



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

**DISEÑO DE UNA METODOLOGÍA PARA GENERACIÓN DE BENCHMARK  
DE MICRO-REDES AISLADAS Y SU APLICACIÓN A LA RED ESUSCON**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO

OSCAR DELFÍN DÖRNER GALLARDO

PROFESOR GUÍA:  
PATRICIO ANDRÉS MENDOZA ARAYA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
FRANCISCO JAVIER RIVERA SERRANO  
OSCAR FERNANDO NÚÑEZ MATA

SANTIAGO DE CHILE

2022

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO  
POR: OSCAR DELFÍN DÖRNER GALLARDO  
FECHA: 2022  
PROF. GUÍA: PATRICIO ANDRÉS MENDOZA ARAYA

## DISEÑO DE UNA METODOLOGÍA PARA GENERACIÓN DE BENCHMARK DE MICRO-REDES AISLADAS Y SU APLICACIÓN A LA RED ESUSCON

La incorporación de micro-redes al sistema eléctrico ha traído consigo diversos efectos positivos, como la electrificación de zonas aisladas e importantes mejoras a la redes tradicionales. Estos beneficios se deben en gran parte a la combinación de tecnologías de la comunicación junto a nuevas fuentes de generación eléctrica, como lo son los sistemas SCADA y las fuentes de generación distribuidas respectivamente.

Las nuevas dinámicas que traen consigo la operación de micro-redes son muchas veces probadas en redes *benchmark*, las que permiten, mediante simulaciones de sistemas de potencia con parámetros conocidos, la validación de distintos estudios. Existen diversas micro-redes *benchmark* publicadas en la actualidad, las que son confeccionadas para llevar a cabo estudios de distintos propósitos por sus autores. Estas diferenciaciones traen consigo problemáticas para la comparación de estos estudios, pues la validación de estos puede verse afectada por la elección del *benchmark* utilizado. Una de las causas que puede generar estas diferencias, es la metodología en la confección de los *benchmark* existentes, puesto que la manera en que estas redes se generan resulta distinta para cada uno de sus autores.

Para contribuir a esta problemática, esta memoria propone una novedosa metodología para generar micro-redes *benchmark* del tipo aislada, con el propósito de que la elaboración de este tipo de *benchmark* cuente con una metodología robusta. Para evaluar y ejemplificar el uso de esta nueva metodología, los datos de operación de la micro-red aislada ESUSCON ubicada en Huatacondo, Chile, son utilizados para la generación de una micro-red *benchmark* del tipo aislada con la metodología diseñada. El *benchmark* es publicado en un repositorio de acceso público.

Posteriormente es realizada una validación de la micro-red generada, por lo que se lleva a cabo un caso de estudio donde se simula la operación de la red para el corto y largo plazo, donde se compara la operación real de la micro-red con respecto a la operación simulada con los datos del *benchmark*, donde se obtienen similitudes entre la operación real y la simulación EMS. Los resultados son satisfactorios para la validación realizada, donde las diferencias entre ambos escenarios son ínfimas para el caso de largo plazo y, en menor medida, para el corto plazo. Para el corto y largo plazo se debe tener en consideración la existencia de fechas donde no hay una verificación de la operación del EMS en la operación real, por lo que los resultados en el largo plazo no corresponden a una completa operación bajo EMS.

*A todas aquellas personas  
que me crucé en el camino.*

# Agradecimientos

Me gustaría agradecer en primera instancia, al gran esfuerzo y trabajo que Jimena, mi madre, ha hecho para que yo pueda estar aquí hoy en día. También quiero agradecer a mi hermano Christian, por todo lo que hemos vivido y por poder contar con un gran confidente cuando lo he necesitado, además de deleitarme siempre con su talento en la música. A mi hermana Camila, que fue un gran apoyo cuando cambié mi vida en Puerto Montt por el agitado Santiago, y lo sigue siendo hasta el día de hoy. Ellos han sido el pilar fundamental de mi formación académica y personal, por ello, les estoy enormemente agradecido.

También le agradezco enormemente, a todo el apoyo y cariño que me da el resto de mi familia. Que sin sus mensajes cariñosos y visitas, mi paso por la universidad no habría sido el mismo. Me siento muy afortunado por tenerlos en mi vida. Además, quiero darle las gracias a los grandes amigos que me hice en la universidad, muchas gracias por compartir tantas experiencias y conocimientos conmigo.

Finalmente, quería darle las gracias a todas las personas que fueron parte de mi crecimiento, mis profesores del Liceo de Hombres Manuel Montt, junto a los grandes amigos que allí hice, a los que les guardo un enorme cariño hasta el día de hoy.



# Tabla de Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación . . . . .	1
1.2. Objetivos . . . . .	2
1.2.1. Objetivo general . . . . .	2
1.2.2. Objetivos específicos . . . . .	2
1.3. Experiencia en micro-red ESUSCON . . . . .	3
1.4. Estructura de la memoria . . . . .	5
1.5. Contribuciones de la memoria . . . . .	7
<b>2. Micro-redes <i>benchmark</i></b>	<b>8</b>
2.1. Micro-red . . . . .	8
2.2. Generación distribuida . . . . .	10
2.2.1. Componentes de una micro-red . . . . .	11
2.2.1.1. Unidad de generación . . . . .	11
2.2.1.2. Sistema de almacenamiento . . . . .	12
2.2.1.3. Unidad de control . . . . .	12
2.3. Micro-red <i>benchmark</i> . . . . .	13
2.3.1. Métodos para la obtención de datos . . . . .	14
2.4. Micro-redes <i>benchmark</i> existentes . . . . .	15
2.4.1. <i>Benchmark</i> para redes de distribución en bajo voltaje diseñada por CIGRE . . . . .	15
2.4.2. <i>Benchmark</i> de múltiples micro-redes interconectadas . . . . .	18
2.4.3. Campus BCIT Burnaby, Canadá . . . . .	20
2.5. Metodología para la creación de un <i>benchmark</i> en sistemas de potencia. . . . .	22
2.5.1. Comparación con metodología para <i>benchmark</i> de micro-redes . . . . .	24
<b>3. Diseño de una metodología para la generación de redes <i>benchmark</i> de micro-redes aisladas</b>	<b>26</b>
3.1. Metodología propuesta . . . . .	26
3.1.1. Caracterización de la micro-red . . . . .	28
3.1.2. Obtención de datos . . . . .	29
3.1.3. Evaluación y generación de una micro-red <i>benchmark</i> . . . . .	30
3.2. Discusión . . . . .	31
<b>4. Aplicación de la metodología a la micro-red ESUSCON</b>	<b>32</b>
4.1. Caracterización de la micro-red <i>benchmark</i> a generar . . . . .	32
4.1.1. Modo de operación de la micro-red <i>benchmark</i> . . . . .	32
4.1.2. Marco técnico en el que se rige la micro-red <i>benchmark</i> . . . . .	32

