un enfoque hacia la resiliencia [30].

A continuación se incluye el concepto de resiliencia al campo de microrredes, con la propuesta de definición de microrred resiliente, como uno de los aportes de esta tesis.

3.5 Microrred resiliente

3.5.1 Definición de microrred

Si bien el concepto de microrred continúa en discusión en los círculos técnicos, ésta puede definirse como una agrupación de elementos eléctricos en baja tensión de generación, de almacenamiento y cargas (usuarios). Sobre la generación, puede ser de diversa tecnología, entre los cuales están: micro turbinas, motores reciprocantes como el caso de grupos electrógenos basados en Diesel o Gas, o fuentes renovables como aerogeneradores y plantas fotovoltaicas [3].

Un concepto de microrred altamente usado y aceptado es el que ha dado el CERTS de EE.UU. (del inglés Consortium for Electric Reliability Technology Solutions), que la define como una agregación de cargas y pequeñas fuentes generadoras operando como un único sistema de potencia y calor [31]. En este contexto, es necesario incluir el término: recurso de generación distribuida, o RD (del español Recurso Distribuido), definido como pequeños generadores de potencia emplazados en los mismos lugares de los usuarios finales, donde la energía, tanto eléctrica como térmica, es consumida. Estos recursos emergen como una opción prometedora para satisfacer las necesidades de energía eléctrica con un énfasis hacia la confiabilidad y la calidad. El termino RD abarca los siguientes elementos: generadores, almacenadores de energía, control de carga, y, en ciertos sistemas, las interfaces de electrónica de potencia entre el generador y el almacenador.

Una microrred tiene la capacidad de operar interconectada a la red principal, donde la necesidad adicional de potencia se suple desde ésta, y cuando tiene excedentes se pueden tranzar con la red. O bien, pueden operar en condición aislada o isla, situación que se

producen por: causa obligada, como un desastre natural; por una necesidad como en comunidades alejadas; o por elección como en ciertas aplicaciones especiales, un ejemplo son centros de datos informáticos.

La arquitectura típica de una microrred se muestra en la Figura 4. La configuración incluye las cargas, los elementos de almacenamiento y la generación eléctrica. El almacenamiento ayuda a mantener el equilibrio entre suministro y demanda de potencia, dado la variabilidad de las fuentes de energía renovables, que cambian su capacidad según la hora de día, el día de la semana y la estación del año. El concepto se extiende al uso combinado del calor y electricidad, con miras al aumento de eficiencia [32]. El punto de acople al sistema es en el nivel de distribución, conectado en un único punto, conocido como el punto de acoplamiento común o PCC (por sus siglas en inglés de point of common coupling).

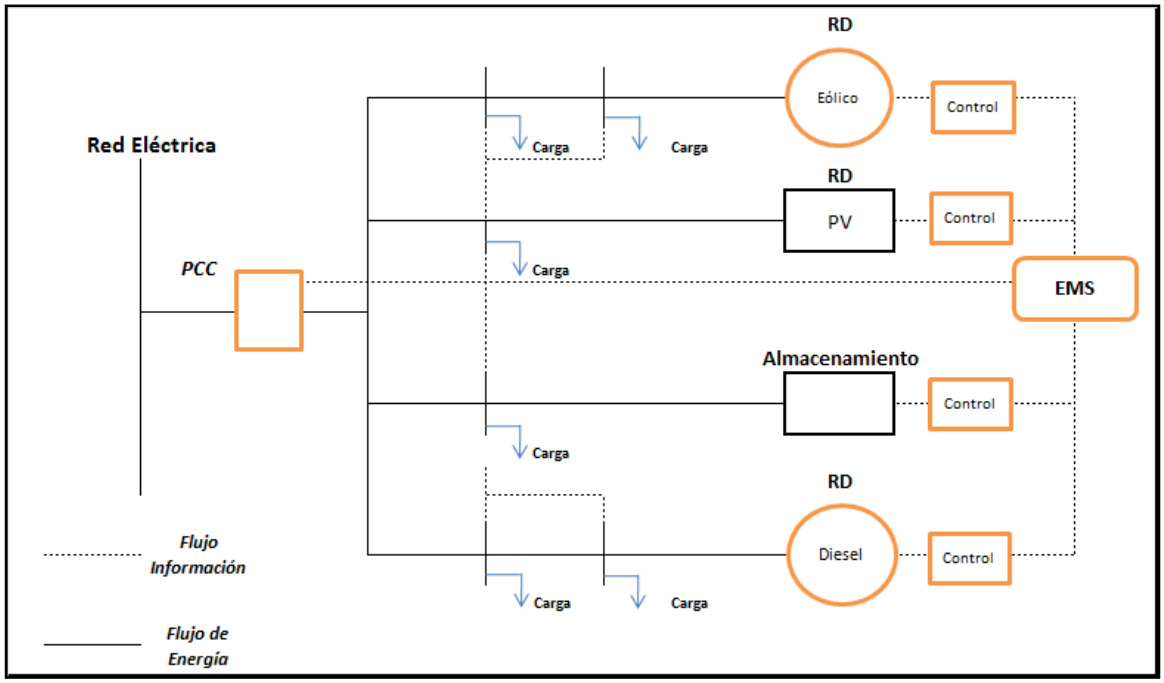


Figura 4: Arquitectura típica de Microrredes

Fuente: Basada en[32]

En la microrred se reconocen tres componentes claves, estos son:

- Controladores locales de recursos distribuidos: dan respuestas en el orden de milisegundos, se encargan de controlar los RD por medio de información local.

- Optimizador del sistema: es provisto por el sistema de manejo de energía EMS (del inglés Energy Management System), y usa diversa información para operar.
- Protecciones: responden ante condiciones de falla de la red eléctrica o de la microrred.

3.5.2 Definición de microrred resiliente según las facetas de resiliencia

En la Sección 1.4 se definió una microrred resiliente, entendida como aquella que tiene la capacidad de regresar a su estado original, cuando es sometida a perturbaciones de tipo social, ambiental, técnica y/o económica, entendiendo el estado original como las condiciones de operación de la microrred previas a la perturbación. Según el análisis basado en las facetas de resiliencia, una microrred resiliente es aquella que se caracteriza por lo siguientes aspectos según la faceta [33]:

- Evitar: son los aspectos preventivos de la microrred resiliente frente a perturbaciones posibles. El concepto va más allá del tradicional enfoque hacia la seguridad, se refiere más bien a la anticipación de un contratiempo basado en la habilidad por detectar desviaciones hacia potenciales fallas. Evitar se relaciona con prevención y con anticipación.
- Soportar: describe la habilidad de resistir la operación frente a una perturbación. Es importante en esta faceta la detección temprana del evento perturbador.
- Recuperar: esta faceta se relaciona con la capacidad de la microrred por superarla perturbaciones, aunque con opción por reducir su desempeño. Recuperación se relaciona con los procesos de adaptación.

Sobre la base de lo explicado en la Sección 3.3.3., en la microrred resiliente se identifican cuatro características fundamentales, que contribuyen a la promoción e incremento de la resiliencia en el sistema, estas son [28]:

- Diversidad: que tiene que ver con la existencia de múltiples partes y comportamientos.
- Eficiencia: relacionado al consumo de recursos y energía para la operación del sistema.

- Adaptabilidad: influye la flexibilidad para cambiar en respuesta a nuevas presiones.
- Cohesión: se relaciona con la existencia de fuerzas unificadores y sostenedoras.

3.6 Resumen

En este capítulo se presentaron los conceptos de sustentabilidad y resiliencia, que sirven de base para la formulación de la propuesta metodológica. El concepto sustentabilidad se toma de la Comisión Mundial en Ambiente y Desarrollo de la ONU, y el de resiliencia que proviene de la ciencia de los materiales. Así mismo, se propone separar el análisis de resiliencia en tres facetas, que analicen al sistema socio-técnico frente a perturbaciones. Finalmente, se explica el enfoque de esta tesis hacia la resiliencia, como medida de sustentabilidad en sistemas socio-técnicos.

Además, en este capítulo se aplicó el concepto de facetas de resiliencia para ampliar la definición de microrred resiliente, enumerando sus características desde el punto de vista de las tres facetas. Además, se establecen las características fundamentales de la microrred resiliente, la cual es el objeto de estudio de esta tesis.

Capítulo 4 Propuesta metodológica

4.1 Introducción

En este capítulo se presenta la metodología de monitoreo de microrredes por medio de indicadores de resiliencia. En la Sección 4.2 se desarrolla la metodología. Finalmente, en la Sección 4.3 se presenta el método de medición de resiliencia para el sistema socio-técnico basado en microrredes, definiendo la prueba de resiliencia para los indicadores, así como los índices evitar, soportar, recuperar y de resiliencia.

4.2 Metodología

En esta sección se establece la metodología de monitoreo de microrredes basado en indicadores de resiliencia, para lo cual se propone un procedimiento con los pasos a seguir en su aplicación. Las tres premisas que guían esta propuesta son las siguientes:

- Se basa en indicadores del sistema, que lo evalúan en un periodo de tiempo, posterior a la ocurrencia de eventos y resultados.
- La metodología es una herramienta dirigida a todas las partes interesadas, entre otras estas son: la comunidad, el desarrollador, el patrocinador, el operador, los entes estatales involucrados. Por lo tanto, debe ser accesible y comprensible por todas éstas, luego de un entrenamiento de uso.
- La metodología propone una forma de cuantificar la resiliencia de la microrred, para hacer un seguimiento de la misma, relacionado con la capacidad del sistema frente a perturbaciones, lo que apoyará a las partes interesadas en la toma de decisiones a lo largo del tiempo.

La Figura 5 presenta las seis etapas para la metodología propuesta. Algunas de las etapas tienen una indicación de la información requerida para su aplicación. Además, la etapa III denominada *guía de selección de indicadores*, corresponde a una rutina compuesta por tres

sub rutinas. Como etapa final, la número VI se denomina *grupo de indicadores para la microrred*, que establece el resultado final. Cada una se explica a continuación.

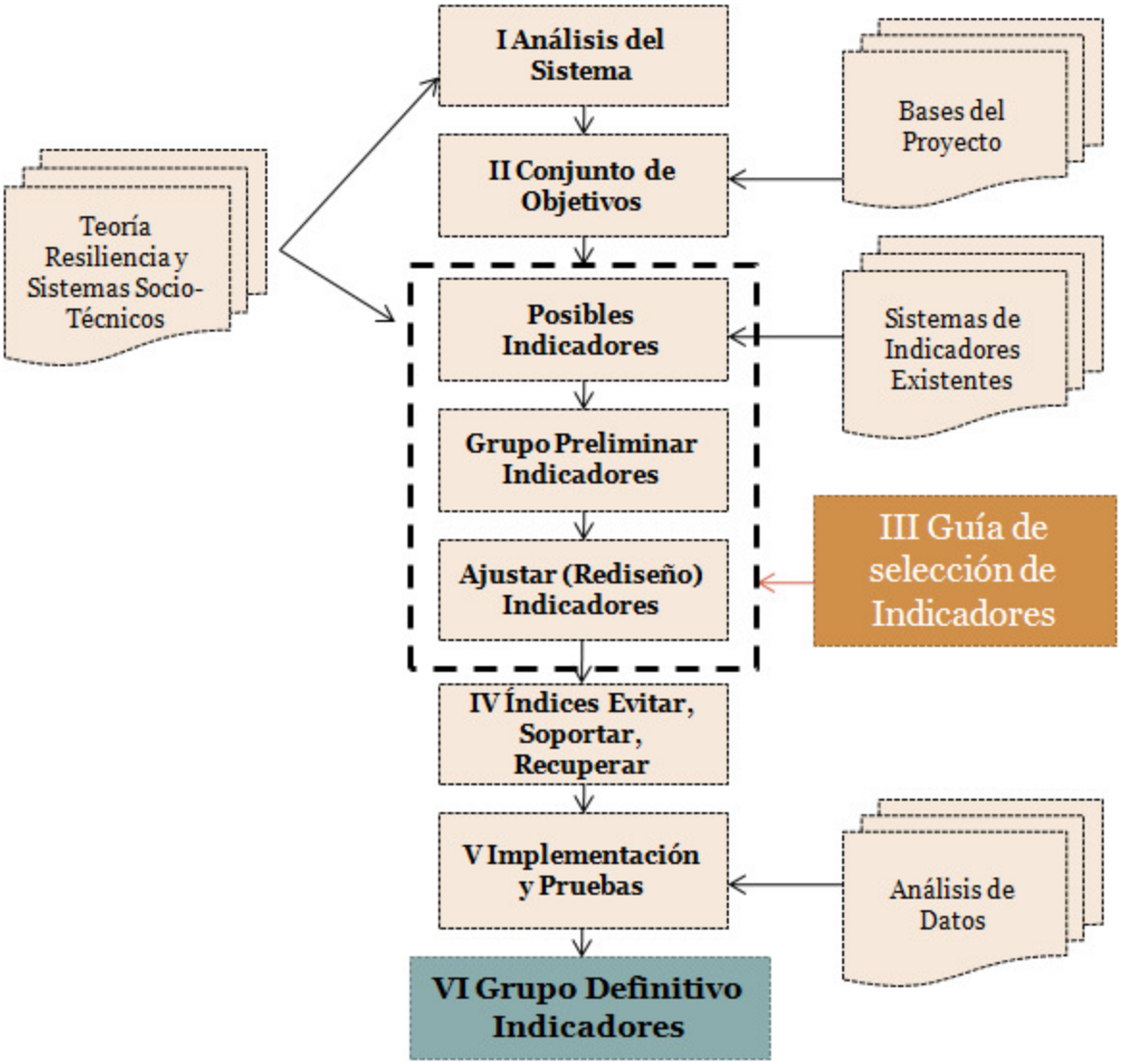


Figura 5: Metodología de monitoreo propuesta

Fuente: Propia

Cada una de las etapas se explican a continuación:

I. Análisis del sistema: como información requerida se tiene la teoría de resiliencia y de los sistemas socio-técnicos del Capítulo 2. En esta etapa establece el alcance de la microrred, y es el punto de partida del método, ya que debe analizar las particularidades del sistema. Uno de los aspectos importantes a considerar es el estudio de las

transiciones que se presentan en la microrred, para esto se sugiere apoyar el estudio en alguna teoría presentada en la Sección 2.4. Particularmente, el relacionismo ha sido utilizada en el estudio de la microrred del caso de estudio [1].

El método para desarrollar el análisis del sistema se compone de ocho pasos, el que aparece en la siguiente Figura 6, y se explican a continuación.

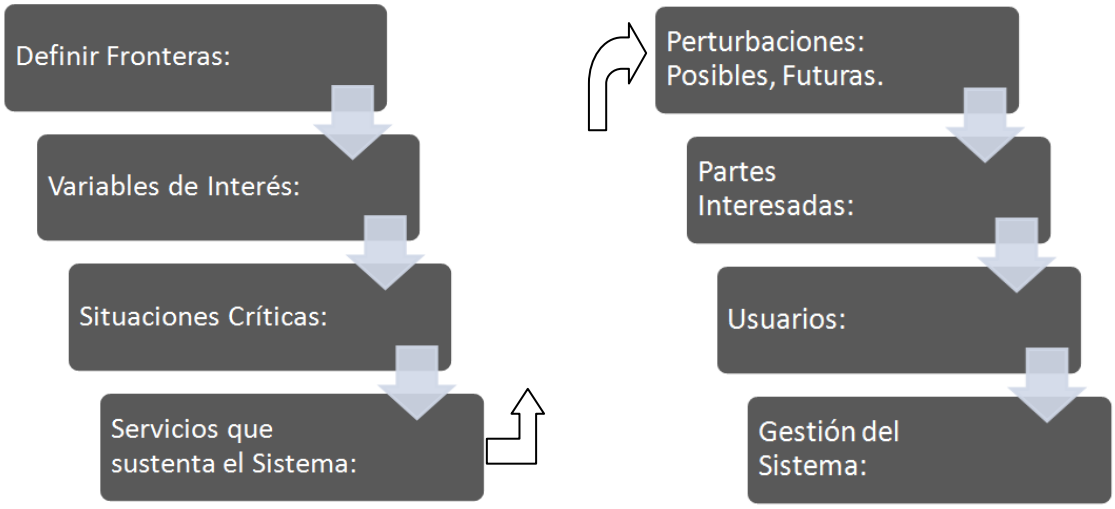


Figura 6: Método para análisis del sistema

Fuente: Basado en [34]

- Definir fronteras: el primer paso de una evaluación basada en resiliencia es definir los límites o fronteras del sistema, para conocer el alcance. Estos límites, tanto espaciales como temporales, comprenden lo que se conoce como el sistema de coordinación, o alcance. Una forma de definir fronteras es identificar los principales problemas que el desarrollo del sistema busca resolver. Sin embargo, las primeras evaluaciones pueden cambiar conforme la comprensión y conocimiento del sistema profundiza. Cualquier sistema está influenciado por factores que se encuentran tanto en el exterior y dentro de sus límites, por tanto, una evaluación completa debe tener en cuenta las interacciones. También se incluye en esta etapa la identificación de sub sistemas, que son agrupaciones de partes que desarrollan una función específica [28].

- Variables de interés: considerar todas las variables que son relevantes en la definición y operación del sistema, identificando a que parte del sistema se refiere cada una. La identificación de las variables de interés del sistema requiere una diversidad de perspectivas, al incluir aspectos sociales, económicos, ambientales y técnicos. Se requiere la participación de todas las partes interesadas, que incluya a los conocimientos locales que pueden proporcionar conocimiento útil de las variables del sistema [34].
- Situaciones críticas: al identificar las situaciones críticas del sistema se espera enmarcar el análisis en torno a uno o varios temas relacionados, para proporcionar un grado de concentración. En muchos casos, las situaciones a considerar son evidentes. En otros casos, el principal problema (s) puede variar según la perspectiva de cada parte interesada o usuario. Identificar y definir el problema principal (es) normalmente requiere la diversidad de perspectivas, que tome en cuenta a varias personas involucradas [34].
- Servicios que sustenta el sistema: el principal servicio que presta la microrred es el suministro eléctrico a distintos usuarios, sin embargo pueden existir otros que deben ser enumerados y analizados [34].
- Perturbaciones: por ser una análisis basado en resiliencia, resulta clave establecer las perturbaciones que puede sufrir el sistema, sean estas de tipo disturbios, de interrupciones en el sistema, de tipo conflictos, y otros. La incertidumbre en torno a la ocurrencia y magnitud de tales eventos resulta un desafío para la gestión de los sistemas y asegurar así el suministro confiable de servicios. El sistema de monitoreo propuesto se debe hacer cargo de la mayor cantidad de perturbaciones, y no necesariamente puede llegar anticipar a todo el grupo identificado de perturbaciones posibles, ya que puede significar el uso de significativos recursos.
- Partes interesadas: conocer y caracterizar las partes interesadas es un paso clave en el análisis, así como analizar la coordinación entre las distintas partes. Son organizaciones con responsabilidades. Cada organización está marcada por sus estrategias y estructuras particulares, que tienen la capacidad de evolucionar

con el tiempo. El papel que los actores asumen puede estar compuesto de una o más funciones [35]. En la Sección G.6.1 del Anexo G, se definen las distintas partes interesadas en este tipo de sistemas.

- Usuarios: el usuario obtiene el servicio eléctrico y otros servicios del sistema para satisfacer sus necesidades. La meta debe ser responder a sus expectativas. Implica conocer la relación usuarios-organizaciones directivas, y establecer el grado de involucramiento y apoyo por parte de los usuarios [34].
- Gestión del sistema: conocer cómo el sistema es coordinado entre sus distintas partes es importante en la tarea de análisis. Además, se deben analizar los procedimientos y planes existentes en procura de los objetivos estratégicos [7].

II. Conjunto de objetivos: se revisan las bases del proyecto, para conocer los objetivos planteados originalmente para el sistema. Los retos por enfrentar se materializan en los objetivos. El enfoque de los objetivos es multifacético, ya que debe identificar los objetivos desde varias perspectivas, por ejemplo: incorporar necesidades y requerimientos de los usuarios, el ambiente, las partes interesadas externas, y otros.

III. Guía de selección de indicadores: como dato de entrada se tienen sistemas de indicadores existentes propuestos por organizaciones y artículos técnicos. El siguiente paso consiste en la pre selección de indicadores, basados en metodologías existentes. Se realiza una pre selección de indicadores según Figura 7.

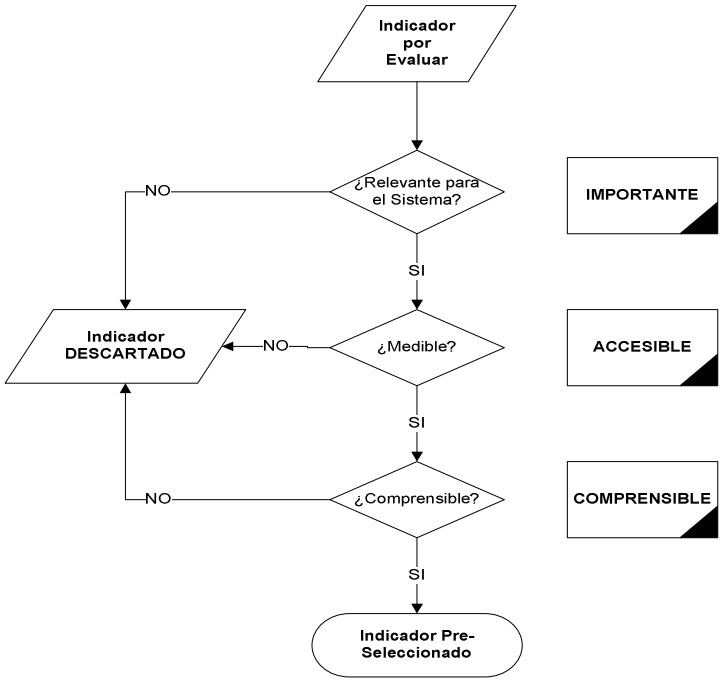


Figura 7: Método de pre selección de indicadores

Fuente: Propia

Se toman en cuenta tres aspectos fundamentales, que el indicador sea importante para el sistema, que sea accesible y comprensible. En general, se seleccionan indicadores que reflejen la resiliencia del sistema, según la definición la Sección 4.3, es decir que relacionados con la capacidad de la microrred por evitar, soportar y recuperarse a perturbaciones. Cualquier indicador que no califique dentro del enfoque de la definición no se incluye en el monitoreo del sistema. Aunque no se descarta el uso de algunos indicadores no clasificados como indicador de resiliencia, que sirvan en el análisis de sistema, para explicar los comportamientos encontrados.

Aquellos indicadores que pasen esta primera selección se someten a la *prueba de resiliencia* que se explicará en la Sección 5.3.1.Estos serán los indicadores de resiliencia para el análisis del sistema y el cálculo de los índices.

En este trabajo de tesis se revisaron tres metodologías de indicadores, y distintos artículos técnicos que, en conjunto, entregaron un listado de indicadores para evaluar su aplicabilidad a sistemas socio-técnicos basados en microrredes [36], [11], [37], [38]. Los métodos estudiados organizan los indicadores según criterios

específicos, y se diferencian entre ellos en la forma de definir los problemas, en cómo agrupan los temas, y cómo diferentes conceptos son justificados. Los distintos métodos revisados se explicaron en la Sección 1.2. Con esta información y la aplicación de la prueba de la Figura 7, se seleccionaron un grupo de indicadores para el monitoreo de sistemas basados en microrredes, que aparecen en el Anexo A.

IV. Índices evitar, soportar y recuperar, e índice de resiliencia: con los indicadores seleccionados en el paso anterior, se procede a calcular los índices evitar, soportar, recuperar y de resiliencia, según las Secciones 5.3.2 y 5.3.3.

V. Implementación y pruebas: como entrada a esta etapa se tiene la base de datos del sistema en estudio, y el análisis de esta información. Para el sistema particular se procede con el cálculo de indicadores y el análisis de datos. Se trata de encontrar explicación a los distintos comportamientos de los índices calculados en la etapa anterior, que apoyen el proceso de toma de decisiones. Para el análisis de los datos se pueden utilizar distintas técnicas, sean éstas cualitativas o cuantitativas.

VI. Grupo de indicadores para microrredes: por medio de la etapa anterior es posible encontrar correlaciones que reducen la cantidad original de indicadores, o bien la necesidad por de nuevos indicadores. Con la lista definitiva se establece el conjunto de indicadores de resiliencia para el monitoreo de la microrred en adelante. Se sugiere la revisión de tendencias y comportamientos, lo que ayudará a la comprensión del sistema, como primer paso para la promoción de resiliencia.

4.3 Propuesta de medición de resiliencia

Como objeto de estudio se tiene el sistema socio-técnico basado en microrredes, y el objetivo global de la metodología es cuantificarla sustentabilidad del sistema, por medio de la resiliencia, como uno de sus atributos. Para esto es necesario, como primer paso, proponer un conjunto de métricas para el monitoreo y seguimiento de la microrred, de manera que se conozca el estado y evolución de su resiliencia en el tiempo. El enfoque analiza la resiliencia del sistema en sus tres facetas, y se basa en mediciones directas desde el sistema de las distintas variables que permitirán cuantificarla, según Secciones 5.3.1, 5.3.2 y 5.3.3. Las facetas son propiedades emergentes, al igual que la resiliencia, la cual no puede ser medida

directamente. Los indicadores son organizados en cinco grupos, estos son: administración ambiental, avance tecnológico, desarrollo de la gestión, desarrollo social y desarrollo económico. La Figura 8 presenta el esquema de la propuesta.

Figura 8: Modelo de la propuesta metodológica

Fuente: Propia

La agrupación de los indicadores se realizó según las siguientes cinco dimensiones: administración ambiental, avance tecnológico, desarrollo de la gestión, desarrollo social y desarrollo económico, tiene como objetivos promover una mejor comprensión de los procesos involucrados, así como facilitar la interpretación de aspectos que buscan un sistema sustentable. Para direccionar este objetivo, se tomó como base la categorización que hace el NIST de EE.UU. en su metodología denominada: Archivo de Indicadores para Manufactura Sustentable (en inglés Sustainable Manufacturing Indicators Repository)[7]. Se adecúa a las particularidades del sistema en estudio de esta tesis, estableciendo las cinco dimensiones para categorizar los indicadores, definiendo un conjunto de indicadores para cada dimensión que cuantifiquen la resiliencia del sistema. La Figura 9 presenta la propuesta completa de selección de indicadores.

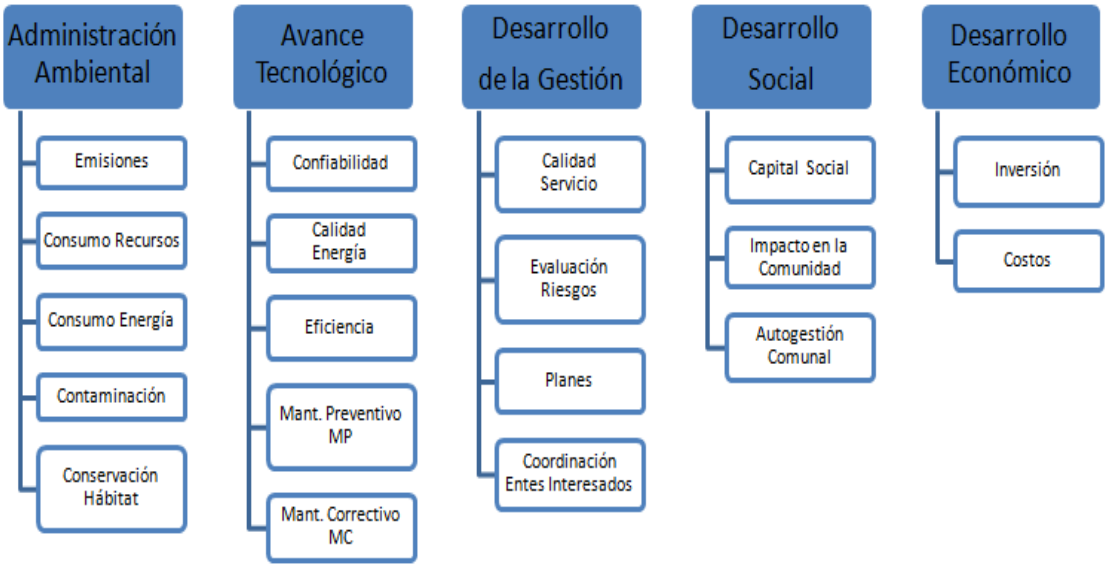


Figura 9: Propuesta de agrupación de indicadores de resiliencia

Fuente: Propia

La interpretación que hace el NIST en su metodología tiene como objetivo proporcionar un acceso centralizado a indicadores de sustentabilidad para ayudar a las empresas a medir su desempeño sustentable, en esta tesis se hace una extensión a la definición de resiliencia en microrredes. El estudio del NIST se basó en el análisis de 14 propuestas metodológicas disponibles públicamente, entre las que se incluyen las 3 revisadas en esta tesis. El NIST realizó una clasificación de los indicadores por su temática y aplicación, y se adapta al uso en microrredes, que es la propuesta de esta tesis. Finalmente, los indicadores propuestos se agrupan de la siguiente manera:

I. Administración ambiental: enfatiza en el manejo de la componente ambiental, que busca mejorar el bienestar humano y natural, mediante la protección de las fuentes de recursos naturales, utilizadas para satisfacer las necesidades humanas. Además, busca asegurar que los impactos en el ambiente no superen niveles establecidos en la normativa, con el fin de prevenir daños severos. El mantenimiento de la integridad del ambiente se hace a través de [25]:
    - La eficiente gestión de los recursos naturales.

- Desvincular las presiones ambientales del crecimiento económico.
- Mejora de la información para la toma de decisiones, ya que se mide del progreso a través de indicadores.
- El aporte de la protección ambiental a la mejora de la calidad de vida.
- El conocimiento de la interdependencia ambiental global, que mejora la gobernanza y la cooperación.

Para estos efectos se definen cinco indicadores, siguiendo la recomendación del NIST y la teoría de resiliencia, estos son [7]:

- Emisiones: establece la promoción por iniciativas de reducción de emisiones, con una mirada pro activa.
- Consumo de recursos: considera el consumo de materiales en general para el proceso de producción eléctrica. Así como otro tipo de recursos utilizados en el proceso de producción, como suelo, agua, y otros.
- Consumo energía: incluye la cuantificación del aporte de fuentes de energía renovable a la producción eléctrica, así como la reserva de combustibles.
- Contaminación: establece la contaminación provocada por la operación del sistema, en sus distintas formas: descarga en afluentes, ruido, visual, desechos, otras. Además, cuantifica los procesos de reciclaje y reutilización.
- Conservación del hábitat: se relaciona con la biodiversidad, la gestión del hábitat y la conservación. En estos indicadores se debe reflejar los efectos sobre la flora y fauna, junto con el hábitat en el que viven.

II. Avance tecnológico: se enfoca en los aspectos que promuevan el avance en el campo tecnológico, con miras a la mejora de desempeño del sistema técnico. Se proponen los siguientes indicadores:

- Confiabilidad: referido a un equipo o sistema. Está relacionado con su capacidad de mantenerse operando en un período de tiempo.
- Calidad energía: relacionado con la calidad de la tensión y la frecuencia de la microrred, que es reflejo de los esquemas de control del sistema.
- Eficiencia: en términos energéticos, referido al aprovechamiento de recursos disponibles para la generación de electricidad y calor.

- Mantenimiento preventivo: son todas las acciones y tareas desarrolladas tendientes a evitar fallas en los sistemas, y que promuevan un mejor servicio.
- Mantenimiento correctivo: cuando la falla se presente entran en consideración la acciones correctivas, las cuales deben ser monitoreadas para determinar su eficacia.

III. Desarrollo social: el enfoque es extender el análisis para identificar los valores sociales, identidades y relaciones sociales en su aporte a la resiliencia. Además, se propone este indicador para medir el impacto social del sistema, ya que se asume que la comunidad será impactada, directa o indirectamente, y las consideraciones de estos análisis es de gran importancia para la resiliencia del sistema. Finalmente, es importante considerar la participación comunal en el sistema, por lo que se incluye la medición de este factor en la propuesta. Se establecen los siguientes indicadores:

- Capital social: establece el seguimiento al desarrollo de capital social que es clave para el sistema, que comprende temas como: relaciones sociales, redes y reciprocidad, compartir normas y valores, confianza, participación colectiva, acceso a recursos.
- Impacto en la comunidad: la medición de los impactos en la comunidad debe incluir los efectos en torno al sistema. Tomar en consideración aspectos como migración, compras a proveedores locales, generación de recursos, y otros.
- Autogestión comunal: la promoción de la autogestión por parte de la comunidad es clave para la resiliencia, por tal motivo requiere de indicadores que establezcan el progreso de esta variable. Incluir aspectos como el aporte comunal al desarrollo del sistema, y las tareas realizadas por parte de la comunidad.

IV. Desarrollo económico: se enfatiza en el manejo de los recursos económicos, buscando un uso eficiente, y que cuantifiquen su aporte al desarrollo del sistema. Se propone cuantificar la salud económica del sistema. El estudio de esta dimensión se separa en dos indicadores:

- Inversión: son usados para dar seguimiento a la inversión en el sistema, así como su impacto. Las inversiones deben buscar el crecimiento del sistema.
- Costos: este indicador mide la distribución de costos en distintos niveles del sistema. Este indicador toma en cuenta contabilidad financiera básica, así como otros enfoques, que busquen seguir la evolución de los costos en el sistema.

V. Desarrollo de la gestión: la estructura de medición se completa con esta dimensión que incluye aspectos de gestión del sistema, con otros como planes, coordinación, medición de satisfacción, entre otros. Los indicadores propuestos son los siguientes:

- Calidad servicio: los indicadores de calidad de servicio evalúan la habilidad del sistema para alcanzar o exceder las expectativas de los usuarios. Son necesarios para mantener el desempeño del sistema en un nivel adecuado, según objetivos y normas técnicas.
- Evaluación riesgos: en una mirada pro activa, el indicador de manejo de riesgo impulsa la evaluación de situaciones potencialmente dañinas para el desempeño del sistema. Lo que redundara en medidas de mitigación y reducción de riesgos.
- Planes: con este indicador se pretende monitorear la acción del sistema en su búsqueda de alcanzar objetivos y metas, al plasmarlos en planes concretos.
- Coordinación partes interesadas: la coordinación entre partes interesadas resulta un indicador clave que permita el seguimiento, así como las mejoras posibles, en beneficio del desempeño. Esto se logra por medio de estudios de percepción entre las distintas partes interesadas, que permita su seguimiento.

Los indicadores propuestos en esta tesis se resumen en el Anexo A, según lo propuesto en la Sección 4.2, que establece los criterios para la selección de indicadores. Sobre la frecuencia de medición de cada indicador, esta será definida para cada caso particular, los más comunes son: mensual, bimensual, trimestral, y semestral. La frecuencia dependerá del acceso a la información, por la dificultad que presente el obtenerla, ya que los datos pueden estar almacenados en sistemas de monitoreo automáticos, lo que permitiría un seguimiento mensual. Por otro lado, cuando sea necesario la instalación de equipos para la medición de variables que sirvan de base para el cálculo de indicadores, la frecuencia puede cambiar a

bimensual o trimestral. Finalmente, en caso de indicadores calculados sobre la base de encuestas, la frecuencia puede ser semestral.

Luego de la etapa de selección y clasificación de indicadores se sigue con el análisis según la prueba de resiliencia, para conocer el aporte de cada uno a las distintas facetas que definirán los índices evitar, soportar, recuperar, y en conjunto el índice de resiliencia.

4.3.1 Prueba de resiliencia

Los indicadores seleccionados deben ser evaluados con la herramienta desarrollada en esta tesis, denominada *prueba de resiliencia*. Es una herramienta dirigida al análisis del indicador, basada en teoría de resiliencia.

Las siguientes son las consideraciones que debe tomar en cuenta el evaluador en el momento de aplicar de la prueba:

- Cada pregunta pondera el factor consultado por medio de preguntas.
- El evaluador responde asignando un "1" si considera que la respuesta es positiva, y un "0" si es negativa.
- En caso que considere que la pregunta *No Aplica* al indicador en evaluación, se debe dejar la respuesta en blanco, y se toma en cuenta un punto menos en el total para su ponderación.
- Al final, se establece una clasificación del indicador por medio de la ponderación de cada faceta, al cuantificar los puntos alcanzados en cada una, dividiendo por el total de puntos.

La prueba se organiza siguiendo enfoque de las tres facetas de resiliencia, definidas en la Sección 3.3.3. A su vez, cada faceta se divide en dos propiedades, según las Secciones 3.6.1, 3.6.2 y 3.6.3. Esto es:

- Faceta evitar: es promovida por la diversidad y anticipación.
- Faceta soportar: es promovida por la eficiencia y cohesión.
- Faceta recuperar: es promovida por la adaptación y el aprendizaje.

La Tabla 1 presenta un esquema de la prueba de resiliencia.

Faceta	Propiedad	Puntaje Obtenido: 1=Si, 0=No, " "=N/A
EVITAR	Diversidad	
	Anticipación	
SOPORTAR	Eficiencia	
	Cohesión	
RECUPERAR	Adaptación	
	Aprendizaje	
	Puntaje Total	*Puntos*
	Ponderación Evitar	*%*
	Ponderación Soportar	*%*
	Ponderación Recuperar	*%*

Tabla 1: Esquema de la Prueba de Resiliencia para indicadores

Fuente: Propia

Para cada una de las siguientes propiedades: diversidad-anticipación, eficiencia-cohesión, y adaptación-aprendizaje, se desarrollaron cuatro preguntas que evalúan el aporte del indicador a éstas, por medio de la puntuación asignada. La aplicación de esta prueba debe ser realizada por personas que conozcan el funcionamiento y operación del sistema, ya que se trata de un estudio que pretende establecer el aporte de cada indicador a las facetas, que definen en conjunto el índice de resiliencia. Caso contrario se llegará a resultados erróneos. Por este motivo, es posible aplicar la prueba por medio de una técnica de *Juzgamiento Experto*, como las presentadas en la Tabla B.1, Anexo B, donde se reúne un grupo de personas involucradas a la microrred, y se recoge el aporte de cada una.

La Tabla 2 presenta la prueba de resiliencia para indicadores completa, que incluye las preguntas de cada propiedad.

Faceta	Propiedad	Puntación: 1=Si, 0=No, " "=N/A
EVITAR	***DIVERSIDAD***	***4***
	¿El indicador refleja la diversidad existente en la microrred?	***1***
	¿Muestra variable(s) de interés clave(s) para el sistema?	***1***
	¿Es una medida de la existencia de múltiples partes y comportamientos dentro del sistema?	***1***
	¿El indicador identifica y se relaciona con al menos una parte del sistema?	***1***
	ANTICIPACIÓN	***4***
	¿El indicador tiene la capacidad de reflejar una mirada proactiva, más que reactiva?	***1***
	¿El indicador muestra el efecto de planes de contingencia ante perturbaciones?	***1***
	¿El indicador proporciona signos de alerta temprana de cambios de estado?	***1***
	¿Identifica los atributos del sistema que determina posiciones límites?	***1***
SOPORTAR	***EFICIENCIA***	***4***
	¿El indicador refleja el desempeño del sistema en el uso de recursos existentes?	***1***
	¿El indicador ayuda a entender el comportamiento de las personas frente al uso de recursos?	***1***
	¿Identifican el control y regulación en el uso de los recursos?	***1***
	¿Muestra el aporte de una o más partes del sistema a la eficiencia en el uso de recursos?	***1***
	COHESIÓN	***4***
	¿El indicador muestra la cohesión existente dentro del sistema?	***1***
	¿Ayuda a identificar conflictos y cómo evolucionan en el tiempo?	***1***
	¿Se relaciona con las fuerzas o enlaces de unificación de las diferentes partes del sistema?	***1***
	¿Permite evaluar la interacción entre distintas partes del sistema?	***1***
RECUPERAR	***ADAPTACIÓN***	***4***
	¿El indicador es una medida de la capacidad adaptiva del sistema a lo largo del tiempo?	***1***
	¿Identifica cambios de capital (Social, Humano, Financiero)?	***1***
	¿Identifican cómo se modifican flujos de bienes y servicios luego de perturbaciones? Trayectorias	***1***
	¿Muestra la flexibilidad de reacción que tiene el sistema frente a perturbaciones?	***1***
	APRENDIZAJE	***4***
	¿Identifica la eficacia de las partes interesadas en el aprendizaje sobre el uso/manejo de recursos?	***1***
	¿Identifica la evolución de la transición que se presenta frente a la introducción de tecnología?	***1***
	¿Identifica algún conductor clave del sistema que promuevan la calidad de bienes y servicios entregados?	***1***
	¿El indicador es sensible a las variables que dirigen y controlan el sistema?	***1***
	PUNTUACIÓN TOTAL OBTENIDA	***24***
	EVITAR	**%**
	SOPORTAR	**%**
	RECUPERAR	**%**

Tabla 2: Prueba de Resiliencia para indicadores

Fuente: Propia

4.3.2 Índices evitar, soportar y recuperar

La propuesta metodológica incluye el cálculo de Índices para cada faceta de resiliencia, con el objetivo de facilitar la comprensión e interpretación de los fenómenos presentados en el sistema. Mientras un indicador comprende una métrica (variable), o una salida de un conjunto de datos (variables), un índice es una agregación o síntesis de indicadores, llamado también indicador compuesto [39]. En este caso se propone una agregación de tipo temática, para calcular un índice evitar, soportar y recuperar.

Para el cálculo de cada índice se propone un método basado en pesos, según la Figura 10, donde: $M_1,...,M_i$ es el indicador normalizado *i*, con i=1,...,n que es la cantidad de indicadores calculados en la microrred; $\omega_1,...,\omega_i$ es la ponderación asignada a cada indicador en la prueba de resiliencia de la Sección 5.3.1; y CM es el índice calculado.

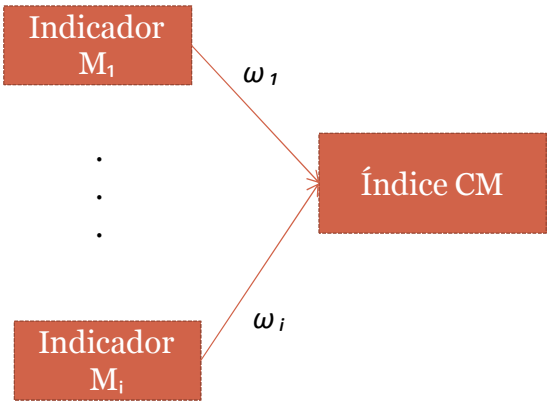


Figura 10: Método de cálculo de índices

Fuente: Propia

La expresión para el cálculo del índice CM es la siguiente:

$$CM = \sum_{i=1}^{n} M_i \omega_i \tag{1.2}$$

El peso ω_i refleja el aporte de cada indicador al índice particular. En este caso se aplica un método subjetivo, sustentado en una base teórica que busca incrementar la calidad de la evaluación. Al ser un método subjetivo busca reflejar un sentido práctico en el análisis.

Antes de multiplicar cada indicador por su respectiva ponderación, se debe llevar un proceso de normalización, para hacerlos comparables entre sí. Existen diversos métodos de normalización, en este caso se sugiere usar los indicadores en valores por unidad, y no en sus unidades convencionales o porcentajes. Los indicadores que tengan un efecto positivo, y favorecen a la resiliencia se tomarán con signo *positivo*. Los indicadores que tengan un efecto negativo, y afecten la resiliencia disminuyéndola, se tomarán con signo *negativo*.

4.3.3 Índice de resiliencia

Con el objetivo de cuantificar la resiliencia, se define y calcula un índice de resiliencia para la microrred, que reúna el aporte de las tres facetas calculadas anteriormente por medio de los índices evitar, soportar y recuperar. Por ser un método basado en la respuesta del sistema a incidentes perturbadores, el análisis en el tiempo es fundamental. Es por esto que se sugiere el seguimiento en un horizonte de tiempo, para tomar en cuenta su evolución, además de evaluar el valor puntual en una fecha específica. El seguimiento en el tiempo de la evolución del índice de resiliencia propone un enfoque pro activo, acorde con la teoría de resiliencia, para alinear el análisis hacia los objetivos y metas del sistema.

Se define $\delta(t)$ como el índice de resiliencia del sistema, donde $\gamma_j$es la ponderación del índice evitar, soportar, o recuperar, es decir $0 < \gamma_j < 1$. Y CM_j es el valor del índice. De esta forma el índice de resiliencia es:

$$\delta(t) = \sum_{j=1}^{3} \gamma_j CM_j \tag{1.3}$$

Y se cumple que:

$$\sum_{j=1}^{3} \gamma_j = 1 \tag{1.4}$$

Se define como primera aproximación que$w_i = \frac{1}{3}$, es decir la misma ponderación para cada índice. Esto se justifica por ser el punto de partida de la metodología propuesta, ya que la base de la aplicación del método es la información y experiencia alcanzada. El objetivo es que esta metodología pueda ser replicada en distintas microrredes, por lo que el ajuste final de la

ponderación de cada índice deberá ser definido según cada caso particular, lo que puede ser realizado con técnicas de asignación de pesos.

4.4 Resumen

En este capítulo se presenta la metodología de monitoreo de microrredes basada en indicadores de resiliencia. Se explica la forma de analizar el sistema socio-técnico, según la resiliencia, como atributo y promotor clave de sustentabilidad. Además, se presenta la agrupación de indicadores según áreas temáticas, a saber: desarrollo social, avance tecnológico, desarrollo de la gestión, administración ambiental y desarrollo económico. Se presenta la herramienta denominada prueba de resiliencia para el análisis de los indicadores seleccionados, y su aporte a las tres facetas: evitar, soportar y recuperar. Finalmente, se realiza la propuesta de cálculo de los índices evitar, soportar, recuperar y de resiliencia.

Capítulo 5 Caso de Estudio: Sistema ESUSCON

5.1 Introducción

Este capítulo presenta la aplicación de la metodología de monitoreo al caso del Sistema ESUSCON, en Huatacondo, Comuna de Pozo Almonte, Norte de Chile, que es una microrred desarrollada por el Centro de Energía, de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile. En la Sección 5.2 se describe el caso de estudio. Las Secciones 5.3 y 5.4 presentan el análisis del sistema según metodología propuesta. Las Secciones 5.5 y 5.6 presentan la seleccionan y cálculo de los indicadores, según información disponible. En la Sección 5.7 se muestra el cálculo de los índices de resiliencia. En la Sección 5.8 se realiza el análisis de resultados. La Sección 5.9 presenta el estudio alrededor de un evento perturbador suscitado en mayo 2013. Finalmente, en la Sección 5.10 se exponen las conclusiones del caso de estudio.

5.2 Descripción caso de estudio

La metodología se aplica al sistema ESUSCON, que es una microrred de escala real, construida en la comunidad de Huatacondo. En el Anexo C se muestran las características, así como datos relevantes y las consideraciones más importantes del sistema ESUSCON.