4.1.3.	Motivación en el diseño de la micro-red <i>benchmark</i> . . . . .	33
4.1.4.	Perfil general de la micro-red <i>benchmark</i> . . . . .	33
4.2.	Obtención de datos necesarios para generación de la micro-red <i>benchmark</i> . . . . .	35
4.2.1.	Formulación de objetivos . . . . .	35
4.2.2.	Topología de la micro-red . . . . .	36
4.2.3.	Perfiles de demanda . . . . .	37
4.2.4.	Cargas dentro de la red . . . . .	39
4.2.5.	Unidades de generación y almacenamiento en la red . . . . .	40
4.2.6.	Perfiles de generación . . . . .	40
4.2.7.	Parámetros de las líneas de distribución . . . . .	42
4.2.8.	Eventos de falla y/o alteraciones . . . . .	42
4.3.	Evaluación y generación de la micro-red <i>benchmark</i> ESUSCON. . . . .	44
4.3.1.	Análisis de datos obtenidos . . . . .	44
4.3.2.	Generación de la red con la selección de los datos . . . . .	45
4.3.3.	Evaluación de los datos . . . . .	46
4.3.3.1.	Complejidad . . . . .	46
4.3.3.2.	Aplicabilidad . . . . .	47
4.3.3.3.	Comparabilidad . . . . .	48
4.4.	Discusión sobre el <i>benchmark</i> generado . . . . .	49
<b>5.</b>	<b>Caso de estudio: EMS de Huatacondo</b> . . . . .	<b>50</b>
5.1.	EMS utilizado en Huatacondo y adaptación para simulación . . . . .	50
5.1.1.	Función objetivo . . . . .	53
5.1.2.	Modelo de la unidad térmica . . . . .	54
5.1.3.	Modelo del banco de baterías . . . . .	56
5.1.3.1.	Restricciones de energía y potencia . . . . .	56
5.1.3.2.	Restricciones de potencia máxima de carga . . . . .	57
5.1.3.3.	Restricciones de modelo de envejecimiento cíclico de Copetti . . . . .	58
5.1.4.	Modelo de la demanda . . . . .	59
5.2.	Incorporación del <i>benchmark</i> al EMS Huatacondo . . . . .	61
5.2.1.	Datos de demanda y generación solar . . . . .	61
5.3.	Resultados de la implementación . . . . .	63
5.3.1.	Implementación del EMS en el corto plazo . . . . .	63
5.3.2.	Implementación del EMS en el largo plazo . . . . .	67
5.4.	Resumen de resultados . . . . .	71
5.5.	Discusión de resultados . . . . .	71
<b>6.</b>	<b>Conclusiones</b> . . . . .	<b>73</b>
	<b>Bibliografía</b> . . . . .	<b>75</b>
	<b>ANEXOS</b> . . . . .	<b>79</b>
	<b>Anexo A. Figuras y Tablas complementarias</b> . . . . .	<b>80</b>
	<b>Anexo B. Procesos metodológicos complementarios</b> . . . . .	<b>89</b>
B.1.	Método de estimación de datos inexistentes . . . . .	89
B.1.1.	Criterio para elección de método de estimación de datos . . . . .	90

B.1.2. Estimación con método de <i>Look Up Tables</i> . . . . .	91
B.1.3. Estimación con método de replica de datos de semana anterior . . . . .	93
B.2. Ubicación de los datos medidos . . . . .	94
B.3. Distribución de cargas en la micro-red <i>benchmark</i> ESUSCON . . . . .	96
<b>Anexo C. Resultados complementarios al caso de estudio</b>	<b>98</b>
C.1. Comparativa de resultados bajo distintas tasas de refresco para iteraciones de EMS . . . . .	98
C.2. Fechas validadas donde opera el EMS en la micro-red ESUSCON . . . . .	99