Para este caso de estudio, se analiza el comportamiento del sistema por medio de indicadores en el período correspondiente a enero 2011 a setiembre 2013. Este análisis da paso al cálculo de los índices evitar, soportar, recuperar y de resiliencia. Esto significa que es una mirada retrospectiva del sistema, al reconstruirse los indicadores planteados con la información disponible en la base de datos, y hacer un ejercicio de análisis de su comportamiento.

Además, se realiza un análisis separado del periodo abril 2013-setiembre 2013, por la ocurrencia de eventos perturbadores que motivan la observación del comportamiento del sistema frente a estos hechos. Las perturbaciones presentadas fueron las siguientes:

- 17 de mayo 2013: Se presentó una falla en una sección de la planta fotovoltaica que cayó al suelo, dejando la planta fuera de operación por una días, la cual vuelve a entregar potencia pero con 5/6 de su capacidad total. Esto se considera una perturbación técnica.
- 14-20 agosto 2013: Se celebra la fiesta de la Asunción de María que congrega cerca de 400 personas, cuando el promedio diario de población es de 70-75 personas. Esto se considera una perturbación social.

Ambos eventos fueron acompañados por dos situaciones extraordinarias que introducen elementos adicionales, como fueron:

- Trabajo de reacondicionamiento del grupo generador Diesel, por alcanzar las horas de uso (labores de mantenimiento sugeridas por el fabricante). Este trabajo se concluyó una semana antes de las fiesta de la Asunción de María.
- Cambio del banco de baterías, por término de su vida útil. Este trabajo se realizó un día antes de iniciar la fiesta de la Asunción.

5.3 Análisis del sistema ESUSCON

Según la metodología propuesta en la Sección 5.2, se pasa a analizar el sistema ESUSCON. Este análisis se basó en la revisión de documentos facilitados por el Centro de Energía [40], [41], [42]. Además, se realizaron 3 visitas a Huatacondo entre 2012-2013, para conocer y estudiar la microrred, así como su funcionamiento. Según lo anterior, se llega al siguiente análisis del sistema:

- Definir fronteras: como primer paso se establecen las fronteras de la microrred, y se separan los factores en endógenos, exógenos y aquellos que quedan excluidos [34]. La Tabla 3 los aspectos endógenos y exógenos que son parte del sistema, lo que permite establecer la frontera del análisis. Esto significa que los aspectos de la columna Excluido no son tomados en cuenta en el análisis del sistema.

Endógenos	Exógenos	Excluido
Sustentabilidad. Producción Electricidad. Demanda Electricidad. Adquisición Diesel. Ahorro Eléctrico. Emisiones. Participación Comunal. Mantención. Tasa Crecimiento Demanda. Inversión. Costos. Variabilidad Recursos Energéticos. Almacenamiento Eléctrico. Coordinación Partes Interesadas. Conflictos Sociales. Tratamiento Residuos. Precio del servicio eléctrico. Reglas de uso. Servicio Agua.	Transporte. Vías de Comunicación. Telecomunicaciones. Migración. Cambios Tecnológicos. Cambio Climático. Actividad Minera. Educación. Cambios Políticos. Cambios en Programas de Apoyo de los Patrocinadores.	Desastres Naturales. Restricciones Ambientales. Sustitución Combustibles. Salud. Seguridad. Producción Agrícola.

Tabla 3: Establecimiento de fronteras y alcance sistema ESUSCON

Fuente: Propia

- Variables de interés: las variables a considerar como parte del análisis son: sustentabilidad, producción de electricidad, crecimiento de la demanda electricidad, participación comunal y autogestión, mantenimiento, inversión, coordinación con las Partes Interesadas, y conflictos sociales que afecten al sistema.
- Situaciones críticas: las variables de interés claves para este análisis son las siguientes: participación comunal y autogestión, inversión y la producción de electricidad. El análisis del sistema debe dar especial énfasis a estos aspectos.
- Servicios que sustenta el sistema: el sistema ESUSCON brinda los servicios de: electricidad residencial, alumbrado público, y electricidad a establecimientos públicos (sede social, escuela, consultorio médico, iglesia, plaza, cancha fútbol).

- Perturbaciones: de la revisión de la documentación, así como la revisión del sistema en las visitas realizadas, las perturbaciones posibles son las siguientes, presentadas según su dimensión:
    1. De tipo técnicas:
        - Falla en las unidades de generación.
        - Falla en las unidades de interface electrónica.
        - Falla en el sistema de control.
        - Falla en la red de comunicación.
        - Falla en el sistema BESS.
        - Falla en el sistema de distribución.
        - Fallas en el sitio de la instalación del consumidor.
        - Por un incremento puntual desmedido de la demanda.
    2. De tipo social:
        - Por conflictos internos en la comunidad, como fragmentación de las organizaciones comunales.
    3. De tipo económica:
        - Pérdida de apoyo financiero temporal del patrocinador.
        - Incremento temporal considerable de precios en el Diesel, que encarezca significativamente la generación eléctrica con este combustible.
    4. De tipo ambiental:
        - Derrames de combustibles/aceites.
        - Accidente en la zona de combustibles.
    5. En la gestión:
        - Falla en la cadena de suministros e insumos.
        - Incapacidad local (comunal)en operar el sistema.
        - Conflicto con uno o más usuarios.
        - Conflicto entre partes interesadas.
- Partes interesadas: están incluidas las organizaciones comunales, coordinadas por la Junta Vecinal, que tiene la mayor importancia en la comunidad por sus

labores de representación. En especial el Comité de Luz, integrado por 3 personas, incluyen el operador del sistema. El sistema cuenta con el apoyo de las compañías mineras de la zona, quienes contribuyen mensualmente en su operación y mantenimiento por medio de recursos financieros y combustible Diesel. La Municipalidad de Pozo Almonte que suministra recursos financieros para remuneración del operador del sistema. Y el Centro de Energía de la Universidad de Chile como desarrollador del sistema.

- Usuarios: hay tres tipo de usuarios, esto son: residencial, pequeños emprendimientos y agricultura, y servicios públicos. El de mayor importancia es el residencial, ya que en la comunidad no hay emprendimientos importantes.
- Gestión del sistema: el Comité de Luz es el encargado de las labores de operación y mantenimiento, no así de la planificación. Participa activamente en la gestión del sistema la Junta Vecinal.

5.4 Objetivos del sistemaESUSCON

El objetivo del proyecto ESUSCON es el siguiente [1]:

"Realizar un sistema de energización sustentable y participativo que permita entregar electricidad las veinticuatro horas del día para la comunidad de Huatacondo."

No fue posible encontrar objetivos específicos dentro de los documentos referentes al proyecto.

5.5 Calculo de indicadores

Se sigue con la etapa de selección de indicadores para el monitoreo de resiliencia en el sistema ESUSCON, tomando como base los propuestos en el Anexo A, que muestra los indicadores sugeridos para monitoreo de microrredes, así como las Secciones 5.3 y 5.4, que hace un análisis particular del sistema en estudio. Por ser una mirada retrospectiva, no fue posible definir indicadores específicos, más bien se calcularon aquellos posibles con las fuentes de información disponibles. Las fuentes de información revisadas fueron las siguientes:

- El servidor ESUSCON, ubicado en Huatacondo, donde se almacenan los datos de operación de la microrred, por medio del sistema SCADA. Se aclara que el año 2011 no tiene datos almacenados, situación que no fue posible aclarar la razón de esta falla. Para reconstruir el año 2011 se encontraron archivos de operación para días aislados, con diversas medidas técnicas, obtenidos de la Unidad de Microrredes. Con esta información y las tendencias de los años 2012 y 2013 se reconstruyó el año 2011.Para los años 2012 y 2013 si se tienen datos completos.
- Información suministrada por la Unidad de Microrredes del Centro de Energía, correspondiente a: informe de antecedentes y cierre del proyecto 2010, informes de avance de proyecto 2010, informes de operación del sistema en 2011. La revisión de estos informes tiene como objetivo encontrar mediciones periódicas de indicadores, en especial de las dimensiones social, ambiental y económica, pero no fue posible encontrar información aplicable al respecto, ya que son indicadores correspondientes a una fecha específica.

Los indicadores que se calcularon según la información disponible son los siguientes:

- <u>Desarrollo Ambiental:</u>
  - Emisiones de CO2 por generador Diesel totales (kg/mes).
  - Emisiones de CO2 por generador Diesel per cápita (kg/persona-mes).
  - Consumo estimado de Diesel (L/mes).
  - Consumo de energía mensual total (kWh/mes).
  - Producción con fuentes de energía renovables (%/mes).
- <u>Avance Tecnológico:</u>
  - Respuesta de tensión, como desviación estándar de 380V (%/mes).
  - Respuesta de frecuencia, como desviación estándar de 50Hz (%/mes).
  - Factor de Planta PV (%/mes).
- <u>Desarrollo de la Gestión:</u>
  - Aplicación de plan mantenimiento preventivo (Si-No).
  - Aplicación de plan mantenimiento correctivo (Si-No).

- Desarrollo Social:
  - Casas con electricidad (%/mes).
  - Aplicación de reglamentación (Si-No).
- Desarrollo Económico:

  No fue posible calcular indicadores económicos.

El Anexo F presenta el análisis de correlación para los indicadores seleccionados.

Según el listado de indicadores de resiliencia propuesto en el Anexo A, en la Tabla 3 se presentan los indicadores seleccionados para establecer los índices de resiliencia en el sistema ESUSCON.

Dimensión	Indicadores	
Administración Ambiental	Consumo Energía	Producción Fuentes ER (pu)
Avance Tecnológico	Calidad Energía	Desviación de Tensión (pu)
		Desviación de Frecuencia (pu)
	Eficiencia	Factor Planta PV (pu)
Social	Capital Social	Hogares con electricidad (pu)

Tabla 4: Indicadores para evaluación de resiliencia sistema ESUSCON

Fuente: Propia

Los demás indicadores calculados se utilizan para realizar el análisis del sistema, como son: consumo de energía, emisiones CO2 y consumo de Diesel. En el Anexo E se presentan estos indicadores.

Los indicadores utilizados en el cálculo de los índices de resiliencia se relacionan con los siguientes aspectos de la microrred, según teoría de los Anexos G y C, y del funcionamiento de la microrred [41], [42]:

1. Producción con fuentes energía renovable: este indicador se relaciona con los siguientes aspectos:

- El sistema de seguimiento solar (en inglés Tracking) de la planta fotovoltaica, para el mayor aprovechamiento de la radiación solar disponible.
- Capacidad y estado del banco de baterías, para el manejo de la variabilidad del recurso renovable.
- Consumo de energía de las cargas. El consumo excesivo implica el uso de la generación Diesel.
- Despacho de unidades de generación, que depende de la operación diaria del sistema.

2. Desviación de Tensión: este indicador se relaciona con los siguientes aspectos:
    - Controlador local de la unidad de generación o almacenamiento.
    - Despacho de unidades de generación, ya que el tipo de unidad en operación define la respuesta del sistema.
    - Topología de la red, ya que mientras más lejos de los controladores, dependiendo de los parámetros de la red, las variaciones pueden ser mayores
3. Desviación de frecuencia: este indicador se relaciona con los siguientes aspectos:
    - Controlador local y maestro.
    - Despacho de unidades de generación, ya que el tipo de unidad operando define la respuesta del sistema.
4. Factor de planta PV: este indicador se relaciona con los siguientes aspectos:
    - El sistema de seguimiento solar (en inglés Tracking) de la planta fotovoltaica, para el mayor aprovechamiento de la radiación solar disponible.
    - Capacidad y estado del banco de baterías, para el manejo de la variabilidad del recurso renovable.
5. Hogares con electricidad: este indicador se relaciona con los siguientes aspectos:
    - Manejo del sistema por parte de las autoridades locales.
    - Manejo de conflictos sociales internos.

Esto significa que con cada indicador se revisa distintos aspectos de la microrred, y en conjunto se recoge parte del comportamiento del sistema.

5.6 Cálculo de indicadores

A continuación se muestran los indicadores calculados, que luego dan paso a los índices de resiliencia. Se presenta el factor de planta PV en la Figura 11, la desviación de tensión y frecuencia en la Figura 12, y la producción fuentes ER en la Figura 13.

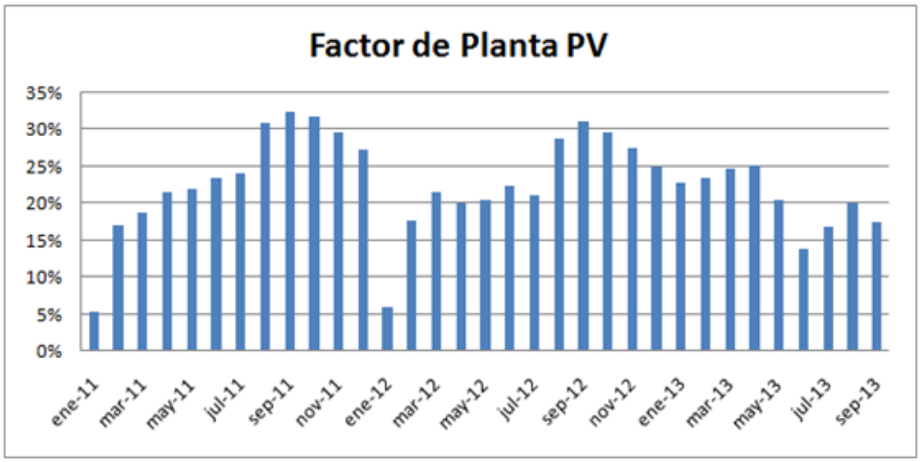


Figura 11: Factor de Planta PV

Fuente: Propia

En la Figura 11 se observa que el mayor factor de planta PV se logró en setiembre 2011, con un valor de 32.4%. El mínimo valor se alcanzó en enero 2011, con un nivel de 5.3%. Se puede observar un comportamiento similar a lo largo del año, donde los niveles mínimos se obtienen en los meses de marzo a julio, y los mayores en los meses de setiembre a diciembre. Además, los meses de enero son los de menor nivel del año, con excepción del año 2013, donde el menor nivel se alcanzó en junio.

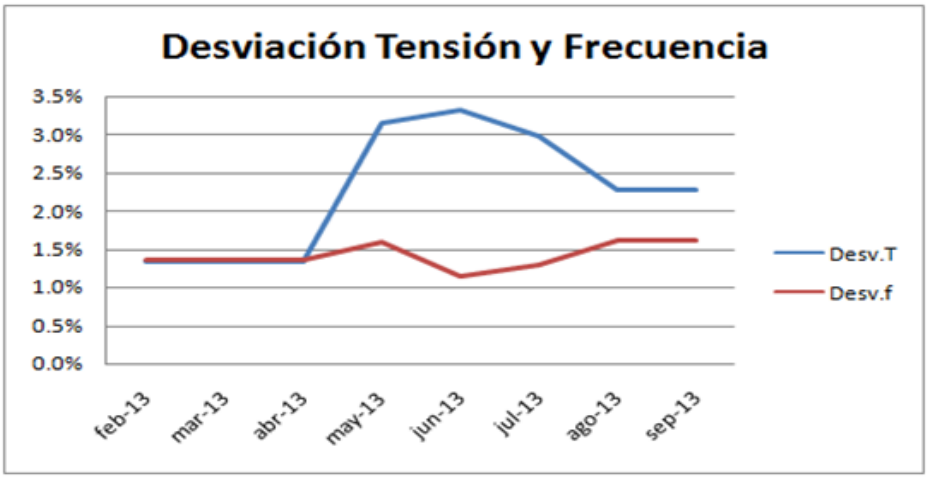


Figura 12: Desviación de Tensión y Frecuencia

Fuente: Propia

Para el cálculo de la desviación de tensión y frecuencia se contaba con datos de abril 2013 a septiembre 2013, por lo que se asume el valor de abril 2013 para el resto del periodo de análisis. En ambos casos se hace el cálculo de desviación estándar: para tensión la desviación estándar respecto a 380V, y en la frecuencia la desviación estándar respecto a 50Hz.

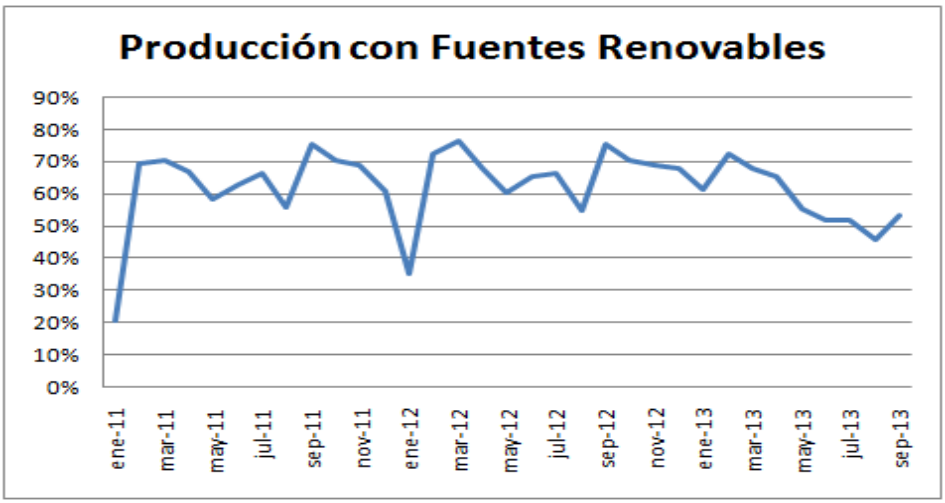


Figura 13: Producción eléctrica con fuentes de energía renovable

Fuente: Propia

La Figura 13 muestra el comportamiento de la generación con fuentes de energía renovable, que para el caso ESUSCON es basada enteramente en la planta fotovoltaica. En marzo 2012 se alcanzó el mayor nivel con 76.3%. Por otro lado, el menor nivel se presentó en enero 2011 con un valor de 20.6% de generación renovable. Originalmente, las bases del proyecto estimó un aporte con fuentes renovables del orden de 75% [42].

El último de los indicadores seleccionado es hogares con electricidad. No se muestra gráficamente ya que permanece en 1 la mayor parte del tiempo, es decir 100% de casas con electricidad. Este indicador sólo presenta una baja a 0.975 en agosto 2013, producto de la desconexión de una casa por un conflicto interno. El objetivo de mantener este indicador es observar su efecto en el análisis.

5.7 Cálculo de índices

Como paso previo para el cálculo de indicadores, es necesario realizar la prueba de resiliencia a cada indicador seleccionado para el análisis de resiliencia. El Anexo H presenta la prueba de resiliencia a los indicadores en estudio, y el resultado de la ponderación de las facetas. En la Tabla 5 se muestra un resumen del resultado de la prueba de resiliencia, con la ponderación alcanzada.

ANALISIS DE RESILIENCIA			Peso Faceta		
Dimensión	Indicadores	*Indicador Normalizado*	EVITAR	SOPORTAR	RECUPERAR
Administración Ambiental	Consumo Energía	Producción fuentes ER (pu)	0.421	0.263	0.316
Avance Tecnológico	Calidad Energía	Desviación de Tensión (pu)	0.231	0.385	0.385
		Desviación de Frecuencia (pu)	0.231	0.385	0.385
	Eficiencia	Factor Planta PV (pu)	0.353	0.294	0.353
Social	Capital Social	Hogares con electricidad (pu)	0.333	0.333	0.333

Tabla 5: Pesos para cada indicador normalizado

Fuente: Propia

De la Tabla 4 se puede revisar el aporte de cada indicador a la faceta de resiliencia.

Según procedimiento presentado en la Sección 5.3.2, se procede con el cálculo de los índices evitar (IE por sus siglas), soportar (IS por sus siglas) y recuperar (IR por sus siglas). La evolución en el tiempo se muestra a continuación para el año 2012 y 2013.

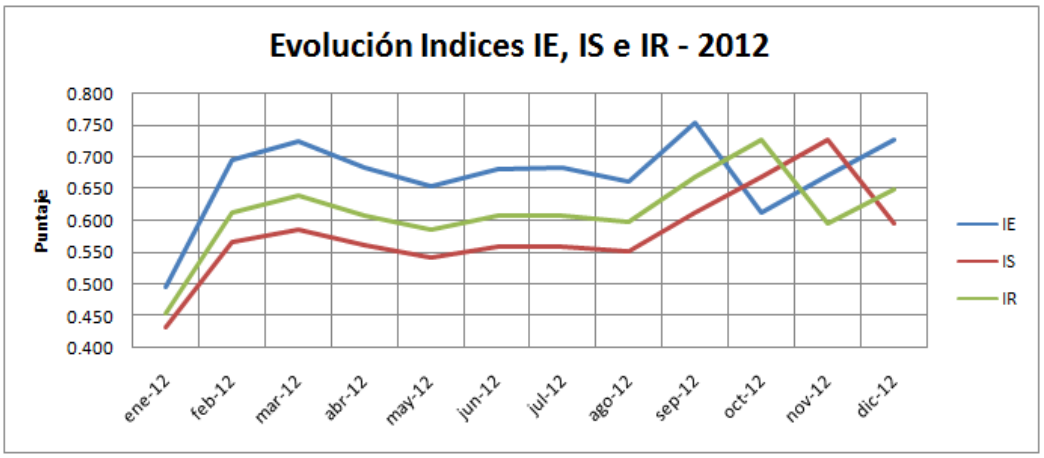


Figura 14: Índices Evitar, Soportar y Recuperar año 2012

Fuente: Propia

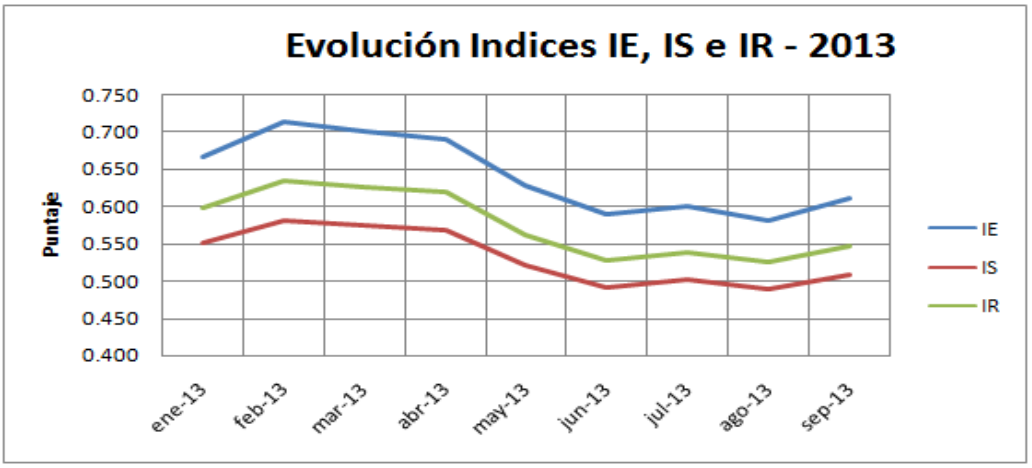


Figura 15: Índices Evitar, Soportar y Recuperar año 2013

Fuente: Propia

La Figura 14 muestra que el índice soportar (IS) está por debajo de los otros dos índices, la mayor parte del periodo de estudio. Solamente en noviembre 2012 logra remontar por encima de los índices evitar y recuperar.

Según el cálculo anterior, se procede a calcular el índice resiliencia. La evolución en el tiempo lo muestra la Figura 16.