# Índice de Tablas

1.1.	Parámetros de diseño en micro-red Huatacondo. . . . .	4
2.1.	Temas generales y posibles estudios a realizar sobre una micro-red <i>benchmark</i> . . . . .	13
2.2.	Demandas máximas en nodos en <i>benchmark</i> de red de distribución en bajo voltaje. Fuente: [8]. . . . .	17
2.3.	Recuento detallado de las micro-redes en el <i>benchmark</i> de múltiples micro-redes interconectadas. Fuente: [9]. . . . .	19
2.4.	Tipos de casos de uso en <i>benchmark</i> en sistemas de potencia. Fuente: [5]. . . . .	24
4.1.	Cantidad de tuplas y tamaños de los archivos de operación en red ESUSCON. . . . .	36
4.2.	Recuento de equipos en micro-red <i>benchmark</i> ESUSCON. . . . .	37
4.3.	Distribución de cargas y su participación en la demanda. . . . .	40
4.4.	Disposición de unidades generadoras en la micro-red <i>benchmark</i> ESUSCON. . . . .	40
4.5.	Almacenamiento disponible en la micro-red <i>benchmark</i> ESUSCON. . . . .	40
4.6.	Parámetros de líneas en la micro-red ESUSCON . . . . .	42
4.7.	Fallas ocurridas en Huatacondo. . . . .	42
4.8.	Eventos anuales celebrados en Huatacondo. . . . .	43
4.9.	Comparación de cantidad de muestras esperadas con las obtenidas. . . . .	46
4.10.	Comparación de las distintas características entre los <i>benchmark</i> analizados. . . . .	48
5.1.	Configuración para la simulación del EMS a corto plazo. . . . .	63
5.2.	Resumen de costos de operación a corto plazo (2 días). . . . .	64
5.3.	Resumen de energía inyectada para los escenarios en corto plazo. . . . .	65
5.4.	Configuración para simulación de EMS a largo plazo. . . . .	67
5.5.	Resumen de costos de operación en el largo plazo (6 meses). . . . .	67
5.6.	Resumen de energía inyectada para operación real y simulación EMS en el largo plazo. . . . .	69
5.7.	Resumen de diferencias porcentuales para la simulación EMS con respecto a la operación real. . . . .	71
A.1.	Geometría de líneas aéreas en benchmark para redes de distribución en bajo voltaje diseñada por CIGRE. . . . .	82
A.2.	Geometría de líneas soterradas en benchmark para redes de distribución en bajo voltaje diseñada por CIGRE. . . . .	82
A.3.	Datos de las líneas en el <i>benchmark</i> de múltiples micro-redes interconectadas. . . . .	82
A.4.	Datos de cargas en el <i>benchmark</i> de múltiples micro-redes interconectadas. . . . .	82
A.5.	Generación distribuida en <i>benchmark</i> de múltiples micro-redes interconectadas. . . . .	83
A.6.	Datos de generadores sincrónicos en el <i>benchmark</i> de múltiples micro-redes interconectadas. . . . .	83
A.7.	Capacidad de almacenamiento en <i>benchmark</i> de múltiples micro-redes interconectadas. . . . .	83

A.8.	Atributos de los datos a utilizar para la generación de la micro-red <i>benchmark</i> de ESUSCON. . . . .	88
B.1.	Datos inexistentes en datos de operación con muestreo de 15 minutos previo a estimación de datos. . . . .	91
B.2.	Valores de factores de crecimiento para generación diesel activa y reactiva. . .	92
B.3.	Datos iniciales y finales de <i>Look Up Table</i> de los atributos necesarios para <i>benchmark</i> ESUSCON. . . . .	93
B.4.	Ubicación de centrales de medida en sistema SCADA de Huatacondo. . . . .	94

# Índice de Ilustraciones

1.1.	Imagen satelital de Huatacondo . . . . .	4
1.2.	Estructura de la memoria. . . . .	6
2.1.	Distribución clásica de micro-red conectada. . . . .	10
2.2.	Clasificación de PMGD, PMG y AG en Chile. . . . .	11
2.3.	Topología presente en <i>benchmark</i> de red de distribución en bajo voltaje. Fuente: [8]. . . . .	16
2.4.	Perfiles de demanda diarios en <i>benchmark</i> de red de distribución en bajo voltaje. Fuente: Elaboración propia a partir de datos en [8]. . . . .	17
2.5.	Unilineal del <i>benchmark</i> de múltiples micro-redes interconectadas. Fuente: [9].	18
2.6.	Subsistema <i>Smart Home</i> en Micro-red de Campus BCIT. Fuente [7]. . . . .	20
2.7.	Subsistema Oasis en Micro-red de Campus BCIT. Fuente [7]. . . . .	21
2.8.	Subsistema de turbina a vapor en Micro-red de Campus BCIT. Fuente [7]. . .	21
2.9.	Diagrama de flujo para generación de <i>benchmark</i> en sistemas de potencia. Fuente: [5]. . . . .	22
3.1.	Metodología propuesta para la generación de micro-redes <i>benchmark</i> del tipo aisladas. . . . .	27
4.1.	Contexto geográfico Huatacondo. Fuente: [14]. . . . .	34
4.2.	Red de distribución disponible en Huatacondo. Fuente: : [14]. . . . .	34
4.3.	Esquemático de la micro-red <i>benchmark</i> ESUSCON. . . . .	37
4.4.	Demanda histórica de Huatacondo . . . . .	38
4.5.	Perfiles de demanda para las distintas estaciones de 2018 en Huatacondo. . . .	39
4.6.	Perfiles de generación solar y eólica en los años 2018/2014. . . . .	41
4.7.	Perfiles de generación diésel e inversor en el año 2018. . . . .	41
4.8.	Correlación entre generación diésel y demanda para potencia activa . . . . .	44
4.9.	Diagrama de archivos y carpetas en repositorio. . . . .	45
4.10.	Perfiles de consumo y generación de activos para días de marzo de 2014. . . .	47
5.1.	Diagrama de bloques del EMS implementado en Huatacondo. Fuente [49]. . . .	51
5.2.	EMS adaptado para la simulación del caso de estudio. . . . .	53
5.3.	Curva segmentada de consumo de unidad térmica. Fuente [48]. . . . .	54
5.4.	Curva de potencia máxima de carga de una batería. Fuente [48]. . . . .	57
5.5.	Datos para predicción de EMS 10 y 11 de julio 2016. . . . .	61
5.6.	Generación solar para ventan temporal del 27 al 28 de diciembre 2017. . . . .	64
5.7.	Penetración de ERNC para escenario de simulación EMS y operación real de la micro-red en el corto plazo. . . . .	65
5.8.	Comparación de energía inyectada para ambos escenarios en el corto plazo. . .	66
5.9.	Diferencias porcentuales de simulación EMS con respecto a operación real en el corto plazo. . . . .	66