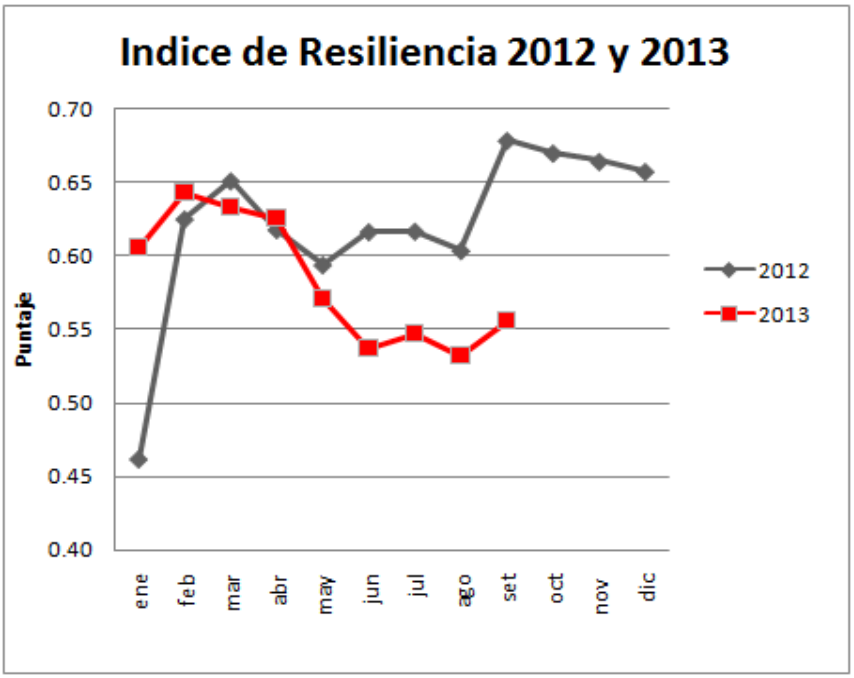


Figura 16: Evolución del Índice de Resiliencia 2012 y 2013

Fuente: Propia

La Figura 16 muestra que el índice de resiliencia presenta variaciones a lo largo del tiempo, mostrando valores altos y bajos. El mayor nivel alcanzado se presentó en setiembre 2012 con 0.678 puntos. El mínimo valor se alcanzó en enero 2011 con 0.461 puntos.

5.8 Análisis de resultados

En primera instancia, el comportamiento presentado por los indicadores e índices se explica por efecto de la variabilidad del recurso renovable, basado en energía solar fotovoltaica, lo que se evidencia por medio de las Figuras 17 y 18. En estas se muestran los índices resiliencia 2012 y 2013, junto a la Radiación Global Horizontal (RGH por sus siglas) de los mismos años, medida en la estación de Pozo Almonte, que es la más cercana a Huatacondo [43]. La RGH se conoce como radiación solar total, ya que es la suma de: la radiación directa normal, la radiación horizontal difusa, y la radiación reflejada de la tierra [44].

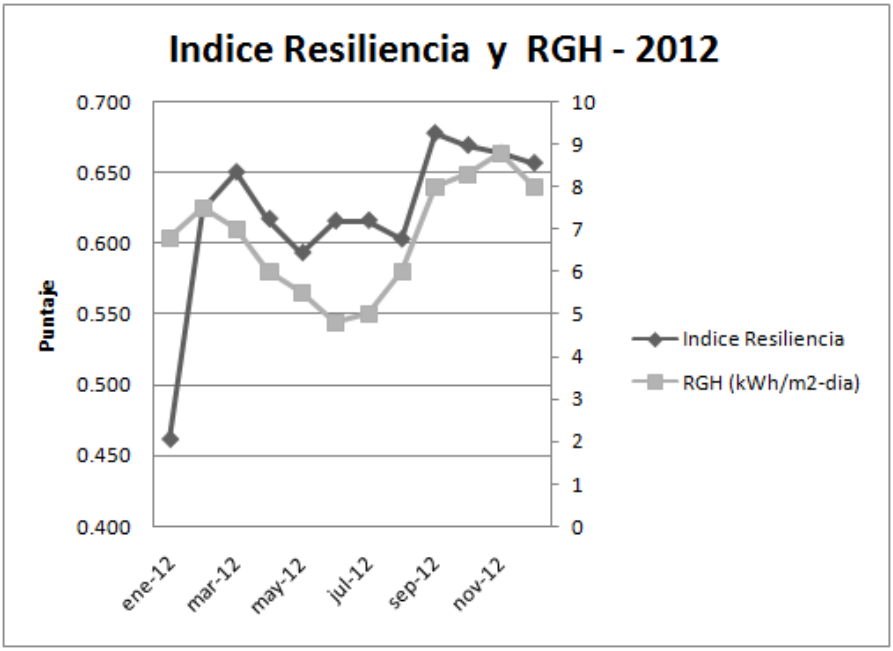


Figura 17: Índice Resiliencia y radiación global horizontal - 2012

Fuente: Propia y [43]

Se puede notar como el índice de resiliencia siguen la misma tendencia de la radiación global horizontal, mostrando sus valores más bajos en los meses de menor radiación, estos son: mayo, junio, julio y agosto. Por el contrario, el mayor se da en: setiembre, octubre y noviembre.

Particularmente, en este año se da una situación en los meses de mayo y junio, donde la tendencia entre el índice resiliencia con la RGH se alejan, producido por una recuperación del factor de planta PV, lo que incrementó también la producción con fuentes renovables. Con la información disponible, no fue posible justificar este comportamiento.

El valor del índice se mantiene por encima de 0.600 puntos, con excepción de enero 2012, donde el fenómeno del Invierno Boliviano fue muy severo, según información consultada [45]. El coeficiente de correlación es positivo, con un valor de 0.850 (Sin incluir Ene 2012 por su comportamiento fuera de lo normal).

En la Figura 18 se muestra el comportamiento del índice de resiliencia para el año 2013, de enero a setiembre.

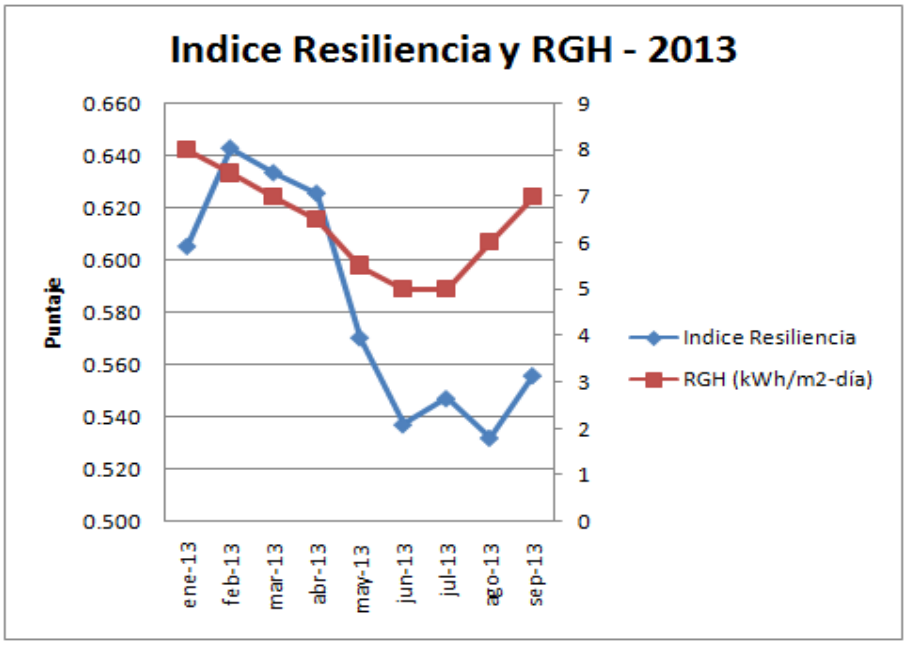


Figura 18: Índice Resiliencia y radiación global horizontal - 2013

Fuente: Propia

El comportamiento en el 2013 es distinto al mostrado en 2012, ya que en mayo 2013 se presenta una caída del índice, por debajo de 0.600 puntos, producida por la falla en la planta fotovoltaica (se analizará más adelante). En este caso la tendencia es similar, con un coeficiente de correlación positivo de 0.700.

El análisis de los índices evitar, soportar y recuperar, de las Figuras 14 y 15, indica que el obtiene menor puntaje es el índice soportar, en la mayor parte del periodo. El de mejor puntaje es el índice soportar, seguido del índice recuperar. Esto comportamiento puede ser usado para tomar la decisión de promover acciones con miras a aumentar el índice de menor puntaje, y reforzar los de mayor puntaje, para mejorarlos en conjunto.

Siguiendo con el análisis de comportamiento del sistema, en la Figura 19 se muestra la distribución de la generación de energía eléctrica. Donde la variabilidad es clara a lo largo del tiempo. Se hace notar que el aporte eólico es nulo porque no está en operación continuamente. Igualmente, en el Anexo E, la Figura E.1 muestra el comportamiento del consumo de energía.

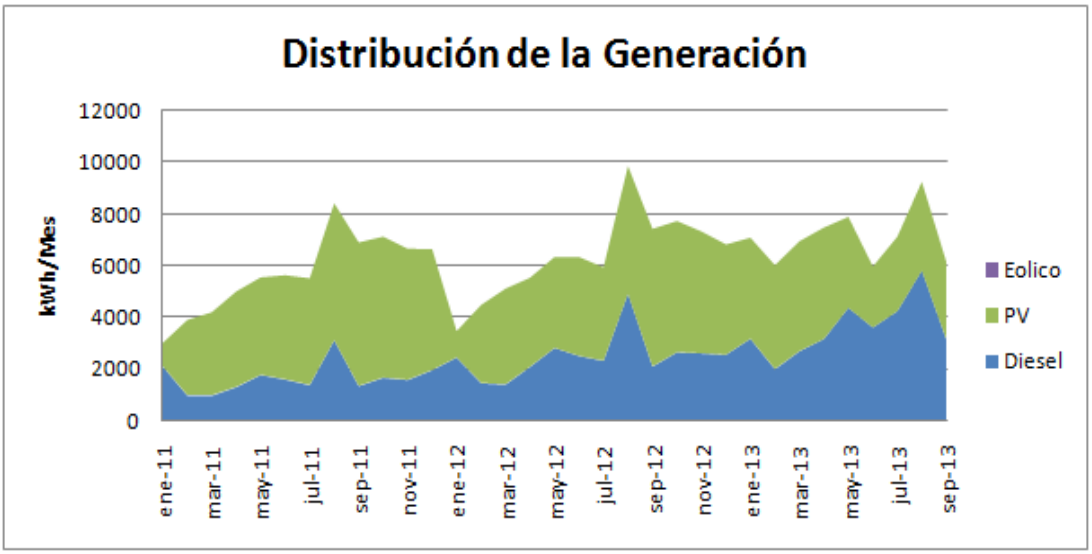


Figura 19: Comportamiento de la generación por fuente de energía 2011-2013

Fuente: Propia

Según la Figura 19, los valores punta de generación y consumo coinciden con la fiesta de la Asunción de María, de agosto. Por otro lado, los niveles de menor consumo corresponden al mes de enero, por la salida de algunos pobladores de Huatacondo, para evitar el Invierno Boliviano. Además, se observa que la base de la gráfica es creciente con el paso del tiempo, correspondiendo a la generación Diesel.

Finalmente, el comportamiento de los indicadores factor de planta PV de la Figura 11, y generación con fuentes renovables de la Figura 13, muestran una variación a lo largo de los meses, lo que refuerza la justificación de los cambios mostrados por los índices. Se destaca que los mejores valores de los todos los índices calculados se dan en los meses de mayor radiación solar.

5.9 Análisis de falla en planta PV

A continuación se hace un análisis de la falla presentada en la planta fotovoltaica, como una perturbación de origen técnico, con el objetivo de observar el comportamiento de la microrred alrededor de esta perturbación. La Tabla 6 presenta una descripción con el detalle de la falla.

Aspecto	Detalle
Descripción	Un panel de la planta PV cae, luego de que la estructura metálica se rompe. La planta PV está agrupada en seis paneles. Ver descripción del Anexo C.
Fecha	17 de Mayo 2013.
Hora	17-18hrs.
Causa	El sistema de seguimiento solar tiene dos actuadores lineales. En esta falla uno de los actuadores no se accionó, debido a un problema con el relé activador. El otro actuador si lo hizo, produciéndose una fuerte tensión sobre la estructura, que al final logró romperla. Se hace notar que no hay protecciones en el sistema de control de los actuadores, por lo no fue posible evitar el colapso del panel.
Consecuencias	La planta sale de operación de 1 a 2 días después de la falla. Luego queda en operación con 5/6 de su capacidad total, al quedar fuera un panel.
Recuperación	En la semana del 4 al 10 Agosto 2013 se repara el panel caído, aunque sin su sistema de seguimiento solar, y se restablece la operación completa.

Tabla 6: Descripción de la falla en Planta PV

Fuente: Propia

La Figura 20 presenta el comportamiento del indicador producción con fuente renovable alrededor de la falla PV, mostrando la caída de 65% en abril 2013 a 55% en mayo 2013, lo que representa un 15.4% de disminución. La Figura 20 muestra un límite alerta, el cual se definió sobre la base del promedio en los meses de mayor producción renovable en el periodo de estudio. Además, muestra un límite Emergencia, definido como el menor valor del promedio en meses de baja producción renovable. Estos niveles pretenden dar una guía de análisis a las partes interesadas, los cuales pueden usar estos niveles para dirigir la toma de decisiones.

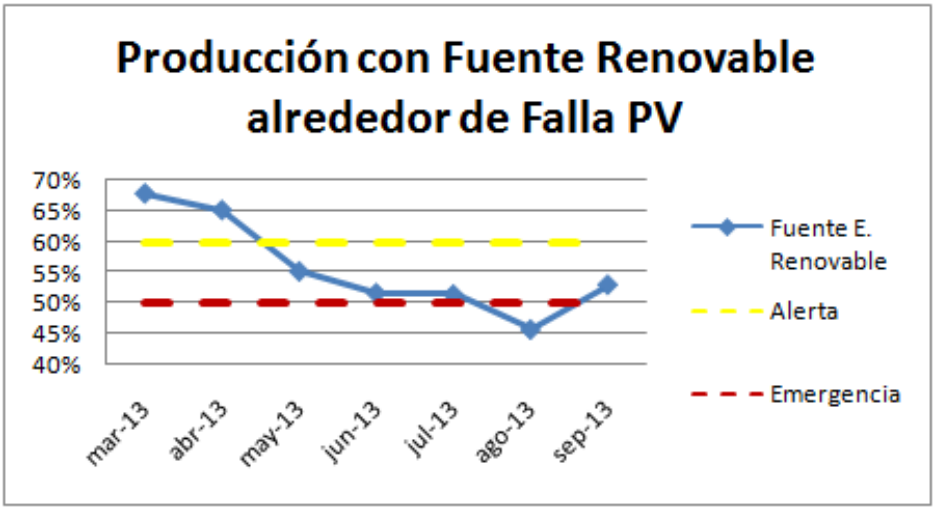


Figura 20: Producción con fuente renovable alrededor de la falla en planta PV

Fuente: Propia

La Figura 21 presenta la evolución del factor de planta PV alrededor de la falla del panel. Se incluyen también dos niveles de referencia. El primer definido como Alerta, el cual se definió según los niveles más altos históricos presentados en el periodo de estudio. Y el nivel emergencia según los niveles más bajos.

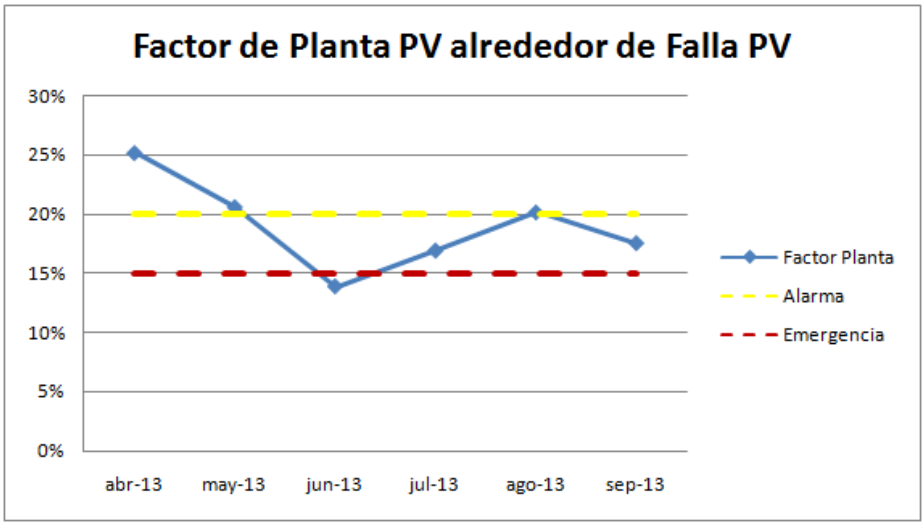


Figura 21: Factor de planta alrededor de la falla en planta PV

Fuente: Propia

Se puede observar en la Figura 21 que en junio 2013 se superó el nivel Emergencia.

La desviación de tensión alrededor de la falla PV se muestra en la Figura 22. Los niveles de alarma se basan en la Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio [46]. De igual forma se presenta la desviación de frecuencia en la Figura 23.

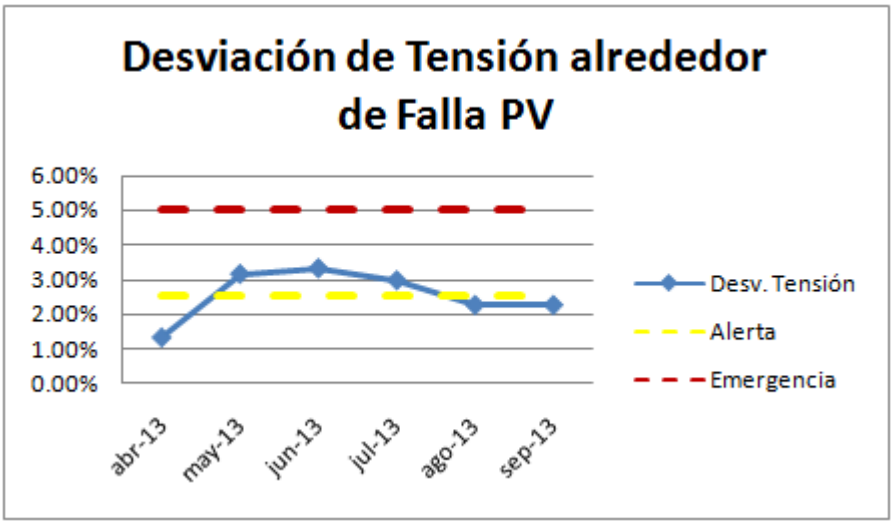


Figura 22: Desviación de tensión alrededor de la falla en planta PV

Fuente: Propia

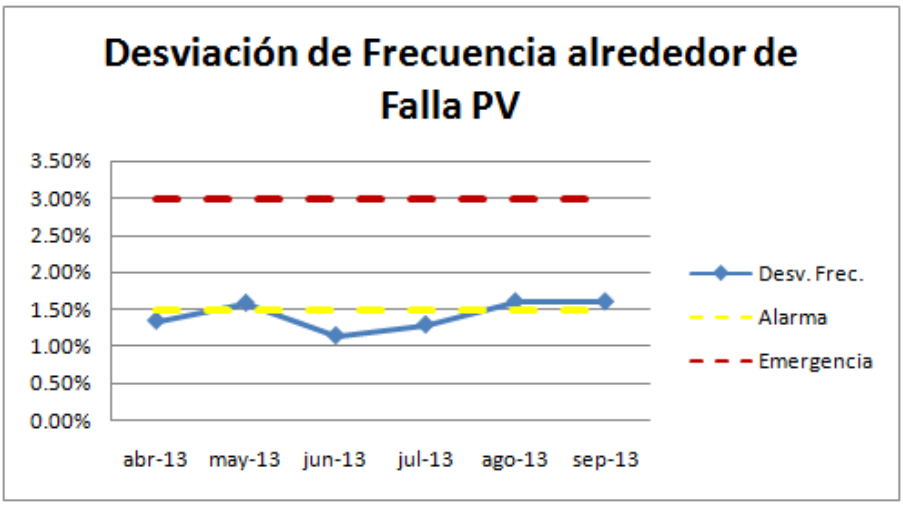


Figura 23: Desviación de frecuencia alrededor de la falla en planta PV

Fuente: Propia

Se puede observar en las Figuras 22 y 23, que no se alcanzaron los niveles de emergencia.

A continuación, las Figuras 24 y 25 muestran los índices alrededor de la falla PV, para analizar su comportamiento.

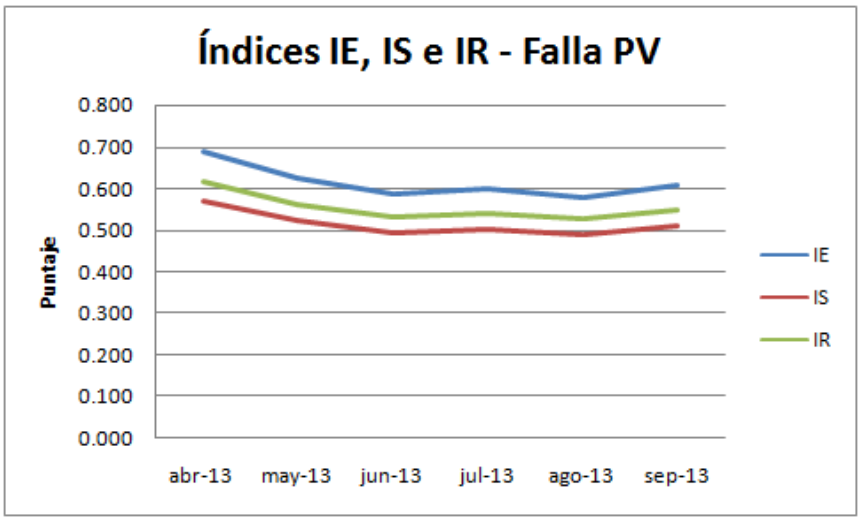


Figura 24: Índices Evitar, Soportar y Recuperar alrededor de la falla en planta PV

Fuente: Propia

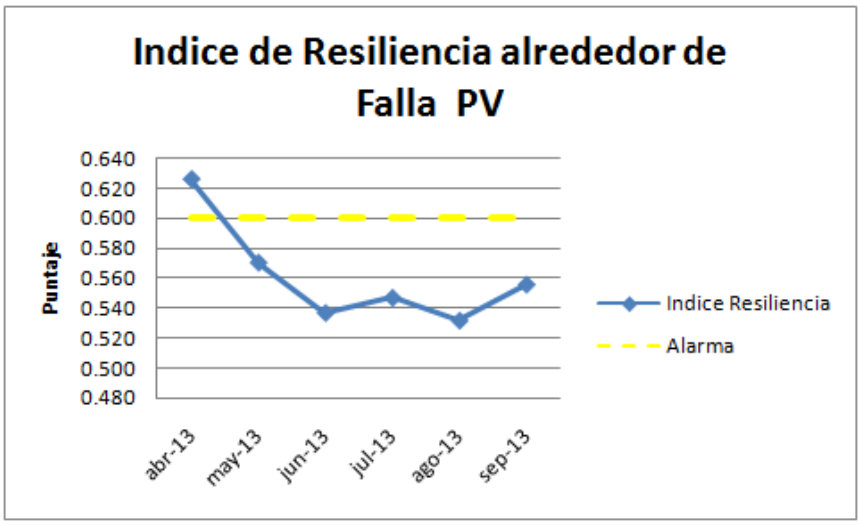


Figura 25: Índice Resiliencia al rededor de la falla en planta PV

Fuente: Propia

Se define el valor de 0.600 puntos como alarma para el índice resiliencia. Esto se basó en el nivel máximo mostrado en los datos históricos del índice en el periodo de estudio.