5.10.	Penetración de ERNC para escenario de simulación EMS y operación real de la micro-red en el largo plazo. . . . .	68
5.11.	Comparación de energía inyectada para ambos escenarios en el largo plazo. . .	69
5.12.	Diferencias porcentuales de simulación EMS con respecto a operación real en el largo plazo. . . . .	70
A.1.	Geometría de líneas aéreas y soterradas en benchmark de redes de distribución en bajo voltaje. Fuente: Benchmark Systems for Network Integration of Renewable and Distributed Energy Resources - Task Force C6.04 . . . . .	80
A.2.	Diagrama de flujo específico para el paso 5) selección de datos - Fuente: Power System Benchmark Generation Methodology . . . . .	81
A.3.	Diferencias generales en un sistema de distribución norteamericano y europeo - Fuente: <a href="https://crushtymks.com/es/high-voltage/976-north-american-versus-european-distribution-systems.html">https://crushtymks.com/es/high-voltage/976-north-american-versus-european-distribution-systems.html</a> . . . . .	81
A.4.	Perfiles de demanda para las distintas estaciones de 2014 y 2015 en Huatacondo.	84
A.5.	Perfiles de demanda para las distintas estaciones de 2016 y 2017 en Huatacondo.	84
A.6.	Perfiles de demanda para las distintas estaciones de 2018 y 2019 en Huatacondo.	85
A.7.	Correlaciones entre atributos de potencia activa en <i>benchmark</i> ESUSCON. . .	86
A.8.	Correlaciones entre atributos de potencia reactiva en <i>benchmark</i> ESUSCON. . .	87
B.1.	Diagrama de flujo para estimación de datos inexistentes . . . . .	90
B.2.	Estimación de datos mediante LUTs en junio 2015. . . . .	93
B.3.	Estimación de datos mediante replica del día anterior en junio 2015. . . . .	94
B.4.	Red de distribución de Huatacondo con la numeración de los postes de distribución.	95
B.5.	Distribución de casas en Huatacondo con 7 áreas de consumo establecidos. . .	96
B.6.	Distribución de casas en Huatacondo. . . . .	97
C.1.	Comparación de tasas de refresco para operación de BESS para ventana temporal del 12 de julio 2016. . . . .	98
C.2.	Fechas verificadas en las que la micro-red ESUSCON opera bajo EMS. . . . .	99

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Motivación

Al día de hoy existe una creciente penetración de Generación Distribuida (GD) en la red eléctrica nacional. La inserción de estas tecnologías ha conllevado una alteración en cómo se concibe actualmente la operación de la red eléctrica. Estas alteraciones ameritan que el país impulse modificaciones en la legislación existente, de modo que la GD tenga oportunidades de implementación y reconocimiento dentro del mercado eléctrico nacional.

La operación en conjunto de distintas GD, que en la mayoría de los casos corresponden a Energías Renovables No Convencionales (ERNC), recibe comúnmente la denominación de micro-red [1]. En donde, dependiendo de su arquitectura, da cabida a la inserción de diversas GD. Una característica de las micro-redes es la opción de operar conectada a la red, pudiendo abastecerse de esta, o bien inyectando energía a la red. Otra opción de operación es el modo aislado, donde la red abastece su propio consumo en todo momento sin depender de la red principal.

Con el paso de los años han sido implementadas cada vez más micro-redes [2], en las que se han generado una variada información de la operación de estas redes, junto con diversas lecciones aprendidas por los equipos encargados de su desarrollo. Debido a distintos motivos estos datos no siempre son compartidos con el resto de la comunidad. En el caso de ser compartida su información, se espera que los datos contribuyan al correcto desarrollo de proyectos de micro-redes en el futuro [3].

Por esta razón, diversos autores han confeccionado micro-redes *benchmark* (o de comparación), que consisten en la publicación de conjuntos de datos que describan a un sistema eléctrico, de modo que permita realizar diversas validaciones sobre estudios con distintos enfoques investigativos. Estas validaciones pueden ser destinadas a estudios de estado dinámico y estacionario de la red, entre los que destacan los de flujo óptimo de potencia, gestión de la energía, control, estabilidad y protecciones [4].

Las redes *benchmark* pueden ser generadas a partir de datos reales, como en los estudios presentados en [5–7], así como también las hay realizadas a partir de datos artificiales, siendo ejemplos de estas redes los estudios presentados en [8, 9].



Dentro de las micro-redes *benchmark* existentes, en variados casos se presentan distintas metodologías en su diseño, existiendo en los *benchmark* distintos tipos de información, además de contar con volúmenes diferentes de datos. Existen diversas razones por las que ocurre este fenómeno, algunas son: intención de abarcar múltiples tipos de micro-redes en el *benchmark* diseñado, dificultad en la obtención de información sobre la operación de micro-redes y, por último, inexistencia de métodos estandarizados para la confección de micro-redes *benchmark* [10].

El presente trabajo de título propone diseñar una metodología para generación de redes *benchmark* de micro-redes aisladas, que permita la generación de distintas micro-redes que cumplan con una misma metodología, con la finalidad de contar con múltiples alternativas de *benchmark* al momento de la validación de un estudio, a la vez que estas distintas alternativas aseguren un nivel de equivalencia debido a su metodología en común.

## 1.2. Objetivos

### 1.2.1. Objetivo general

El objetivo general de este trabajo de memoria, es la creación de una metodología estandarizada para el diseño de micro-redes *benchmark* de tipo aislada. Esta elección se debe a la mayor experiencia que se ha obtenido sobre ellas a nivel nacional [11]. El propósito de la metodología a diseñar es que, bajo el cumplimiento de rigurosos procedimientos, se ponga a disposición pública múltiples micro-redes *benchmark*, que cumplan de manera satisfactoria con los requerimientos específicos bajo las cuales fueron diseñadas.

La metodología propuesta debe guiar al diseñador del *benchmark* en el minucioso proceso de la caracterización y obtención de datos, donde el resultado deba ser un *benchmark* de micro-red aislada que cuente con evaluaciones en el conjunto de datos a publicar, de manera tal que permita la realización de comparaciones en los estudios planificados por el diseñador.

### 1.2.2. Objetivos específicos

El primer objetivo específico que se plantea para el diseño de una metodología, es el reconocimiento de diversas metodologías existentes que se encuentran para el diseño de *benchmark* de redes eléctricas. Esto toma el propósito de adoptar ciertas pautas generales en los requerimientos necesarios para poder diseñar una metodología con distintas evaluaciones para posteriormente generar una micro-red *benchmark*.