El análisis de los indicadores permite determinar la influencia de la perturbación de origen técnico en los niveles de los índices. Concretamente, esta situación de falla provocó una caída del índice resiliencia de abril a mayo 2013, al pasar de 0.626 puntos en abril a 0.570 puntos en mayo, lo que significa una caída de 8.95%. Esto se explica observando los tres Índices de las facetas de resiliencia, que bajaron su puntuación, producto de la desmejora en todos los indicadores que definen la medición de resiliencia del sistema. Esto es: aumentaron las desviaciones de tensión y frecuencia; y disminuyeron el factor de planta fotovoltaico, y el aporte de las fuentes renovables.

El índice de resiliencia sigue cayendo en junio 2013, a pesar de que la falla se detecta en el momento de la ocurrencia, lo que conlleva la toma de medidas de recuperación, por medio de reparaciones. Sigue el análisis en junio 2013, donde el índice resiliencia alcanza un punto bajo, y empieza su recuperación en julio 2013.

Sin embargo otra perturbación de origen social, como es la fiesta de la asunción de María en agosto 2013, provoca una nueva caída del índice resiliencia para este mes. En

septiembre 2013 se vuelve a recuperar, sin llegar a los niveles previos a la falla PV de mayo 2013.

Cabe destacar que luego de la perturbación técnica de mayo 2013 se presentaron otros eventos que incluyeron mayores dificultades en la recuperación del sistema. Esto provocó que el nivel del índice de resiliencia aún no alcance el nivel previo a la falla del panel, mes que finaliza el estudio.

5.10 Conclusiones caso de estudio

Según el análisis realizado al sistema ESUSCON se concluye lo siguiente:

- El índice resiliencia muestra variaciones a lo largo de los meses, y su valor se encuentra mayormente por encima de 0.600 puntos, según Figura 16. Las caídas del índice resiliencia por debajo de este valor fueron provocadas por eventos perturbadores identificados.
- El índice resiliencia tiene un coeficiente de correlación con el nivel de radiación horizontal de +0.850 para el año 2012. Se eliminó en este cálculo el mes de enero 2012 por tratarse de un caso extremo de las condiciones del Invierno Boliviano. Y de +0.700 para el año 2013. Lo que se define como una correlación positiva.
- El aporte de energía renovable está relacionado con el nivel de radiación solar. El coeficiente de correlación para el año 2012 es de +0.540 (sin enero 2012), y de +0.650para el año 2013.
- La dependencia del sistema por el recurso solar indica que la diversidad en la microrred es baja, al vincularse la generación renovable a una sola tecnología. Promover la diversidad de las fuentes de generación es una recomendación para orientar las acciones futuras.
- El análisis del indicador consumo de energía mostrado en la Figura E.1, del Anexo E, muestra una tendencia creciente sostenida con el paso de los meses. El consumo creciente está siendo soportado por la generación Diesel según Figura 19.
- Los consumos de energía puntas coinciden con las fiestas de la comunidad, en especial la Fiesta de la Asunción, según se explica en el Anexo C. El consumo

mínimo coincide con el fenómeno conocido como Invierno Boliviano, periodo de mayor pluviosidad del año, donde algunos pobladores salen del pueblo como medida preventiva, según se explica en el Anexo C.

5.11 Resumen

En este capítulo se presenta el análisis del sistema ESUSCON como caso de estudio, donde se aplica la metodología de monitoreo. El periodo de estudio fue de Enero 2011 a Setiembre 2013, esto es todo el tiempo de operación del sistema. Además, se calcularon los indicadores e índices de resiliencia, con la información recopilada. Se encontraron razones para el comportamiento de los indicadores e índices, de manera que la metodología promueva un mayor y mejor conocimiento del sistema. Finalmente, se presentan las conclusiones del análisis del sistema.

Capítulo 6 Conclusiones y trabajo futuros

6.1 Conclusiones

- El presente trabajo propone un nuevo enfoque de monitoreo y seguimiento de sistemas basados en microrredes, de tipo multidisciplinario y multidimensional, con el propósito de:
    - Aportar al conocimiento del comportamiento del sistema frente a perturbaciones.
    - Entregar alertas tempranas para direccionar la toma de decisiones frente a eventos perturbadores, y poyar la toma de decisiones para manipular las variables de dirección y control del sistema.
    - Conocer el avance o retroceso, en pos de los objetivos y metas planteadas.

  El trabajo se basó en la resiliencia, que es un concepto multidimensional, que integra diversos elementos del sistema, y es aplicado como uno de los promotores de sustentabilidad del sistema socio-técnico basado en microrredes.
- El trabajo incluye consideraciones para entender la relación entre resiliencia y sustentabilidad, para promoverla como objetivo global. Se desarrolla una definición y método de medición de resiliencia, basado en el marco conceptual del juzgamiento experto. La idea se basa en observar la respuesta del desempeño del sistema alrededor de un evento perturbador, dividido en tres facetas, estas son: evitar, soportar y recuperar. Estas capacidades entre sí determinan el nivel de resiliencia del sistema de forma cuantitativa.
- La propuesta separa el análisis en cinco indicadores de resiliencia, a saber: avance tecnológico, desarrollo económico, administración ambiental, desarrollo social y desarrollo de la gestión. Esto hace que la aplicación sea flexible y adaptable a cada caso particular. Además, se presenta un método de selección y análisis de indicadores, que busca aportar al conocimiento de las interrelaciones entre éstos.

- Se reconoce que los índices e indicadores son herramientas con gran potencial para las partes interesadas y comunidad, para analizar y comprender las relaciones entre las distintas variables del sistema, y dar seguimiento a la evolución del mismo en el tiempo.
- Se necesita información confiable y periódica de las distintas métricas (variables) del sistema, para el cálculo de indicadores, como paso fundamental para establecer la metodología propuesta.
- Por medio del caso de estudio, fue posible observar el comportamiento de los indicadores e índices medidos a lo largo del periodo de estudio, evidenciando el cambio de estado de resiliencia de la microrred, y cómo lograr la explicación de estos cambios.
- Al analizar el Sistema ESUSCON por medio de la metodología propuesta se logró correlacionar el índice resiliencia con la variable Radiación Global Horizontal, lo que evidencia la utilidad del enfoque, con miras a establecer la capacidad de la microrred frente a perturbaciones.
- Esta metodología se puede unir a los desarrollos anteriores del Centro de Energía, al aportar a la evaluación de las intervenciones tecnológicas para la generación de electricidad con fuentes renovables en comunidades, como el Social SCADA.

6.2 Trabajos futuros

Se han identificado los siguientes trabajos futuros que continúen la presente línea de investigación:

- Considerar el desarrollo de temas dirigidos a la inclusión de la resiliencia como parte del diseño de microrredes, para promoverla desde el origen del sistema, en las etapas de: definición de requerimientos, funcionalidades y diseño.
- Formular un plan de promoción de la resiliencia en los sistemas basados en microrredes que están operativos, y que además de medirla, se promueva su mejora por medio de acciones coordinadas en todas las dimensiones estudiadas.

- Incluir la metodología propuesta en el sistema ESUSCON de manera sistemática, como parte del Social SCADA, para realizar el monitoreo y seguimiento, de forma que apoye la gestión y la toma de decisiones.
- Analizar la relación entre resiliencia y vulnerabilidad, que aporte al análisis de la dinámica del sistema en estudio, y con esto se guíe la toma de decisiones frente a situaciones detectadas durante la operación.
- Desarrollar temas de modelación de sistemas socio-técnicos, para llegar a conocer la relaciones entre las distintas variables involucradas, y así establecer su dinámica y operación.

Referencias Bibliográficas

[1] C. Alvial-Palavicino, N. Garrido-Echeverría, G. Jiménez-Estévez, L. Reyes, and R. Palma-Behnke, "A methodology for community engagement in the introduction of renewable based smart microgrid," *Energy Sustain. Dev.*, vol. 15, no. 3, pp. 314–323, Sep. 2011.

[2] B. Whitworth and A. de Moor, "The Social Requeriments of Technical Systems," in *Handbook of Research on Socio-Technical Design and Social Networking Systems*, I. GLobal, Ed. Auclland, NZ, 2009, p. 1034.

[3] A. H. Etemadi, S. Member, D. E. Olivares, R. Iravani, M. Kazerani, S. Member, N. D. Hatziargyriou, and R. Palma, "Trends in Microgrid Control," *IEEE Trans. Smart Grid*, pp. 1–14, 2012.

[4] U. Nation, "Our Common Future , Chapter 2 : Towards Sustainable Development I . The Concept of Sustainable Development," New York, USA, 1987.

[5] M. Astier, O. R. Masera, and Y. Galván, *Evaluación de sustentabilidad. Un enfoque dinámico y multidimensional*. Valencia, España, 2008, p. 201.

[6] N. Lior, "About sustainability metrics for energy development," Philadelphia, PA, 2006.

[7] C. Joung, J. Carrel, and S. Feng, "Categorization of indicators for sustainable manufacturing," *J. Ecol. Indic.*, vol. 24, pp. 148–157, 2012.

[8] O. E. P. Office, "OECD Environmental Indicators," Paris, 2003.

[9] Global Reporting Iniative, "Suatainability Reporting Guidelines," Amsterdam,The Netherlands, 2013.

[10] U. Nations, *Indicators of Sustainable Development : Guidelines and Methodologies Indicators of Sustainable Development :*, Third Edit., no. October. New York, USA, 2007, p. 99.

[11] M. Bollen, J. Zhong, and Y. Lin, "Perfomance Indices and Objetives for Microgrids.," in *20th International Conference on Electricity Distribution CIRED*, 2009, no. 0607, pp. 8–11.

[12] M. Bollen, J. Zhong, O. Samuelsson, and J. Björnstedt, “Performance indicators for microgrids during grid-connected and island operation,” pp. 1–6, 2009.

[13] E. Dialynas, S. Member, and N. D. Hatziargyriou, “Impact of Microgrids on Service Quality,” pp. 1–5, 2007.

[14] R. Yokoyama, S. Member, T. Niimura, N. Saito, and A. Microgrids, “Modeling and Evaluation of Supply Reliability of Microgrids including PV and Wind Power,” pp. 1–5, 2008.

[15] A. J. L. M. Siang, D. C. Wijeyesekera, L. S. Mei, and A. Zainorabidin, “Innovative Laboratory Assessment of the Resilient Behaviour of Materials (Rigid, Elastic and Particulates),” *Procedia Eng.*, vol. 53, pp. 156–166, Jan. 2013.

[16] C. S. Hollling, “Resilience and Stability of Ecological Systems,” *Annu. Rev. Ecol. Syst.*, vol. 4, pp. 1–23, 1973.

[17] L. J. Kirmayer, M. Health, J. G. Hospital, M. Sehdev, R. Whitley, D. Psychiatric, F. Psychiatry, C. Isaac, and P. Coordinator, “Community Resilience: Models, Metaphors and Measures,” *J. la Santé Autoch.*, pp. 62–117.

[18] L. Gunderson and C. Folke, “Resilience — Now More than Ever,” *Ecol. Soc.*, vol. 10, no. 2, p. 5, 2005.

[19] L. Lebel, J. M. Anderies, B. Campbell, C. Folke, S. Hatfield-dodds, T. P. Hughes, and J. Wilson, “Governance and the Capacity to Manage Resilience in Regional Social-Ecological Systems,” 2006.

[20] C. Perrings, “Resilience and sustainable development,” *Environ. Dev. Econ.*, vol. 11, no. 04, p. 417, Jul. 2006.

[21] a. M. Madni and S. Jackson, “Towards a Conceptual Framework for Resilience Engineering,” *IEEE Syst. J.*, vol. 3, no. 2, pp. 181–191, Jun. 2009.

[22] M. Ouyang, L. Dueñas-Osorio, and X. Min, “A three-stage resilience analysis framework for urban infrastructure systems,” *Struct. Saf.*, vol. 36–37, pp. 23–31, May 2012.

[23] T. L. Griffith and D. J. Dougherty, “Beyond socio-technical systems: introduction to the special issue,” *J. Eng. Technol. Manag.*, vol. 19, no. 2, pp. 205–216, Jun. 2002.

[24] F. W. Geels, “Ontologies , socio-technical transitions (to sustainability), and the multi-level perspective,” *Res. Policy*, vol. 39, no. 4, pp. 495–510, 2010.

[25] B. Moldan, S. Janoušková, and T. Hák, “How to understand and measure environmental sustainability: Indicators and targets,” *Ecol. Indic.*, vol. 17, pp. 4–13, Jun. 2012.

[26] O. Erol, D. Henry, B. Sauser, and M. Mansouri, “Perspectives on measuring enterprise resilience,” in *2010 IEEE International Systems Conference*, 2010, pp. 587–592.

[27] K. Barker, J. E. Ramirez-marquez, and C. M. Rocco, “Resilience-based network component importance measures,” vol. 117, pp. 89–97, 2013.

[28] J. Fiksel, “Designing resilient, sustainable systems.,” *Environ. Sci. Technol.*, vol. 37, no. 23, pp. 5330–9, Dec. 2003.

[29] A. Milman and A. Short, “Incorporating resilience into sustainability indicators: An example for the urban water sector,” *Glob. Environ. Chang.*, vol. 18, no. 4, pp. 758–767, Oct. 2008.

[30] S. Derissen, M. F. Quaas, and S. Baumgärtner, “The relationship between resilience and sustainability of ecological-economic systems,” *Ecol. Econ.*, vol. 70, no. 6, pp. 1121–1128, 2011.

[31] R. Lasseter, A. Akhil, C. Marnay, J. Stephens, J. Dagle, R. Guttromson, A. S. Meliopoulous, R. Yinger, and J. Eto, “The CERTS MicroGrid Concept,” 2002.

[32] R. H. Lasseter, “Extended CERTS microgrid,” *2008 IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet. - Convers. Deliv. Electr. Energy 21st Century*, pp. 1–5, Jul. 2008.

[33] L. T. T. Dinh, H. Pasman, X. Gao, and M. S. Mannan, “Resilience engineering of industrial processes: Principles and contributing factors,” *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 25, no. 2, pp. 233–241, Mar. 2012.

[34] Resilience Alliance, “SOCIAL-ECOLOGICAL SYSTEMS,” 2007.

[35] I. Systems, *IEEE 1547 Standards for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems*, no. July. New York, USA: IEEE, 2003, p. 16.

[36] P. M. Costa and M. a. Matos, “Reliability of distribution networks with microgrids,” *2005 IEEE Russ. Power Tech*, pp. 1–7, Jun. 2005.

[37] Z. Bie, P. Zhang, S. Member, G. Li, B. Hua, M. Meehan, and X. Wang, “Reliability Evaluation of Active Distribution Systems Including Microgrids,” pp. 1–9, 2012.

[38] C. L. T. Borges and E. Cantarino, “Microgrids Reliability Evaluation with Renewable Distributed Generation and Storage Systems,” in *18ht IFAC World Congress*, 2011, pp. 11695–11700.

[39] G. a. Tanguay, J. Rajaonson, J.-F. Lefebvre, and P. Lanoie, “Measuring the sustainability of cities: An analysis of the use of local indicators,” *Ecol. Indic.*, vol. 10, no. 2, pp. 407–418, Mar. 2010.

[40] C. E.-F. U. de Chile, “Informe Área Social,” Santiago, Chile, 2011.

[41] C. E.-F. U. de Chile, “Sistema de Energización Sustentable para Huatacondo - Informe Técnico,” Santiago, Chile, 2010.

[42] C. E.-F. U. de Chile, “Informe de cierre Proyecto ESUSCON,” Santiago, Chile, 2011.

[43] M. de Energía and C. I. A. (GIZ, “Mediciones de la radiación solar en el norte de Chile,” *Radiación Global Horizontal Pozo Almonte*. [Online]. Available: http://antiguo.minenergia.cl/minwww/opencms/03_Energias/Otros_Niveles/renovables_noconvencionales/Tipos_Energia/energia_solar.html. [Accessed: 09-Oct-2013].

[44] NREL, “Glosorio de Términos,” 2013. [Online]. Available: http://rredc.nrel.gov/solar/glossary/gloss_g.html. [Accessed: 16-Dec-2013].

[45] M. Noticias, “Pueblo lleva casi un mes aislado por invierno altiplánico de la región de Tarapacá,” *Noticiario*, 2012. [Online]. Available: http://www.ahoranoticias.cl/pais/tarapaca/pueblo-lleva-casi-un-mes-aislado-por-invierno-altiplanico-de-la-region-de-tarapaca.html. [Accessed: 15-Oct-2013].

[46] C. N. de Energía, *Norma tecnica de seguridad y calidad de servicio*. Chile: Gobierno de Chile, 2009, p. 131.

[47] X. Yu and S. Tang, “Construction and Application of Perfomance Evaluation Matrix for Knowledge Management,” in *2010 International Conference of Information Science and Management Engineering*, 2010, pp. 416–419.

[48] R. K. Rietz and S. Suryanarayanan, “A Review of the Application of Analytic Hierarchy Process to the Planning and Operation of Electric Power Microgrids,” vol. 80401, pp. 1–6, 2008.

[49] W. Shuyu, “Study on Evaluation Indexes and Methods of Construction Project Standardization Level,” pp. 1–4, 2011.

[50] L. W. Canter and S. F. Atkinson, “Multiple uses of indicators and indices in cumulative effects assessment and management,” *Environ. Impact Assess. Rev.*, vol. 31, no. 5, pp. 491–501, Sep. 2011.

[51] L. E. Sontheimer and R. Mosse, *Performance Monitoring Indicators Handbook - World Bank Paper No 334*. Washington, D.C., 1996.

[52] Z. Ma, “Towards a unified definition for reliability, survivability and resilience (I): the conceptual framework inspired by the handicap principle and ecological stability,” *2010 IEEE Aerosp. Conf.*, no. I, pp. 1–12, Mar. 2010.

[53] I. Atomic and E. Agency, “Energy Indicators for Sustainable Development : Guidelines and,” Austria, 2005.

[54] N. Garrido, “ANÁLISIS Y EVALUACIÓN AMBIENTAL PARA HUATACONDO , COMUNA DE POZO ALMONTE ,” Universidad de Chile, 2010.

[55] Arcadis, “DECLARACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL EXPLORACIONES MINERAS TECK , ANEXO C CARACTERIZACIÓN DE GRUPOS HUMANOS,” Comuna Pozo Almonte, Iquique, Chile, 2012.

[56] P. W. Cornejo, “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE PLATAFORMA SCADA PARA SISTEMA DE ELECTRIFICACIÓN SUSTENTABLE EN LA LOCALIDAD DE HUATACONDO,” Universidad de Chile, 2011.

[57] J. P. I. CODOCEO, “PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA EVALUACIÓN SOCIOECONÓMICA Y AMBIENTAL DE PROYECTOS DE MICRO-REDES CON FUENTES DE ENERGÍA RENOVABLE EN COMUNIDADES RURALES DEL NORTE DE CHILE,” Universidad de Chile, 2012.

[58] C. N. de M. Ambiente, “GUÍA METODOLÓGICA PARA LA ESTIMACIÓN DE EMISIONES ATMOSFÉRICAS DE FUENTES FIJAS Y MÓVILES,” Santiago, Chile, 2009.

[59] M. Corp., “Microsoft Office,” *Excel Help*, 2013. [Online]. Available: http://office.microsoft.com/es-es/excel-help/coef-de-correl-HP005209023.aspx. [Accessed: 11-Dec-2013].

[60] S. Chowdhury, S. P. Chowdhury, and P. Crossley, *Microgrids and Active Distribution Networks*, First Edit. United Kingdom, 2009, p. 321.

[61] H. J. Laaksonen, “Protection Principles for Future Microgrids,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 25, no. 12, pp. 2910–2918, Dec. 2010.

[62] R. H. Lasseter, “MicroGrids,” *2002 IEEE Power Eng. Soc. Winter Meet. Conf. Proc. (Cat. No.02CH37309)*, vol. 1, pp. 305–308, 2002.

[63] T. Basso, S. Member, J. Hambrick, and D. Deblasio, “Update and Review of IEEE P2030 Smart Grid Interoperability and IEEE 1547 Interconnection Standards,” pp. 1–7, 2011.

[64] I. Standards, *IEEE 1547.3-2007 Guide for Monitoring, Information Exchange, and Control of Distributed Resources Interconnected with Electric Power Systems*, no. November. New York, USA, 2007, p. 158.

[65] R. Billinton and R. Allan, *Reliability Evaluation of Power Systems*, Second. USA, 1996, p. 540.