Posteriormente, se propone como segundo objetivo específico, la propuesta metodológica para la generación de redes *benchmark* de micro-redes aisladas. La propuesta se debe basar en la información previa sobre metodologías existentes, además de integrar las distintas condiciones a las que están sujetas las micro-redes. Se espera que la metodología pueda ser aplicada en la generalidad de micro-redes aisladas, por lo que se debe poner énfasis en el carácter integral de los pasos a seguir, de forma que estos no sean específicos para micro-redes con características particulares.

Con el fin de validar la metodología diseñada se propone el tercer objetivo específico,

que es el de aplicar esta metodología sobre una micro-red existente, por lo que se toma de referencia el proyecto de micro-red aislada Energía Sustentable Cóndor (ESUSCON)[12], ubicada en Huatacondo, Chile. Esta red fue la culminación de un proyecto de la Universidad de Chile en conjunto con la minera Collahuasi, trabajo que resultó en la primera micro-red aislada de Chile. Debido a la participación de la Universidad de Chile, se puede acceder a más de 5 años de datos operacionales de la red (2014 a 2019), tales como, generación eólica, generación solar, demanda, episodios de fallas, especificaciones técnicas de los equipos, condiciones meteorológicas, entre otros.

Finalmente, el ultimo objetivo específico contempla la validación del *benchmark* generado, este objetivo se realiza a través de la simulación de la operación de la micro-red según el *Energy Mngagement System* (EMS) implementado en ESUSCON, por lo que la validación recae en la similitud entre la operación real de la micro-red<sup>1</sup> y la simulación del EMS a partir de los datos del *benchmark* generado.

### 1.3. Experiencia en micro-red ESUSCON

La micro-red aislada ESUSCON es un red de distribución ubicada al norte de Chile, específicamente en la localidad de Huatacondo, donde previamente a la puesta en marcha de la micro-red, la comunidad de Huatacondo contaba únicamente con electricidad en acotadas horas del día, siendo 10 horas los días de semana y 8 horas los fines de semana, contando únicamente con un grupo electrógeno encargado de la generación eléctrica.

En Huatacondo, inicialmente habitaban cerca de 100 personas, donde la posibilidad de contar con una micro-red que permitiese el uso ininterrumpido de electricidad, permitió el desarrollo de actividades nuevas que requiriesen el uso de electricidad las 24 horas, mejorando significativamente la calidad de vida de los habitantes [13].

En la Figura 1.1 se presenta una imagen satelital de la localización de Huatacondo.

---

<sup>1</sup> El EMS con el que opera la micro-red ESUSCON es presentado en el Capítulo 5, donde se discute su operación y consideraciones para la simulación realizada.



Figura 1.1: Imagen satelital de Huatacondo

La implementación de la micro-red fue llevada a cabo por un equipo multidisciplinario, conformado por profesionales y estudiantes del área de geografía, ingeniería en recursos renovables e ingeniería civil eléctrica [14]. En la Tabla 1.1 [15], se presentan los parámetros de la micro-red resultante de este proyecto.

Tabla 1.1: Parámetros de diseño en micro-red Huatacondo.

Parámetros	Valor	Unidad
Potencia panel fotovoltaico	22,68	[kW]
Potencia aerogenerador	3,00	[kW]
Potencia máxima de almacenamiento	40	[kW]
Capacidad de almacenamiento	150	[kWh]
Potencia máxima del grupo electrógeno	120	[kW]
Potencia mínima del grupo electrógeno	10	[kW]

La participación en la operación de la micro-red por parte de la Universidad de Chile, fue desde el año 2011 hasta el año 2019. En este período, el equipo de trabajo encargado recopiló los datos operacionales de la red, por lo que se cuenta con un amplio conjunto de datos dispuestos para ser utilizados en diversos estudios.

Finalmente, se debe tener en cuenta que al día de hoy la micro-red cuenta con dos unidades menos, la bomba de agua se reemplazó por una tecnología que no requería de energía eléctrica para su funcionamiento y el aerogenerador dejó de utilizarse luego de que una fuerte ventisca que provocó el derribo la unidad, dejando las fundaciones destruidas y los componentes principales de la unidad inutilizables [16].

## 1.4. Estructura de la memoria

Esta memoria está organizada en base a capítulos, cuyos nombres y aspectos generales se presentan a continuación:

- En el Capítulo 1, se contextualiza la motivación que lleva consigo la realización de la presente memoria, junto con los objetivos generales y específicos del trabajo a realizar. Posteriormente, se presenta la estructura de la memoria y sus contribuciones.
- En el Capítulo 2 se presentan los conceptos relacionados a las micro-redes *benchmark* en conjunto con una metodología de generación de *benchmark* para sistemas de potencia. Se discuten los siguientes temas:
  - Concepto de micro-red.
  - Concepto de micro-red *benchmark*.
  - Presentación de micro-redes *benchmark* existentes.
  - Presentación y discusión sobre metodología para generación de *benchmark* para sistemas de potencia existente.
- En el Capítulo 3, se propone la metodología propuesta para la generación de micro-redes *benchmark* del tipo aisladas. A modo de ejemplificar sus etapas, se desarrollan los siguientes temas:
  - Caracterización de la micro-red.
  - Obtención de datos.
  - Evaluación y generación de una micro-red *benchmark*.
- En el Capítulo 4, se realiza la aplicación de la metodología generada con la micro-red existente ESUSCON, ubicada en Huatacondo, Chile. En el Capítulo 4 se desarrollan los siguientes temas:
  - Caracterización de la micro-red *benchmark* a generar.
  - Obtención de datos necesarios para generación de micro-red *benchmark*.
  - Evaluación y generación de la micro-red *benchmark* ESUSCON.
  - Discusión sobre el *benchmark* generado.
- En el Capítulo 5, se desarrolla un caso de estudio para la micro-red *benchmark* de ESUSCON donde se implementa el EMS bajo el que opera la micro-red real. En el Capítulo 5 se desarrollan los siguientes temas:
  - EMS a utilizar.
  - Incorporación del *benchmark* al EMS de Huatacondo.
  - Resultados de la implementación.
  - Discusión de los resultados obtenidos.
- En el Capítulo 6, se comparten las conclusiones, comentarios, recomendaciones y posibles trabajos futuros a partir de la presente memoria.