ANEXOS

Anexo A: Listado de Indicadores para microrredes

Anexo B: Indicadores e índices

Anexo C: Descripción del Sistema ESUSCON y de la comunidad de Huatacondo

Anexo D: Estimación población diaria de Huatacondo

Anexo E: Estimación consumo de Diesel y emisiones CO2

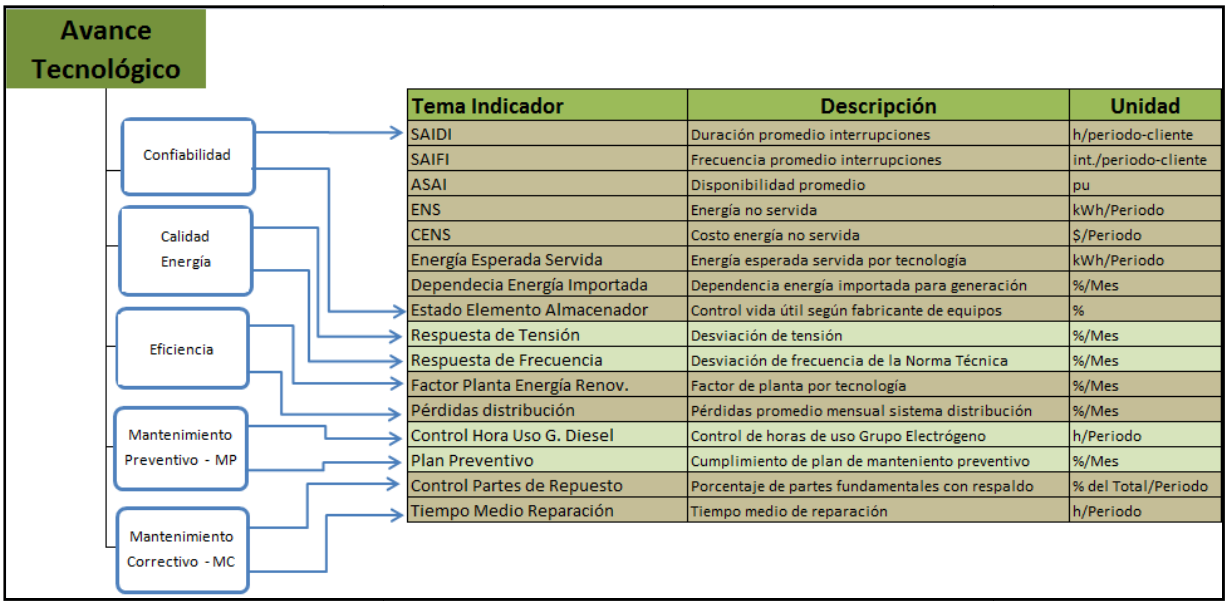
Anexo F: Análisis de correlaciones entre indicadores

Anexo G: Teoría de microrredes

Anexo H: Prueba de resiliencia para indicadores caso de estudio

Anexo I:Tablas para cálculo de índices de resiliencia caso de estudio

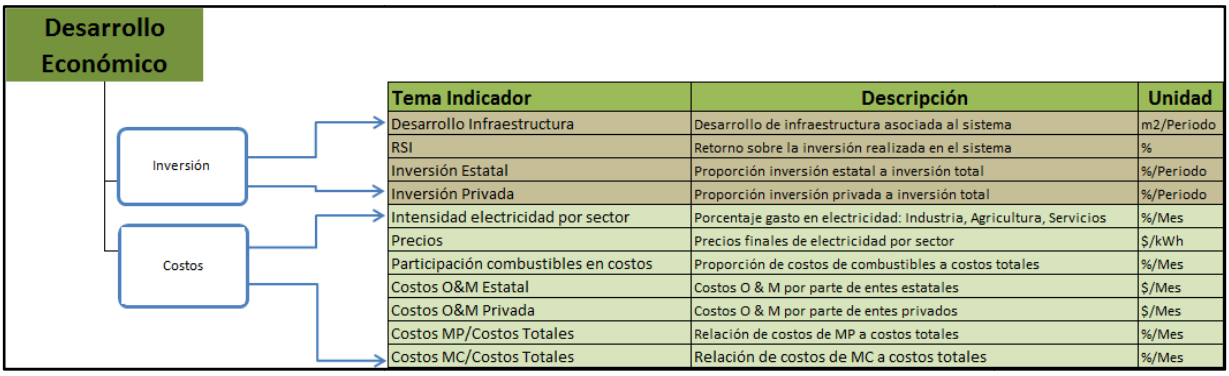
Anexo A: Listado de Indicadores para microrredes



Tema Indicador	Descripción	Unidad
SAIDI	Duración promedio interrupciones	h/periodo-cliente
SAIFI	Frecuencia promedio interrupciones	int./periodo-cliente
ASAI	Disponibilidad promedio	pu
ENS	Energía no servida	kWh/Periodo
CENS	Costo energía no servida	$/Periodo
Energía Esperada Servida	Energía esperada servida por tecnología	kWh/Periodo
Dependecia Energía Importada	Dependencia energía importada para generación	%/Mes
Estado Elemento Almacenador	Control vida útil según fabricante de equipos	%
Respuesta de Tensión	Desviación de tensión	%/Mes
Respuesta de Frecuencia	Desviación de frecuencia de la Norma Técnica	%/Mes
Factor Planta Energía Renov.	Factor de planta por tecnología	%/Mes
Pérdidas distribución	Pérdidas promedio mensual sistema distribución	%/Mes
Control Hora Uso G. Diesel	Control de horas de uso Grupo Electrógeno	h/Periodo
Plan Preventivo	Cumplimiento de plan de manteniento preventivo	%/Mes
Control Partes de Repuesto	Porcentaje de partes fundamentales con respaldo	% del Total/Periodo
Tiempo Medio Reparación	Tiempo medio de reparación	h/Periodo

Figura A.1: Indicadores recomendados de Avance Tecnológico

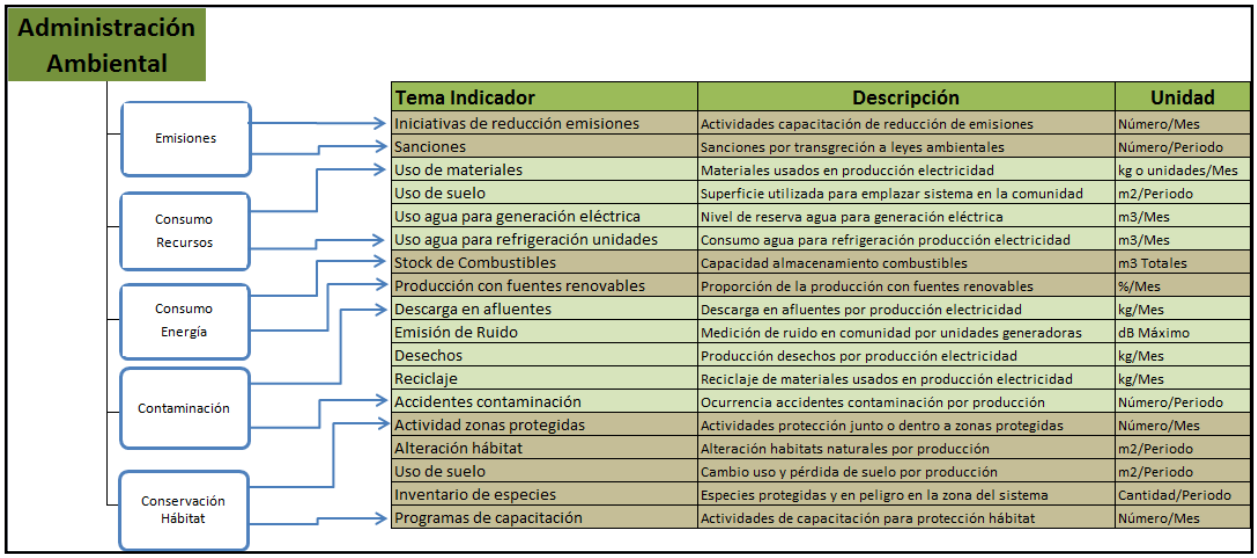
Fuente: Propia



Tema Indicador	Descripción	Unidad
Desarrollo Infraestructura	Desarrollo de infraestructura asociada al sistema	m2/Periodo
RSI	Retorno sobre la inversión realizada en el sistema	%
Inversión Estatal	Proporción inversión estatal a inversión total	%/Periodo
Inversión Privada	Proporción inversión privada a inversión total	%/Periodo
Intensidad electricidad por sector	Porcentaje gasto en electricidad: Industria, Agricultura, Servicios	%/Mes
Precios	Precios finales de electricidad por sector	$/kWh
Participación combustibles en costos	Proporción de costos de combustibles a costos totales	%/Mes
Costos O&M Estatal	Costos O & M por parte de entes estatales	$/Mes
Costos O&M Privada	Costos O & M por parte de entes privados	$/Mes
Costos MP/Costos Totales	Relación de costos de MP a costos totales	%/Mes
Costos MC/Costos Totales	Relación de costos de MC a costos totales	%/Mes

Figura A.2: Indicadores recomendados de Desarrollo Económico

Fuente: Propia



Tema Indicador	Descripción	Unidad
Iniciativas de reducción emisiones	Actividades capacitación de reducción de emisiones	Número/Mes
Sanciones	Sanciones por transgreción a leyes ambientales	Número/Periodo
Uso de materiales	Materiales usados en producción electricidad	kg o unidades/Mes
Uso de suelo	Superficie utilizada para emplazar sistema en la comunidad	m2/Periodo
Uso agua para generación eléctrica	Nivel de reserva agua para generación eléctrica	m3/Mes
Uso agua para refrigeración unidades	Consumo agua para refrigeración producción electricidad	m3/Mes
Stock de Combustibles	Capacidad almacenamiento combustibles	m3 Totales
Producción con fuentes renovables	Proporción de la producción con fuentes renovables	%/Mes
Descarga en afluentes	Descarga en afluentes por producción electricidad	kg/Mes
Emisión de Ruido	Medición de ruido en comunidad por unidades generadoras	dB Máximo
Desechos	Producción desechos por producción electricidad	kg/Mes
Reciclaje	Reciclaje de materiales usados en producción electricidad	kg/Mes
Accidentes contaminación	Ocurrencia accidentes contaminación por producción	Número/Periodo
Actividad zonas protegidas	Actividades protección junto o dentro a zonas protegidas	Número/Mes
Alteración hábitat	Alteración habitats naturales por producción	m2/Periodo
Uso de suelo	Cambio uso y pérdida de suelo por producción	m2/Periodo
Inventario de especies	Especies protegidas y en peligro en la zona del sistema	Cantidad/Periodo
Programas de capacitación	Actividades de capacitación para protección hábitat	Número/Mes

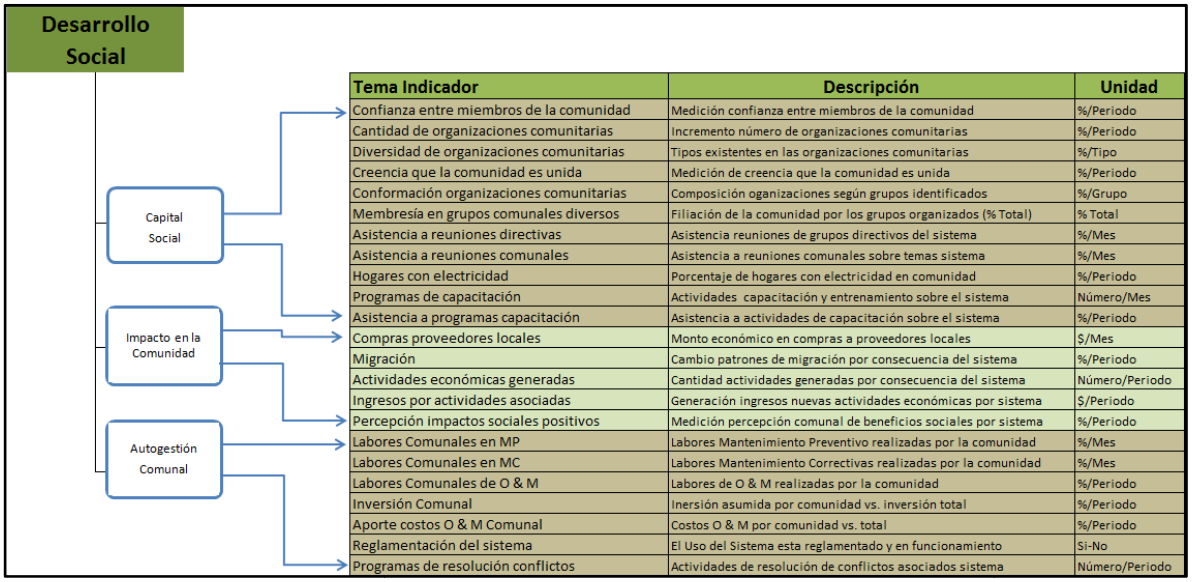
Figura A.3: Indicadores recomendados de Administración Ambiental

Fuente: Propia

Tema Indicador	Descripción	Unidad
Confianza comunal en el sistema	Medición confianza de usuarios en el sistema energético	%/Periodo
Confianza comunal en Patrocinador	Medición confianza de usuarios en Patrocinador	%/Periodo
Confianza comunal en Desarrolaldor	Medición confianza de usuarios en Desarrollador	%/Periodo
Efectividad	Medición efectividad percibida por usuarios del sistema	%/Periodo
Satisfacción	Medición nivel de satisfacción de usuarios con el sistema	%/Periodo
Plan de identificación riesgos	Actividades tendientes a medir el riesgo asociado al sistema	Número/Mes
Plan de reducción riesgos	Actividades tendientes a reducir riesgos asociados al sistema	Número/Mes
Plan capacitación riesgos	Actividades capacitación sobre riesgos asociados sistema	Número/Mes
Plan de recuperación ante percances	Actividades desarrolladas recuperación del sistema ante percances	Número/Mes
Plan de divulgación general del sistema	Actividades divulgación del sistema en comunidad	Número/Mes
Coordinación con Desarrollador	Actividades coordinación con Desarrollador	Número/Mes
Efectividad coordinación con Desarrollador	Medición percepción de efectividad coordinación con Desarrollador	%/Periodo
Coordinación con Patrocinador	Actividades coordinación con Patrocinador	Número/Mes
Efectividad coordinación con Patrocinador	Medición percepción de efectividad coordinación con Patrocinador	%/Periodo
Coordinación con Entes Estatales	Actividades coordinación con Entes Estatales	Número/Mes
Efectividad coordinación con Entes Estatales	Medición percepción efectividad coordinación con Entes Estatales	%/Periodo
Confianza en organizaciones comunitarias	Medición confianza usuarios en organizaciones comunales	%/Periodo

Figura A.4: Indicadores recomendados de Desarrollo de la Gestión

Fuente: Propia



Tema Indicador	Descripción	Unidad
Confianza entre miembros de la comunidad	Medición confianza entre miembros de la comunidad	%/Periodo
Cantidad de organizaciones comunitarias	Incremento número de organizaciones comunitarias	%/Periodo
Diversidad de organizaciones comunitarias	Tipos existentes en las organizaciones comunitarias	%/Tipo
Creencia que la comunidad es unida	Medición de creencia que la comunidad es unida	%/Periodo
Conformación organizaciones comunitarias	Composición oganizaciones según grupos identificados	%/Grupo
Membresía en grupos comunales diversos	Filiación de la comunidad por los grupos organizados (% Total)	% Total
Asistencia a reuniones directivas	Asistencia reuniones de grupos directivos del sistema	%/Mes
Asistencia a reuniones comunales	Asistencia a reuniones comunales sobre temas sistema	%/Mes
Hogares con electricidad	Porcentaje de hogares con electricidad en comunidad	%/Periodo
Programas de capacitación	Actividades capacitación y entrenamiento sobre el sistema	Número/Mes
Asistencia a programas capacitación	Asistencia a actividades de capacitación sobre el sistema	%/Periodo
Compras proveedores locales	Monto económico en compras a proveedores locales	$/Mes
Migración	Cambio patrones de migración por consecuencia del sistema	%/Periodo
Actividades económicas generadas	Cantidad actividades generadas por consecuencia del sistema	Número/Periodo
Ingresos por actividades asociadas	Generación ingresos nuevas actividades económicas por sistema	$/Periodo
Percepción impactos sociales positivos	Medición percepción comunal de beneficios sociales por sistema	%/Periodo
Labores Comunales en MP	Labores Mantenimiento Preventivo realizadas por la comunidad	%/Mes
Labores Comunales en MC	Labores Mantenimiento Correctivas realizadas por la comunidad	%/Mes
Labores Comunales de O & M	Labores de O & M realizadas por la comunidad	%/Periodo
Inversión Comunal	Inersión asumida por comunidad vs. inversión total	%/Periodo
Aporte costos O & M Comunal	Costos O & M por comunidad vs. total	%/Periodo
Reglamentación del sistema	El Uso del Sistema esta reglamentado y en funcionamiento	Si-No
Programas de resolución conflictos	Actividades de resolución de conflictos asociados sistema	Número/Periodo

Figura A.5: Indicadores recomendados de Desarrollo Social

Fuente: Propia

Anexo B: Indicadores e índices

B.1 Indicadores e índices

El estudio de la evaluación de un sistema inicia con una metodología adecuada de construcción de índices de desempeño, lo que jugará un rol importante en el monitoreo y control del mismo. La pregunta será cómo construir un sistema de evaluación completo, como prerrequisito para resolver el problema global que se plantea. Uno de los mayores retos es construir una metodología objetiva, de manera que se generen conclusiones reales, que entregue directrices útiles. Finalmente, el índice diseñado debe ser operacional, simple de comprender, conveniente de obtener, fácil de calcular, y capaz de adaptarse a los cambios del sistema evaluado [47].

Como objetivo superior del problema de construcción de índices de desempeño está el direccionar los procesos de toma de decisiones. Para el caso de microrredes se debe apoyar los procesos de diseño y operación, considerando la arquitectura del sistema relacionado con las aplicaciones, modelos propietarios, beneficios, modos de operación, y otros. Los procesos de toma de decisiones deben incorporar estos aspectos. Decisiones relacionadas con el tipo y localización de la micro fuente de generación, la configuración de la red que mejor direccione las necesidades, la localización óptima de los componentes de la red de distribución (Cables, bancos capacitores, elementos de almacenamiento energía) [48].

Cuando se realiza una evaluación integral por medio de un método multi índice, se trata de sintetizar los múltiples aspectos del sistema en una evaluación exhaustiva global. En la actualidad existen diversos métodos matemáticos utilizados para este propósito, conocidos como multi objetivo y multinivel. La aplicación es amplia, y cubre todos los aspectos del quehacer humano, con una gama de aplicaciones cada vez más amplia. Sin embargo, estos métodos de evaluación tienen diferentes puntos de partida, con ideas diferentes para resolver los problemas, y el objeto de aplicación. Ellos tienen sus ventajas y desventajas, por lo que

debe seleccionar la evaluación metodología cuidadosamente. Los métodos de evaluación tales como los que aparecen en la Tabla B.1[49].

Comparacion Métodos Evaluación Multi Criterio				
Categoría	*Nombre Métodos Comunes*	*Méritos*	*Defectos*	*Aplicación*
Juzgamiento Experto	Delphi, Entrevistas, Lluvia Ideas, Analogía, Coeficiente de Correlación.	Simple, se usa el conocimiento de Expertos, la conclusión es fácil de aplicar.	Subjetivo, lo que hace difícil aplicar en otra evaluación.	En Índices Cualitativos.
Modelos de Evaluación Económica	Enfoque Función de Producción, Entrada-Salida, Cuadro Mando Integral, Simulación Monte Carlo, Análisis Costo/Beneficio.	Objetivo y útil.	Difícil de modelar, aplicación limitada.	Desempeño económico.
Métodos Matemáticos	Decisión Multi-Objetivo, Análisis de Datos, Proceso Analítico Jerárquico, Fuzzy, BP Redes Neuronales, Algoritmos Genéticos, Correlación Grey, Análisis Componente Principal, Métodos de Clustering, Factor de Análisis	Comprensivo, comparable, objetivo y razonable, con base teórica.	Difícil de modelar, requiere gran trabajo, y buenas bases matemáticas.	Índices Cuantitativos.
Métodos Combinados	Proceso Analítico Jerárquico y Fuzzy, Integrado Evaluación Fuzzy y Análisis de Datos, Correlación Grey.	Usa varios métodos combinados.	Depende de los métodos seleccionados.	Múltiples.

Tabla B.1: Comparación distintos métodos de evaluación multicriterio

Fuente: [49]

Un *indicador* se usa para describir características de un sistema o proceso, de tal manera que tiene un significado más allá del valor nominal de sus componentes. Puede comprender una sola métrica o variable; o ser un valor resultado de un conjunto de métricas (agregación de variables) [50]. El indicador tiene como objetivo comunicar información sobre el sistema o proceso, sea esta de tipo: impactos, resultados, salidas, y entradas que se monitorean en el tiempo para evaluar el progreso, comparando con los objetivos planteados [51]. Los indicadores organizan la información de manera que aclara las relaciones dentro del sistema, y ayudan a identificar problemas que pueden impedir el logro de los objetivos planteados.

Por otro lado, un *índice* abarca la agregación de múltiples variables, y puede ser visto como una referencia o categorización descriptiva de una gran cantidad de datos o informaciones que involucran múltiples métricas. Su principal propósito es resumir y

simplificar los datos e información, a fin de que sea útil para la toma de decisiones y las partes interesadas en el sistema, proceso o proyecto [51].

B.2 Criterios de Selección de Indicadores

El método de selección de indicadores debe tener ciertos criterios generales que guíen el proceso y validen su elección. Existe coincidencia en la literatura revisada que los tres criterios básicos de selección de indicadores son los siguientes [8], [52], [53]:

1. Que sea útil, relevante, e importante para el sistema, esto es que sirva para medir el cumplimiento de objetivos y el desempeño.
2. Que sea accesible, es decir que la información para el cálculo está disponible, o es posible de alcanzar para implementarlo. Esto significa que su implementación tiene una relación costo/beneficio razonable.
3. Que sea comprensible, esto es que muestra o expresa de forma clara el contenido para ser analizado y aplicado. Por lo tanto, aporta en la construcción de una imagen representativa de las condiciones del sistema.

Anexo C: Descripción del sistema ESUSCON y la comunidad de Huatacondo

C.1 Descripción sistema ESUSCON

El sistema de electrificación rural ESUSCON es una iniciativa del Centro de Energía, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, de la Universidad de Chile, junto con el apoyo de entidades estatales y compañías mineras de la zona, en la localidad de Huatacondo, Región de Tarapacá, Chile. Este tiene como objetivo desarrollar un sistema de suministro eléctrico aislado bajo el esquema de microrred, para proveer a los usuarios electricidad continua, con niveles adecuados de calidad de servicio [1].

Previo a la entrada en operación de ESUSCON, el sistema eléctrico de Huatacondo se componía de un grupo diesel conectado a una red trifásica, con una potencia media de 30kW, según datos suministrados por el Centro de Energía. La calidad del suministro era percibida como buena, pero tenía algunos inconvenientes como desequilibrio de tensión fuera de norma técnica, baja regulación de tensión y frecuencia. Además, el servicio se entregaba en horario acotado según el día. El horario era el siguiente:

- Lunes a Viernes: 14:00hrs a 00:00hrs.
- Sábados y Domingos: 16:00hrs a 00:00hrs.

Ante este panorama se propuso la solución basada en una microrred, que coordinara el recurso existente, a base del generador Diesel, con fuentes de energía renovable, específicamente: eólica, solar y biomasa, adicionando un elemento almacenador de energía basado en un paquete de baterías de tipo plomo-ácido. Estos elementos son comandos por un sistema de manejo de energía EMS.

En la concepción inicial del proyecto se estudio la construcción de una planta de biomasa, para aprovechar los desechos del pueblo, posteriormente se descartó la idea.

Al inicio del proyecto el equipo del Centro de Energía, se enfocó en estudiar los efectos de la introducción de la tecnología asociada, lo que puede provocar cambios

conductuales en la comunidad con la cual tendrán que coexistir. Debido a lo anterior, es que el equipo buscó una propuesta que permitiera una adecuada intervención e integración de la comunidad de Huatacondo, incorporando el concepto de desarrollo sustentable, y que a la vez minimice o evite cualquier conflicto asociado a la correcta implementación y aceptación del proyecto. Fue así como el concepto de sustentabilidad fue asociado al proyecto desde el inicio, para que permeara entre la comunidad y las partes interesadas. Para cumplir con este fin, se elaboró una metodología de intervención compuesta por tres etapas, estas son [1]:

- Etapa I: Construcción de confianza. Entregar una visión preliminar de la comunidad de Huatacondo, y comprender su estructura organizativa y construir confianza.
- Etapa II: Co-construcción. Discutir distintas visiones entre partes interesadas para alcanzar consenso en los siguientes pasos.
- Etapa III: Asegurar sustentabilidad. Identificar potenciales impactos del sistema y establecer métodos de monitoreo.

C.2 Características de Huatacondo

La localidad de Huatacondo se encuentra ubicada en la comuna de Pozo Almonte, provincia del Tamarugal, Región de Tarapacá. Limita al norte con la comuna de Huara, al oeste con la comuna de Iquique, al este con la comuna de Pica y al sur con la comuna de María Elena, Región de Antofagasta, ver figura siguiente [54].

Su población promedio durante los años de vigencia de la microrred ESUSCON alcanza las 75 personas, y presentan un marcado carácter de hibridación cultural, con un origen hispano y etnias autóctonas. En el Anexo D se hace un estimado de población diaria. Según el censo de 2002, sólo 4 de los 53 habitantes se identificó con alguna etnia (3 atacameños y 1 aymara), mientras que los 49 restantes no indicaron pertenecer a una etnia [55]. Un rasgo característico de Huatacondo es que la mayoría de sus prácticas culturales están fuertemente ligadas a la religión católica.