- Posteriormente, se presenta la bibliografía junto a los anexos.

Con la finalidad de resumir los temas mencionados, la Figura 1.2 presenta el diagrama con la estructura de la memoria.

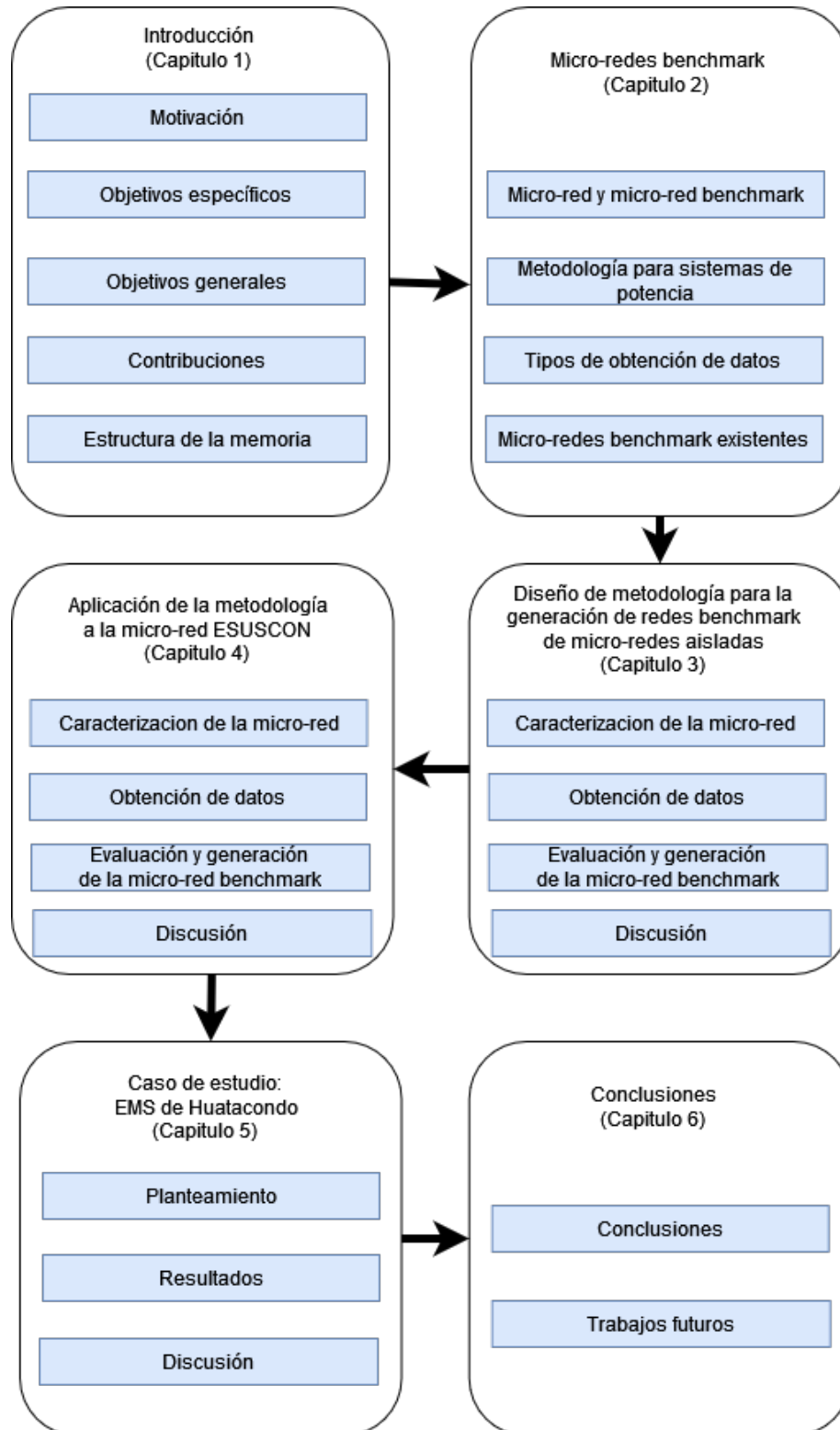


Figura 1.2: Estructura de la memoria.

## 1.5. Contribuciones de la memoria

Los principales aportes de esta memoria son los siguientes:

1. Se presenta una novedosa metodología para la generación de micro-redes *benchmark* del tipo aisladas, la que sintetiza las características principales de metodologías para sistemas de potencia en conjunto con los conceptos característicos de las micro-redes aisladas.
2. La metodología diseñada fue aplicada a la micro-red ESUSCON, obteniendo una micro-red *benchmark* del tipo aislada. Este *benchmark* logra los objetivos propuestos previos a su generación, obteniendo una completitud en los datos necesarios para los casos de uso para el que fue diseñado. Esta micro-red está disponible públicamente en el sitio <https://github.com/OscarDorner-UCH/ESUSCON-Isolated-Microgrid-Benchmark>.
3. El caso de estudio realizado sobre el *benchmark* ESUSCON, muestra en sus resultados importantes similitudes entre la operación real de la micro-red y la simulación de EMS sobre el *benchmark*. Estas similitudes deben ser evaluadas con conocimiento de las limitaciones del modelo, por lo que logran ser satisfactorias y se logra la validación del *benchmark* generado.

# Capítulo 2

## Micro-redes *benchmark*

En el presente capítulo se introducen los conceptos y características de las micro-redes *benchmark* necesarios para la realización de esta memoria. Comenzando desde los conceptos más estructurales, hasta llegar a ejemplificaciones de micro-redes *benchmark* existentes. Además, se presenta una metodología existente para la generación de redes *benchmark* para sistemas de potencia.