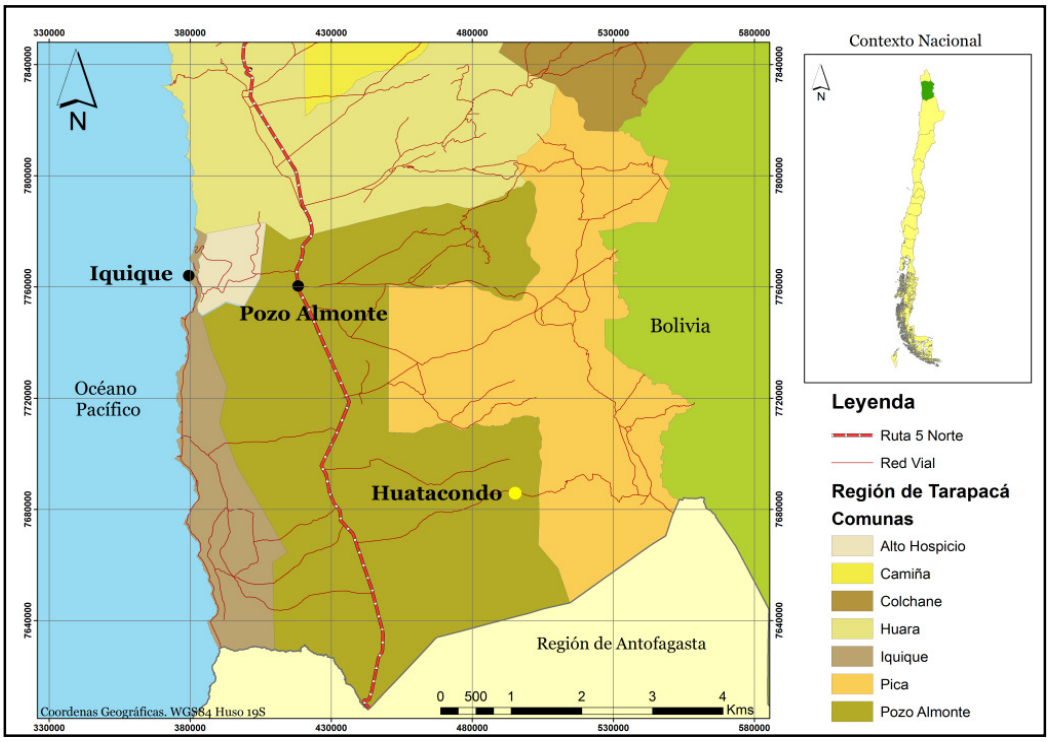


Figura C.1: Ubicación de Huatacondo

Fuente: [54]

Las principales actividades económicas de la comunidad son la minería y la agricultura de subsistencia. Además, un grupo de sus residentes son personas retiradas, y reciben ingresos de alguna pensión o programa de asistencia estatal.

Entre las organizaciones comunales identificadas en Huatacondo están las siguientes:

- Junta de vecinos.
- Centro de madres.
- Comité de dueñas de casa emprendedoras.
- Escuela.
- Centro de padres y apoderados.
- Comité de agua.
- Comité de luz.
- Comité de reconstrucción.
- Asociaciones de bailes religiosos.

- Comunidad católica.
- Comunidad Indígena.
- Transporte.

Además, la comunidad cuenta con la presencia permanente de un funcionario médico, con especialidad de paramédico, para el soporte en salud. Cuenta con un centro médico equipado, y se recibe periódicamente especialistas provenientes de Iquique.

Huatacondo experimenta la emigración juvenil debido a la falta de oportunidades laborales, y a la necesidad por continuar el proceso de educación, ya que la comunidad sólo cuenta con escuela. Al termino de la escuela se deben trasladar a una comunidad aledaña que cuente con educación secundaria.

Durante el año, la comunidad desarrolla una serie de fiestas y celebraciones que convocan a los antiguos residentes, y reúnen una cantidad de personas mayor al promedio. La población temporal oscila entre 200 a 400 personas, con duración no mayor a una semana. La tabla siguiente muestra las principales festividades que se celebran. Las dos principales actividades del año son la Fiesta de la Asunción de la Virgen, que convoca unas 400 personas, y la Fiesta de Las Cruces con 200 personas, en promedio.

Mes	Celebración
Febrero	*Carnaval*
Marzo-Abril	*Semana Santa*
Mayo	*Las Cruces y 21 Mayo*
Julio	*La Tirana*
Agosto	*Asunción de la Virgen*
Septiembre	*Fiestas Patrias*
Diciembre	*Navidad y Año Nuevo*

Tabla C.1: Festividades anuales en Huatacondo

Fuente: Propia

En la zona donde se emplaza el pueblo de Huatacondo se da un fenómeno natural conocido como el Invierno Boliviano, que es la época de mayor pluviosidad en la región central de los Andes. El término no es correcto, ya que el fenómeno se da mayormente entre

los meses de diciembre y marzo, lo que corresponde al verano austral. A pesar de esta consideración, durante el fenómeno la comunidad se ve sometida a fuertes lluvias, durante largos periodos, que aunado con lo quebrado del terreno, puede provocar daños severos, dependiendo del año, ya que la magnitud de dicho fenómeno cambia periódicamente.

C.3 Características de la microrred

En la microrred ESUSCON operan los siguientes elementos de generación y almacenamiento de electricidad, emplazados de forma distribuida dentro de la zona [41]:

- Planta fotovoltaica principal de 22.68 kW, divida en 6 paneles idénticos, con 3 convertidores electrónicos, uno por fase.
- Turbina eólica de 3 kW.
- Grupo de generación Diesel de 120 kVA, trifásico, 380V.
- Sistema de almacenamiento de energía tipo Plomo-Ácido de 30 kVA.

Además, la microrred incluye los siguientes elementos:

- Sistema SCADA: para gestionar las unidades de generación y almacenamiento se implementó un sistema SCADA que permite el control y monitoreo de todos los elementos distribuidos del sistema eléctrico. La Figura C.2 muestra los componentes del sistema.

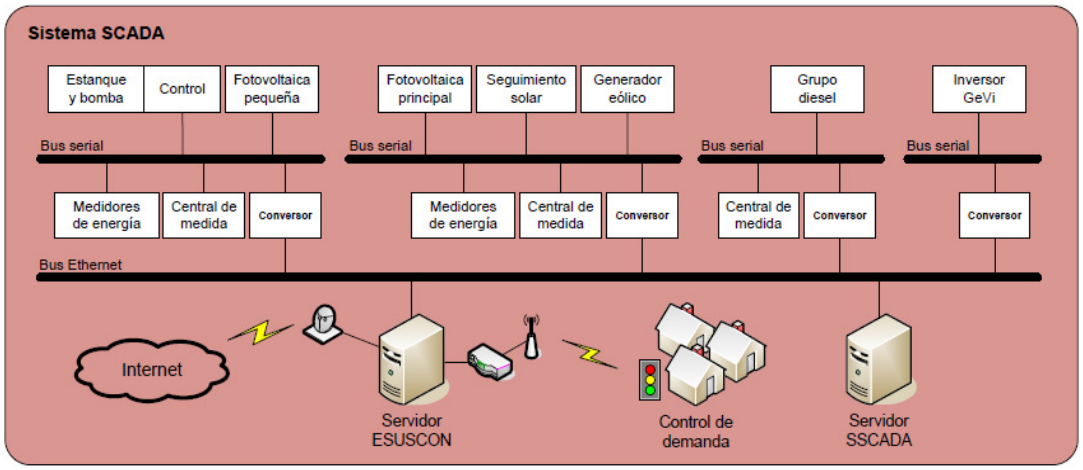
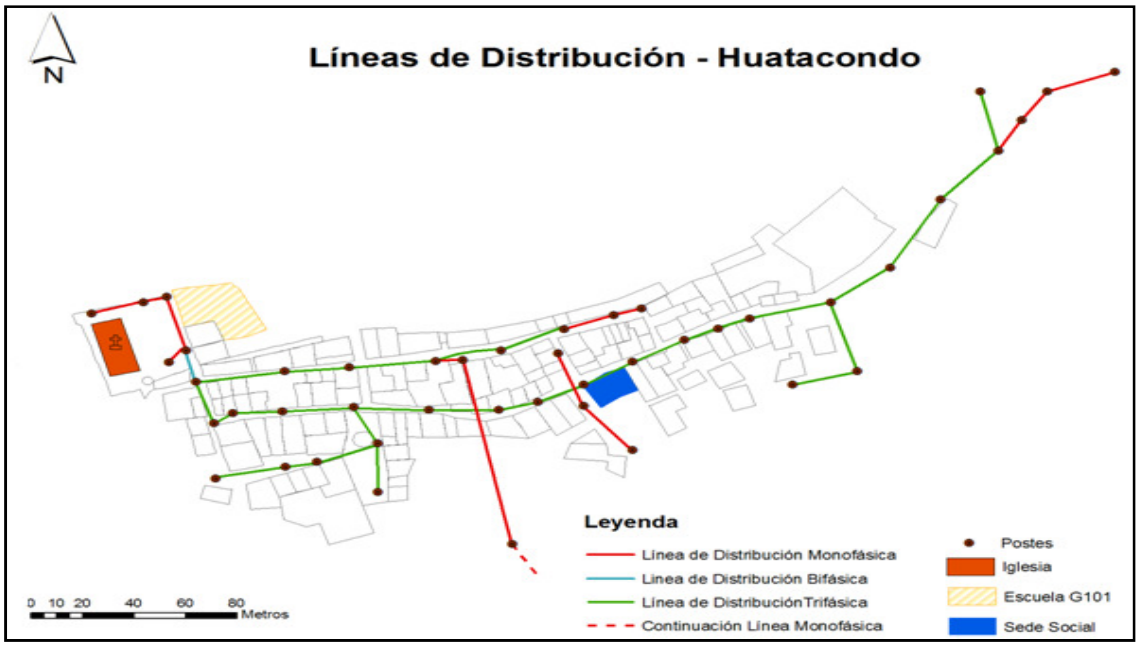


Figura C.2: Sistema SCADA sistema ESUSCON

Fuente: [56]

- Sistema de gestión de energía (EMS): para la operación automatizada de la microrred se utiliza un sistema de gestión de energía centralizado. A partir de los resultados obtenidos por el EMS, se genera un perfil de utilización de la energía para los habitantes del pueblo.
- Social SCADA: es una herramienta computacional ubicada en la sede de la Junta Vecinal, desarrollada para entregar información a la comunidad y partes interesadas, en tiempo real e histórica sobre la operación la microrred. Además se apoya la toma de decisiones, y la gestión del mantenimiento.
- Red de distribución: red compuesta por zonas trifásica, monofásica y bifásica, tipo radial, 380V tensión nominal, 50Hz frecuencia nominal, con postes de madera y hormigón armado, con luminarias distribuidas. Ver Figura C.3.



FiguraC.3: Red de Distribución sistema ESUSCON

Fuente: [41]

C.4 Desarrollo del proyecto

Entre los meses de noviembre 2009 y febrero 2010 un grupo multidisciplinario del Centro de Energía desarrolló la primera etapa del proyecto, compuesta por actividades tendientes a establecer las bases y diseño del proyecto, para luego pasar a la fase constructiva.

El grupo estaba compuesto por: ingenieros eléctricos y geofísicos como equipo técnico; y por geógrafos, diseñadores y expertos en recursos naturales y sustentabilidad como equipo facilitador [1]. El sistema entra en operación en diciembre 2010, entregando electricidad 24 horas al día.

La Figura C.4 muestra los principales hitos alcanzados en la primera etapa del proyecto.

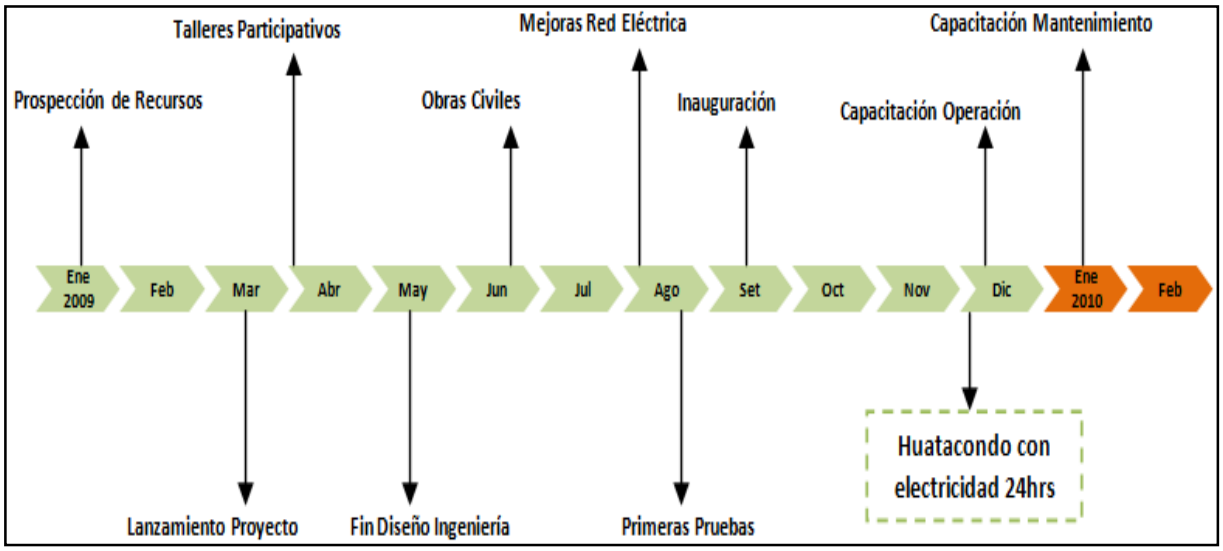


Figura C.4: Desarrollo del proyecto entre Ene 2009 a Feb. 2010

Fuente: [42]

Anexo D: Estimación población diaria de Huatacondo

Según la revisión de dos informes realizados por el Centro Energía [40],[42], y dos Memorias de título [54],[57], se llega a la siguiente estimación de población promedio diario en la comunidad de Huatacondo.

Mes-Año	Población Calculada Promedio	Casas Habitadas Promedio (Casa/día	Criterio de Cálculo	Criterio Utilizado: Aumento 10%/Año Fiestas
ene-11	60	22	Baja 20% por Invierno Boliviano	60
feb-11	70	26	Por 3 días x 2 (por Carnaval) - Resto baja 20% por Invierno Boliviano	70
mar-11	75	28	Mes normal	75
abr-11	85	32	Por 4 días x 2 (Semana Santa) - Resto del mes normal	85
may-11	87	33	Por 3 días hay 200 personas (Cruces) - Resto del mes normal	87
jun-11	75	28	Mes normal	75
jul-11	82	31	Por 3 días x 2 (Tirana) - Resto del mes normal	82
ago-11	138	51	Por 6 días hay 400 personas (Asunción) - Resto del mes normal	138
sep-11	88	33	Por 5 días x 2 (F. Patrias) - Resto del mes normal	88
oct-11	75	28	Mes normal	75
nov-11	75	28	Mes normal	75
dic-11	87	33	Por 5 días x 2 (Navidad - Fin Año) - Resto mes normal	87
ene-12	59	23	Baja 20% por Invierno Boliviano	59
feb-12	69	27	Por 3 días x 2 (por Carnaval) - Resto baja 20% por Invierno Boliviano	70
mar-12	74	29	Mes normal	74
abr-12	84	33	Por 4 días x 2 (Semana Santa) - Resto del mes normal	86
may-12	86	34	Por 3 días hay 200 personas (Cruces) - Resto del mes normal	88
jun-12	74	29	Mes normal	74
jul-12	81	32	Por 3 días x 2 (Tirana) - Resto del mes normal	83
ago-12	137	54	Por 6 días hay 400 personas (Asunción) - Resto del mes normal	145
sep-12	86	34	Por 5 días x 2 (F. Patrias) - Resto del mes normal	89
oct-12	74	29	Mes normal	74
nov-12	74	29	Mes normal	74
dic-12	86	34	Por 5 días x 2 (Navidad - Fin Año) - Resto mes normal	88
ene-13	59	23	Baja 20% por Invierno Boliviano	59
feb-13	69	27	Por 3 días x 2 (por Carnaval) - Resto baja 20% por Invierno Boliviano	79
mar-13	74	29	Mes normal	74
abr-13	84	33	Por 4 días x 2 (Semana Santa) - Resto del mes normal	88
may-13	86	34	Por 3 días hay 200 personas (Cruces) - Resto del mes normal	90
jun-13	74	29	Mes normal	74
jul-13	81	32	Por 3 días x 2 (Tirana) - Resto del mes normal	84
ago-13	137	54	Por 6 días hay 400 personas (Asunción) - Resto del mes normal	153
sep-13	86	34	Por 5 días x 2 (F. Patrias) - Resto del mes normal	91

Figura D.1: Estimación de población diaria años 2011, 2012 y 2013

Fuente: Propia

Anexo E: Consumo energía, consumo de Diesel y emisiones CO2

Se presentan los indicadores: Consumo de Energía, Consumo Estimado Diesel y Emisiones Estimadas de CO2 por generador Diesel, en el periodo enero 2011 a setiembre 2013.

En el cálculo de consumo Diesel se usaron datos del fabricante del grupo electrógeno sobre consumo a carga media, esto es: 0.27 L/kWh. Para las emisiones de CO2 se usó como referencia: 2.61 kg CO2 [58].

Las Figuras E.1, E.2 y E.3 muestran los indicadores.

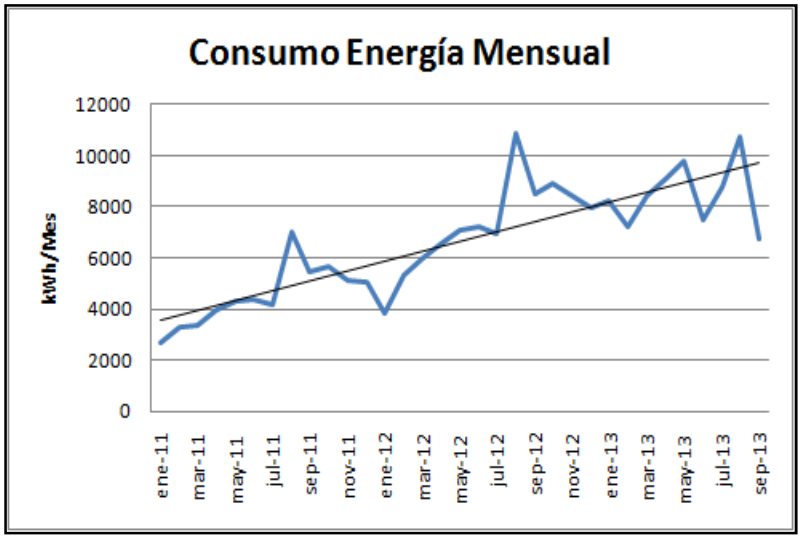


Figura E.1: Consumo Energía Mensual - periodo Ene 2010 a Ago. 2013

Fuente: Propia

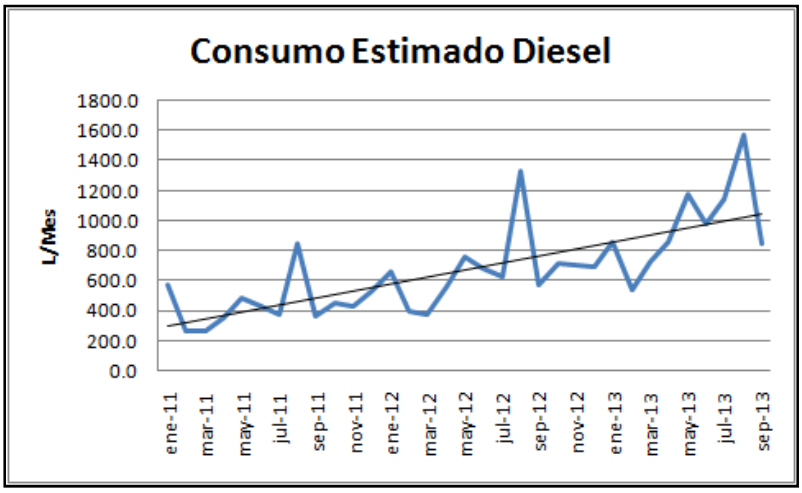


Figura E.2: Consumo Diesel para generación - periodo Ene 2010 a Ago. 2013

Fuente: Propia

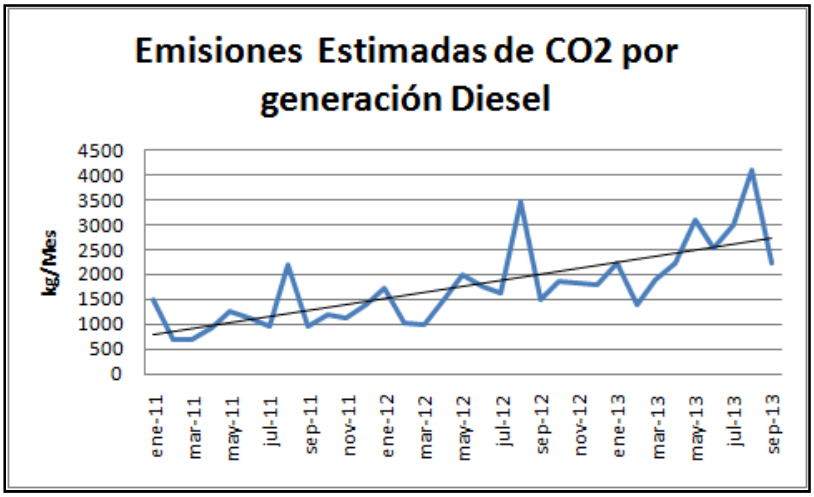


Figura E.3: Emisiones de CO2 por generación Diesel - periodo Ene 2010 a Ago. 2013

Fuente: Propia

Anexo F: Análisis de correlaciones entre indicadores

El coeficiente de correlación analiza dos series de datos para determinar la relación entre ambas. Si R es el coeficiente de correlación de dos series de datos X e Y, el valor de R se analiza de la siguiente manera [59]:

- Si R = 1, existe una correlación positiva perfecta entre X e Y.
- Si R = -1, existe una correlación negativa perfecta entre X e Y.
- Si R = 0, no existe correlación lineal, pudiendo existir otro tipo de relación.
- Si $-1 < R < 0$, existe correlación negativa y dependencia inversa, mayor cuanto más se aproxime a - 1.
- Si $0 < R < 1$, existe correlación positiva, y dependencia directa, mayor cuanto más se aproxime a 1.

La siguiente es la expresión para el cálculo del coeficiente de correlación, donde $\bar{x}$ e $\bar{y}$ son los promedios de las series de datos X e Y, respectivamente:

$$R(\mathrm{X},\mathrm{Y}) = \frac{\sum (x-\bar{x})(y-\bar{y})}{\sqrt{\sum (x-\bar{x})^2 \sum (y-\bar{y})^2}} \qquad \text{(F.1)}$$

Las series de datos de los indicadores se analizan uno a uno, para encontrar los coeficientes de correlación, los datos se resumen en la Tabla F.1.

	Emisiones CO2 totales	*Emisiones CO2 per cápita*	*Consumo Diesel*	*Consumo Energía*	*Producción con ER*	*Desviación Tensión*	*Desviación Frecuencia*	*Factor Planta PV*
Emisiones CO2 totales	1							
Emisiones CO2 per cápita	1	1						
Consumo Diesel	1	0.80	1					
Consumo Energía	0.82	0.65	0.82	1				
Producción con ER	-0.47	-0.52	-0.47	0.06	1			
Desviación Tensión	0.60	0.62	0.60	0.38	-0.35	1		
Desviación Frecuencia	0.38	0.16	0.38	0.26	-0.18	0.22	1	
Factor Planta PV	-0.06	-0.32	-0.06	0.35	0.68	-0.31	-0.02	1

Figura F.1: Coeficientes de correlación entre indicadores para el caso de estudio

Fuente: Propia

Anexo G: Teoría de microrredes

A continuación se presentan temas sobre microrredes. En primer lugar se explican los modos de operación de:

G.1 Modo interconectada

En el modo interconectada, el EMS establece los puntos de ajuste de la potencia activa y de tensión de los recursos de generación, que son ejecutados por los controladores locales de los generadores. Esto hace que la microrred aparezca para la red eléctrica como una carga controlable, operando con factor de potencia 1. De esta forma, el EMS no ejecuta control adicional de tensión que podría interferir con la función que realiza los reguladores de tensión y capacitores shunt de la compañía eléctrica o con los controles de otros recursos distribuidos dentro de la microrred. Por ejemplo, cuando el alimentador de distribución de la microrred baja la carga y se produce un aumento de tensión, éste es controlado por los controladores de la red eléctrica. Sin embargo, el EMS define el control de tensión de los recursos de generación sólo en ciertos circuitos críticos de las microrred [60].