### 2.1. Micro-red

Una micro-red es un sistema de energía integrado que consiste en cargas interconectadas y fuentes de energía distribuidas, que como sistema integrado puede operar en paralelo con una red principal, o en forma aislada de esta [17].

Los generadores utilizados en las micro-redes, típicamente, se basan en recursos distribuidos renovables no convencionales, que generan energía de manera coordinada. Es necesario que estas unidades estén dotadas de interfaces de electrónica de potencia y control, con el fin de que funcionen como un sistema único y se garantice la calidad del suministro eléctrico entregado.

A continuación, se mencionan diferencias destacables entre las micro-redes y centrales generadoras convencionales [18]:

- Los generadores presentes en una micro-red son de menor capacidad que los presentes en las grandes plantas.
- La energía que se genere a tensión de distribución, puede ser directamente inyectada en redes de distribución. De manera que no se requiera el uso de transformadores, como en los casos de centrales generadoras convencionales.
- Los pequeños generadores se encuentran habitualmente a distancias cercanas a sus consumos, por lo que se posibilita un suministro de energía eficiente con pocas pérdidas en las líneas.

Una micro-red tiene la opción de operar en paralelo a la red principal, lo que la caracteriza como una micro-red “conectada”. Este modo de operación aporta beneficios al sistema eléctrico al cual se conecta, destacándose los siguientes atributos [17]:

- Reducción en el costo de la energía y volatilidad de precios; se da gracias a una disminución de pérdidas y a una mayor gama de fuentes de generación disponibles.
- Mejora la confiabilidad y calidad del suministro eléctrico, debido a la mayor inteligencia presente en la red de distribución, además de la existencia de fuentes de generación dentro de ella, junto con la opción de aislarse de la red en caso de perturbaciones externas.
- Permite manejar la intermitencia de fuentes de energía renovable gracias a la existencia de almacenamiento de energía, junto a la complementariedad entre diversas fuentes renovables y fósiles.
- Posibilita diferenciar nuevos servicios a los que pueden acceder los clientes, tales como una contratación de un cierto nivel de confiabilidad o calidad de suministro.
- Permite ahorrar o retardar inversiones en infraestructura al mejorar el aprovechamiento de la red de distribución gracias al mayor control que se tiene sobre ella.

También existe la opción de operar en modo “aislado”, donde se presenta la posibilidad de electrificar zonas que tenían imposibilitada su integración a la red principal. Un ejemplo se da con la opción de electrificación en zonas rurales presentada en [19]. Además, en este modo de operación la micro-red cuenta con una calidad del suministro que depende principalmente de la gestión de recursos que tenga el sistema, por lo que la calidad del suministro y su tarificación no están acoplados a las condiciones de la red principal [20].

Dentro de la composición de las micro-redes, estas están constituidas por los siguientes recursos distribuidos [21]:

- Generación Distribuida: corresponde a las fuentes de generación locales en la micro-red, pudiendo ser de carácter renovable o convencional.
- Almacenamiento Distribuido: corresponde a los dispositivos de almacenamiento de energía dentro de la micro-red, los puede haber electroquímicos, de presión, gravitacionales, entre otros. Entre estos destacan los bancos de baterías y volantes de inercia.
- Cargas Controlables: corresponde a cargas dentro de la red que por algún sistema de comunicación son controlables. Pudiendo desconectarse, reducir su consumo o aplazarlo a algún horario que permita la optimización en la operación de la micro-red.

Finalmente, se exhibe una distribución clásica de micro-red conectada en la Figura 2.1. Se menciona que la interrupción en la conexión de la “Red principal” con la “Micro-red” mediante el *Point of Common Coupling* (PCC) significaría una operación en modo aislado. Los recursos distribuidos pueden ser desconectados mediante un dispositivo *Circuit Breaker* (CB), aislándolos así de la micro-red.



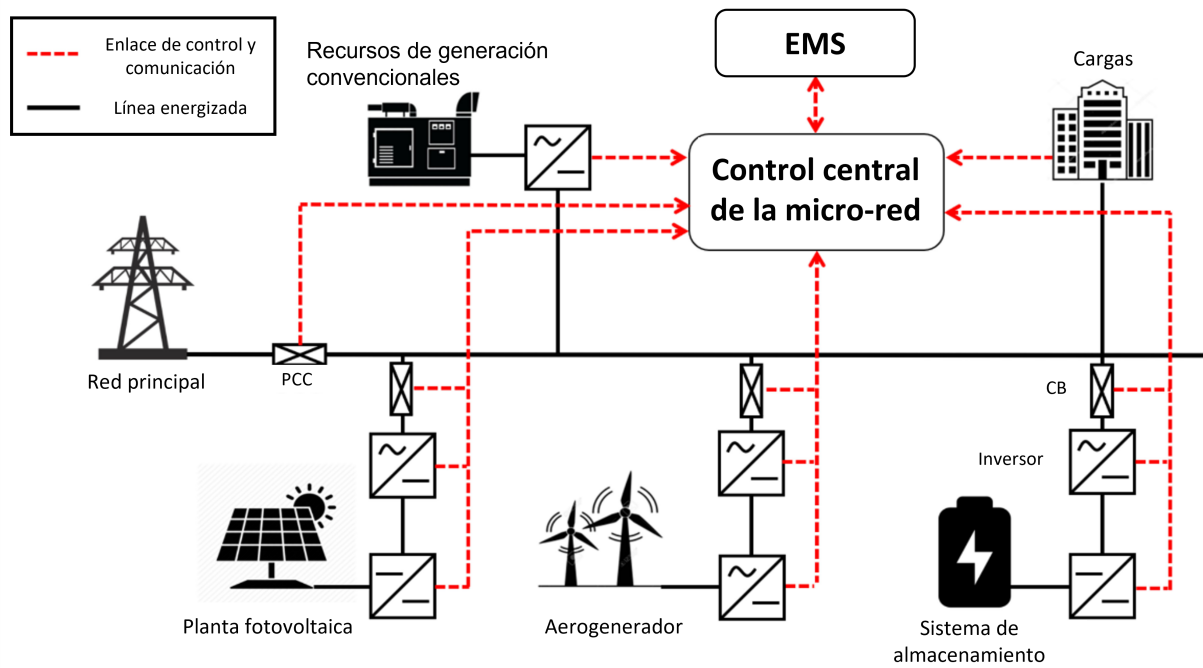


Figura 2.1: Distribución clásica de micro-red conectada.