G.2 Modo aislada

En modo aislada, el EMS mantiene la función de entregar los puntos de ajustes de potencia activa y tensión a los controladores locales de cada recurso de generación. En cuanto a la frecuencia y flujo de potencia reactiva, son los controladores locales de cada recurso de generación quienes autónomamente trabajan por medio de curvas P-f y Q-V. El EMS no comunica ningún comando para control de ángulo de fase o frecuencias a los controladores locales de cada recurso de generación. Pero éste continuamente monitorea la frecuencia de la microrred para implementar esquemas de distribución de carga por medio de los controladores locales de cada recurso de generación, en caso que la frecuencia no se re establezca en el tiempo establecido para asegurar la estabilidad. El objetivo de estas funciones es responder rápidamente para obtener un balance carga-generación tan rápido como sea posible [60]. Esto

porque en condición aislada, la microrred no es tan estable como la operación interconectada, en términos de capacidad de generación.

G.3 Control de microrredes

El término microrred se ha utilizado para describir sistemas de bajo voltaje con capacidades de red inteligente y posibilidad de operación en modo aislada. Sin embargo, se puede ampliar la definición a: parte de una red de distribución inteligente con capacidades de operación en modo aislada. Esto significa la existencia de un sistema de manejo de la microrred, controlando el sistema de distribución con las unidades de generación distribuida [61]. Este sistema será el responsable de la operación económica y técnica global de la microrred, tomando en cuenta las condiciones de frontera tanto en operación interconectada, como en aislada. Uno de los retos cruciales a resolver tiene que ver con las protecciones, las cuales están fuertemente ligadas a los temas de control y operación. Por ejemplo, las protecciones convencionales están diseñadas para operar con altas corrientes de falla en los sistemas radiales conectados a la red eléctrica; pero en operación aislada, estas altas corrientes provenientes de la red eléctrica no están presentes. Además, la mayoría de unidades de generación distribuida serán conectadas por medio de interfaces tipo convertidor, con limitadas corrientes de falla. Lo anterior impone la necesidad de rediseñar nuevos métodos de protección, los cuales deben tomar en cuenta también las escogencias hechas en el campo del control y operación de la microrred.

El tema del control impone retos que resolver, que tienen que ver con el paso de un sistema eléctrico de potencia actual centralizado, a uno descentralizado que asegure que los niveles presentes de confiabilidad no se reduzcan, y que los potenciales beneficios se maximicen. Además, la definición de la estructura jerárquica de control establecerá la robustez de la microrred, tanto en operación interconectada como en aislada, al existir técnicas de transferencia entre ambos modos de operación de rápida respuesta.

G.4 Controlador recurso distribuido

Los recursos distribuidos, sean éstos micro generadores o dispositivos almacenadores, son equipados con un controlador que ejecuta la operación del recurso para alcanzar los requerimientos de los consumidores y las empresas eléctricas. El tiempo de respuesta de los

controladores es del orden de microsegundos y usa información local para ejecutar el control durante todos los eventos. En este nivel las comunicaciones no son necesarias. Cada controlador es capaz de responder ante cambios de carga en una manera predeterminada, sin que medie comunicación con otras fuentes o elementos del sistema eléctrico [62]. Las funcionalidades del controlador dependen grandemente de las interfaces de electrónica de potencia disponibles, entre otras cosas se busca que [62],[60]:

- Posibilitar las capacidades de tipo plug and play, lo que implica que el recurso distribuido puede ser adicionado a la microrred sin cambios en las unidades de control y protección que son parte del sistema.
- La microrred se puede conectar/desconectar en si misma de/desde la red eléctrica de manera transparente y segura.
- La potencia activa y reactiva pueda ser controlada independientemente.
- las Perturbaciones en la tensión sean corregidas.
- Las fallas sean manipuladas sin la pérdida de estabilidad.
- La microrred pueda alcanzar los requerimientos de dinámica de carga impuestas por la compañía eléctrica.

Las variables fundamentales para controlar la operación de la microrred son: tensión, frecuencia, potencia activa y reactiva. En el modo de operación interconectada, la microrred toma la referencia de tensión y frecuencia de la red eléctrica. Es así como el control de la microrred opera para ajustar la generación de potencia activa y reactiva generada y demandada. En modo aislada, la microrred opera como una entidad independiente [3]. A continuación se detallan cada una de los controles realizados por la microrred.

G.5 Elementos almacenadores de energía

En modo aislada, la microrred tiene problemas de seguimiento de la demanda ya que las unidades de generación se caracterizan por una lenta respuesta y son de baja inercia, lo que no. No así en operación interconectada, donde el balance inicial de potencia durante la conexión de nueva carga es soportada por la inercia de la red eléctrica. Para solventar esta

debilidad se requiere incluir alguna forma de almacenamiento de energía, para asegurar el balance, lo cual se logra gracias a las funciones del controlador del recurso distribuido [62].

Estos elementos pueden reducir las pérdidas y contribuir con la confiabilidad, así como mejorar la estabilidad dinámica, estabilidad transitoria, el soporte de tensión, y la regulación de frecuencia. Además, son claves en la integración de recursos de energía intermitentes.

Algunas formas tradicionales de almacenamiento son: baterías, súper capacitores, volantes inerciales. Se plantean nuevas maneras como: sistemas de almacenamiento por aire comprimido, almacenamiento térmico, bombeo de agua, almacenamiento magnético con superconductores y vehículos a la red eléctrica [3].

G.6 Norma IEEE 1547

Como parte de un esfuerzo por guiar la interconexión de recurso de energía distribuido, el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos IEEE (del inglés Institute of Electrical and Electronics Engineers) desarrolló una serie de normas conocido como el IEEE 1547, impulsado por el Comité 21 (Standards Coordinating Committee 21 on Fuel Cells, Photovoltaics, Dispersed Generation, and Energy Storage), el cual fue publicado en 2003, y revisado en 2008. Cabe destacar que la normativa se desarrollo para el mercado eléctrico de EE.UU., por lo que la frecuencia se define en 60Hz [35],[63].

En dicha normativa se establecen exigencias y criterios que deberá cumplir el lugar conocido como punto de conexión común PCC, y aplican a todos los recursos distribuidos que se encuentren dentro de la red eléctrica. Además, son una guía para el monitoreo, intercambio de información y control de los recursos distribuidos interconectados con los sistemas eléctricos de potencia y busca facilitar la interoperabilidad e implementación del monitoreo, intercambio de información y control MIC (en inglés Monitoring Interchange and Control) para proveer soporte a la operación técnica y financiera de un recurso distribuido [64]. La normativa se ocupa en especial del MIC entre el controlador de la unidad de recurso distribuido y el mundo exterior. Dentro de sus planteamientos están:

- Conceptos y metodologías para los fabricantes de equipo, así como para los desarrolladores de sistemas de comunicación.

- Gestión de energía.
- Plataformas SCADA.
- Equipamiento de protección y medida de los sistemas eléctricos.
- Identifica a los distintos participantes del sistema, denominados en inglés stakeholders, cuyas necesidades de MIC varían dependiendo del tipo, tamaño, ubicación y propiedad del RD.

La Figura G.1 muestra el contexto en el cual aplica el estándar, enfatizando los lineamientos relevantes del MIC para la interconexión de recurso distribuido.

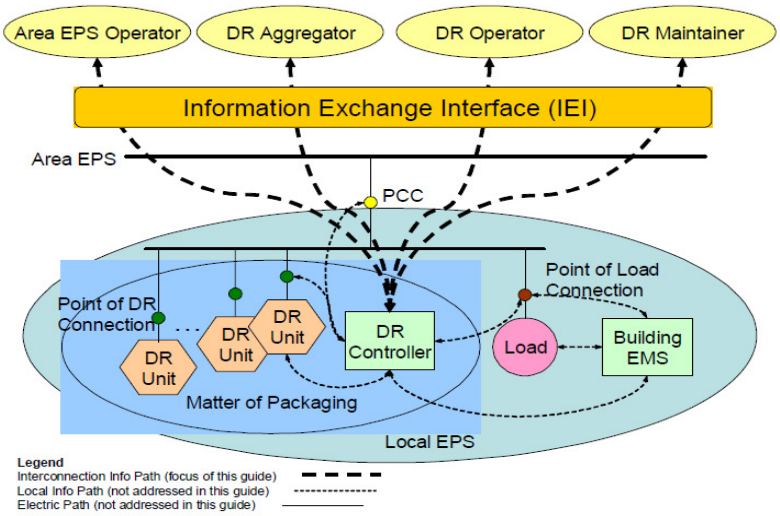


Figura G.1: Elementos participantes en Microrredes

Fuente: IEEE Std 1547.3™-2007[64]

A continuación se detalla cada componente de la Figura G.1:

- Los óvalos superiores representan a los stakeholders o partes interesadas, que intercambian información con las unidades de RD, en relación a su interconexión con el Área SEP.
- Los hexágonos representan a las unidades de recurso distribuido, las cuales pueden ser una o varias, pero debe existir al menos un controlador que ejecute las funciones de monitoreo y control sobre el recurso distribuido. El controlador

cumple además la función de establecer comunicación con los stakeholders y elementos locales.

- La carga es representada por círculos. Un sistema de gestión de energía EMS optimiza su operación. El EMS se representa con un rectángulo y comprende los componentes necesarios para gestionar la energía en conjunto con el controlador de unidades.
- Las líneas continuas representan conexiones eléctricas y las segmentadas canales de comunicación. Para diferencias los canales de comunicación se subdividen en información local (línea delgada) e información de interconexión (línea gruesa). Por medio del canal local se monitorea y controla parámetros internos y el punto de conexión.

G.6.1 Relaciones en nivel Local SEP

La relación entre participantes en el nivel del Local SEP tiene que ver con el monitoreo y control de parámetros internos de las unidades de recurso distribuido, así como el manejo del punto de conexión.

La norma IEEE 1547.3-2007 da un especial énfasis en la relaciones entre los distintos participantes o stakeholders, direccionando gran parte del intercambio de información y requerimientos de control. Define claramente roles de cada participante. Ver Figura G.2.

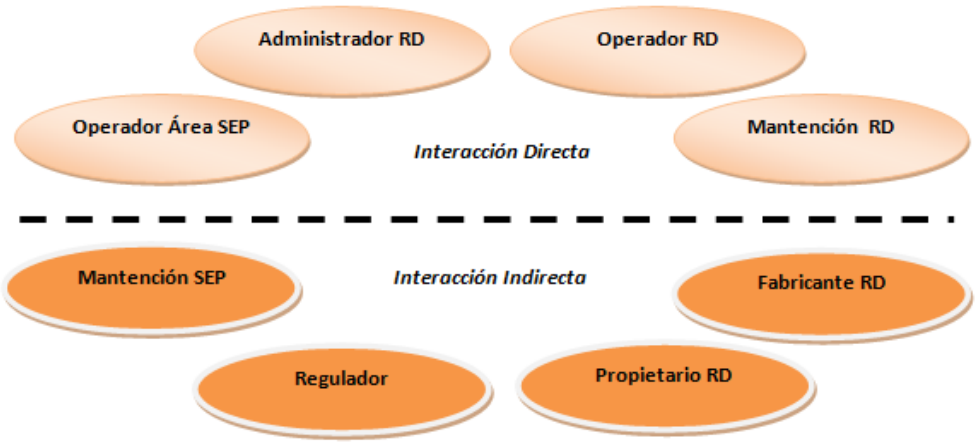


Figura G.2: Relaciones entre stakeholders en Microrredes

Fuente: IEEE Std 1547.3™-2007[64]

Los participantes se dividen en dos grupos, separados por la línea segmentada, a saber: aquellos que pueden tener comunicación directa con las unidades de recurso distribuido, de manera que puedan interactuar en cuanto a la interconexión con el Área SEP; y los que tienen relaciones indirectas gracias a visualizar información por medio de otros.

G.7 Análisis de confiabilidad en microrredes

El análisis de confiabilidad en microrredes se realiza por los siguientes objetivos [65]:

- Identificar zonas débiles de la red que necesitan reforzamiento o modificaciones.
- Establecer tendencias cronológicas en el desempeño de la confiabilidad.
- Establecer valores aceptables para los índices de confiabilidad que sirvan de guía para futuras evaluaciones.
- Comparar las predicciones previas con los valores actuales.
- Monitorear la respuesta a los cambios en el diseño del sistema.

El objetivo de evaluar la confiabilidad de un sistema es obtener, a partir de sus datos históricos de tasas de falla y tiempos de restauración, una serie de índices que cuantifiquen la confiabilidad. Se requiere una comprensión completa del sistema que derive en un modelo, para luego aplicar la técnica de evaluación. Ambos, la técnica y el modelo deben reflejar y responder al modo en que el sistema opera y falla. Por lo tanto, los pasos básicos son los siguientes [65]:

- Comprender modo operación de componentes y el sistema.
- Identificar los modos de falla que pueden ocurrir.
- Deducir las consecuencias de las fallas.
- Derivar modelos para representar estas características.
- Seleccionar la técnica de evaluación.

G.7.1 Índices de desempeño y objetivos

La inclusión de microrredes dentro de la red eléctrica requiere de una evaluación de su impacto en la confiabilidad. En general, el análisis se muestra en la Figura G.3, y es desarrollado en [36].

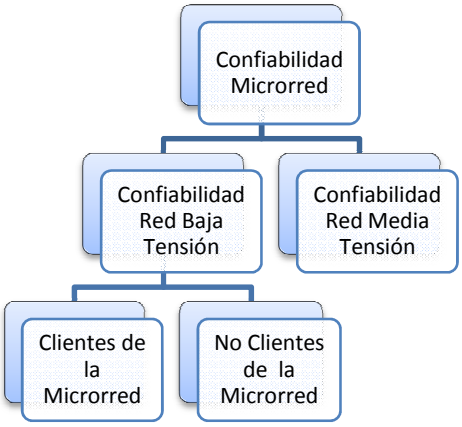


Figura G.3: Análisis de confiabilidad en Microrredes

Fuente: [36]

Se separa el análisis en la red de baja tensión y media tensión, además se separan las cargas que se alimentan de la microrred y las que no.

El tipo de fuente de energía es fundamental en la confiabilidad. Por ejemplo, unidades no intermitentes y elementos de almacenamiento son más fácil de representar, ya que la energía se considera siempre disponible en los estudios, sólo se consideran fallas nos programadas. Por otro lado, las unidades basadas en fuentes intermitentes y no almacenadoras, tales como viento y solar, requieren un modelo más complejo en los estudios de confiabilidad, donde la energía disponible también debe ser representada en el modelo. La indisponibilidad de las unidades puede ser por indisponibilidad de energía, falla de la unidad, o insuficiente nivel de energía. Estos estudios requieren normalmente un análisis en series de tiempo de mediciones en la entrada de energía (Velocidad de viento, radiación solar, otros). Luego, la disponibilidad de generación de las unidades de recurso distribuido debe ser modelada combinando modelos de disponibilidad y de indisponibilidad de unidades.

Índices de confiabilidad utilizados en microrredes son [38]:

- SAIDI (del inglés System Average Interruption Duration Index): Tiempo total promedio de interrupción por cliente, por año, en h/año-cliente.
- SAIFI (del inglés System Average Interruption Frequency Index): Frecuencia media de interrupciones por cliente, por año, en interrupciones/año-cliente.
- ASAI (del inglés Average Service Availability Index): Disponibilidad promedio del sistema.
- ENS (del inglés Energy Not Supplied): Energía no servida al año, en kWh/año.
- AENS (del inglés Average Energy Not Supplied): Promedio total de energía no servida al año por cliente, kWh/año-cliente.

Anexo H: Prueba resiliencia para indicadores caso de estudio

	Emisiones CO2 Total	Cambio Patrón Consumo	Producción fuentes ER	Respuesta Tensión	Respuesta Frecuencia	FP Planta PV	Hogares c/ Electricida
DIVERSIDAD	4	2	4	2	2	4	3
¿El indicador refleja la diversidad existente en la microrred?	1	0	1	0	0	1	1
¿Muestra variable(s) de interés clave(s) para el sistema?	1	1	1	1	1	1	1
¿Es una medida de la existencia de múltiples partes y comportamientos dentro del sistema?	1	0	1	0	0	1	0
¿El indicador identifica al menos una parte del sistema?	1	1	1	1	1	1	1
ANTICIPACIÓN	4	3	4	1	1	2	1
¿El indicador tiene la capacidad de reflejar una mirada proactiva, más que reactiva?	1	1	1	0	0	0	0
¿El indicador muestra el efecto de planes de contingencia ante perturbaciones?	1	0	1	0	0	0	0
¿El indicador proporciona signos de alerta temprana de cambios de estado?	1	1	1	1	1	1	0
¿Identifica los atributos del sistema que determina posiciones límites?	1	1	1	0	0	1	1
EFICIENCIA	3	3	3	3	3	3	1
¿El indicador refleja el desempeño del sistema en el uso de recursos existentes?	1	0	1	1	1	1	1
¿El indicador ayuda a entender el comportamiento de las personas frente al uso de recursos?	0	1	0	0	0	0	0
¿Identifican el control y regulación en el uso de los recursos?	1	1	1	1	1	1	0
¿Muestra el aporte de una o más partes del sistema a la eficiencia en el uso de recursos?	1	1	1	1	1	1	0
COHESIÓN	2	0	2	2	2	2	3
¿El indicador muestra la cohesión existente dentro del sistema?	0	0	0	0	0	0	1
¿Ayuda a identificar conflictos y cómo evolucionan en el tiempo?	0	0	0	0	0	0	1
¿Se relaciona con las fuerzas o enlaces de unificación de las diferentes partes del sistema?	1	0	1	1	1	1	0
¿Permite evaluar la interacción entre distintas partes del sistema?	1	0	1	1	1	1	1
ADAPTACIÓN	3	3	3	2	2	3	2
¿El indicador es una medida de la capacidad adaptiva del sistema a lo largo del tiempo?	1	1	1	1	1	1	1
¿Identifica cambios de capital (Social, Humano, Financiero)?	1	1	0	0	0	0	1
¿Identifican cómo se modifican flujos de bienes y servicios luego de perturbaciones? Trayectorias	1	1	1	0	0	1	0
¿Muestra la flexibilidad de reacción que tiene el sistema frente a perturbaciones?	0	0	1	1	1	1	0
APRENDIZAJE	4	3	3	3	3	3	2
¿Identifica la eficacia de las partes interesadas en el aprendizaje sobre el uso/manejo de recursos?	1	1	1	1	1	1	0
¿Refleja la evolución de la transición frente a la tecnológia introducida?	1	1	1	0	0	0	1
¿Identifica algún conductor clave del sistema que promuevan la calidad de bienes y servicios entregados?	1	0	0	1	1	1	1
¿El indicador refleja la sensibilidad de variables a los controladores del sistema?	1	1	1	1	1	1	0
PUNTUACIÓN TOTAL OBTENIDA	**20**	**14**	**19**	**13**	**13**	**17**	**12**
EVITAR	**0.40**	**0.36**	**0.42**	**0.23**	**0.23**	**0.35**	**0.33**
SOPORTAR	**0.25**	**0.21**	**0.26**	**0.38**	**0.38**	**0.29**	**0.33**
RECUPERAR	**0.35**	**0.43**	**0.32**	**0.38**	**0.38**	**0.35**	**0.33**

Figura H.1: Resultado prueba de Resiliencia indicadores caso de estudio

Fuente: Propia

Anexo I: Tablas para cálculo de Índices de resiliencia caso de estudio

Tabla I.1: Cálculo Índices Resiliencia Año 2012

Dimensión	Indicadores	Peso Criterio				Indicador - Mes											
		EMAF	SCCMCSF	FCLFFPS	ene-12	feb-12	mar-12	abr-12	may-12	jun-12	jul-12	ago-12	sep-12	oct-12	nov-12	dic-12
Administración Ambiental	Consumo Energía	1,13	0,16	0,31	0,532	0,125	0,765	0,673	1,602	0,652	0,365	0,548	1,151	0,202	0,383	0,629
	Producción Fuentes ER (pu)															
Avance Tecnológico	Calidad Energía	1,13	0,38	0,38	-0,013	-0,015	-0,015	-0,003	-0,013	-0,015	-0,015	-0,013	-0,015	-0,015	-0,003	-0,013
	Desviación de Tensión (pu)															
	Desviación de Frecuencia (pu)	1,13	0,38	0,38	-0,013	-0,015	-0,015	-0,003	-0,013	-0,015	-0,015	-0,013	-0,015	-0,015	-0,003	-0,013
	Eficiencia	Factor Planta PV (pu)	1,15	0,19	0,38	0,160	0,177	0,206	0,201	1,135	0,124	0,201	0,289	1,111	0,297	0,478
Social	Capital Social	Empleos con electricidad (pu)	1,13	0,13	0,38	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
					INDICE ENTIAR	0,456	0,385	0,725	0,584	0,559	0,651	0,682	0,560	0,755	0,612	0,670
					INDICE SOPORTIAR	0,433	0,385	0,587	0,561	0,542	0,550	0,566	0,552	0,512	0,670	0,727
					INDICE RECUPERAR	0,455	0,514	0,650	0,508	0,596	0,663	0,608	0,558	0,570	0,727	0,595
					INDICE RESILIENCIA	0,451	0,325	0,651	0,518	0,554	0,635	0,617	0,569	0,578	0,670	0,664

Tabla I.2: Cálculo Índices Resiliencia Año 2013

			Peso Faceta			Indicador - Mes								
Dimensión	Indicadores		EVITAR	SOPORTAR	RECUPERAR	ene-13	feb-13	mar-13	abr-13	may-13	jun-13	jul-13	ago-13	sep-13
Administración Ambiental	Consumo Energía	Producción Fuentes ER (pu)	0.42	0.25	0.32	0.614	0.721	0.679	0.652	0.553	0.517	0.515	0.458	0.531
Avance Tecnológico	Calidad Energía	Desviación de Tensión (pu)	0.23	0.38	0.38	-0.003	-0.003	-0.003	-0.013	-0.032	-0.035	-0.050	-0.005	-0.025
		Desviación de Frecuencia (pu)	0.23	0.38	0.38	-0.003	-0.003	-0.003	-0.013	-0.016	-0.011	-0.003	-0.006	-0.016
	Eficiencia	Factor Planta PV (pu)	0.35	0.29	0.35	0.228	0.255	0.248	0.252	0.206	0.138	0.169	0.201	0.175
Social	Capital Social	Hogares con electricidad (pu)	0.33	0.33	0.33	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.975	1.000
					INDICE EVITAR	0.665	0.714	0.701	0.591	0.628	0.590	0.600	0.580	0.610
					INDICE SOPORTAR	0.552	0.582	0.575	0.559	0.531	0.493	0.502	0.490	0.510
					INDICE RECUPERAR	0.596	0.634	0.625	0.618	0.562	0.528	0.539	0.526	0.546
					INDICE RESILIENCIA	0.605	0.643	0.634	0.626	0.570	0.537	0.547	0.532	0.556