El Control central de la micro-red es el responsable de mejorar su rendimiento, calcular los valores óptimos, lograr una función objetivo teniendo en cuenta las restricciones propias de la red, considerar costos adicionales (por ejemplo, la puesta en marcha de grupos electrógenos) y realizar pronósticos meteorológicos para garantizar una generación de energía óptima. Este control se logra mediante la adopción de un *Energy Management System*, el que es presentado en el Capítulo 5.

## 2.2. Generación distribuida

La generación distribuida, puede ser definida como el uso integrado de pequeñas unidades de generación conectadas directamente a un sistema eléctrico de distribución, o también, a las instalaciones particulares de un usuario.

Actualmente en Chile, según la Ley General de Servicios Eléctricos (LGSE)<sup>2</sup>, se especifica que los Pequeños Medios de Generación Distribuida (PMGD) constan de medios de generación a pequeña escala, cuyos excedentes de potencia suministrables al sistema eléctrico son menores a los 9.000 [kW], a la vez que están conectados a las instalaciones de una empresa distribuidora o a instalaciones de una empresa que posea líneas de distribución de energía eléctrica que utilicen bienes nacionales de uso público.

Además, se presentan los Pequeños Medios de Generación (PMG), que se diferencian de los PMGD por estar conectados a instalaciones pertenecientes al sistema de transmisión nacional, zonal, dedicado, para polos de desarrollo o en instalaciones de interconexión internacional.

<sup>2</sup> En el Decreto Supremo 244 del año 2006, se especifican los conceptos de PMGD y PMG. Este decreto fue actualizado el año 2019 con la publicación del Decreto 88, donde se reafirman estas definiciones.

Los PMG también deben tener excedentes de potencia suministrable al sistema menores o iguales a 9.000 [kW].

Se hace mención de los excedentes de menor magnitud, por lo que es incorporada la Autogeneración (AG). Este tipo de generación se caracteriza por excedentes menores a los 300 [kW], además de ser ideado para puntos de consumo residencial; la AG es regulada bajo la ley de *Netbilling*<sup>3</sup>.

Estas especificaciones se ejemplifican en la Figura 2.2.

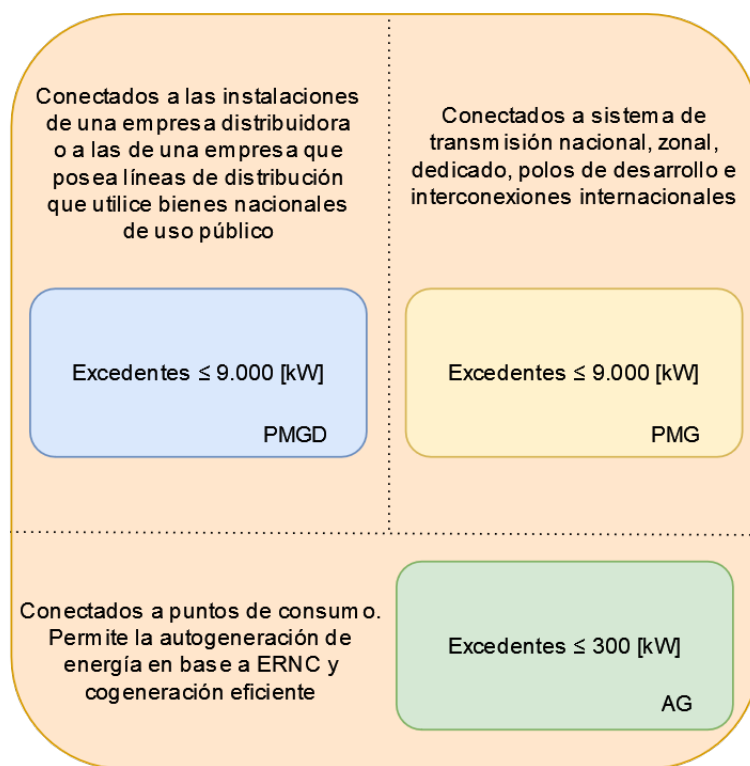


Figura 2.2: Clasificación de PMGD, PMG y AG en Chile.

## 2.2.1. Componentes de una micro-red

Para que una micro-red pueda funcionar de forma autónoma y aislada debe contar con los siguientes componentes:

### 2.2.1.1. Unidad de generación

Una de las características principales de las micro-redes, es que se comportan como puntos donde existe generación distribuida [22]. Esto significa que las unidades de generación se encuentran cercanas a los centros de distribución o dentro de ellos. Estas unidades de generación pueden ser renovables o no renovables, dependiendo de los recursos energéticos de la zona. En general las fuentes más utilizadas son:

- Paneles fotovoltaicos.

<sup>3</sup> Actualización de las normas para Autogeneración en el año 2018 por la nueva Ley 21.118.

- Aerogeneradores.
- Grupos electrógenos.

### 2.2.1.2. Sistema de almacenamiento

Los sistemas de almacenamiento, corresponden a equipos encargados de almacenar o entregar energía eléctrica según la configuración de operación para el sistema. Entre sus usos destacan: almacenamiento de exceso de energía renovables, regulación de voltaje, reserva primaria, recorte de carga máxima, entre otros. En los sistemas eléctricos de potencia existen diversas tecnologías de almacenamiento de energía eléctrica, dentro de las que destacan [23]:

- Conjuntos de baterías.
- Volantes de inercia.
- Almacenamiento de energía de aire comprimido.
- Supercondensadores.
- Almacenamiento en celdas de hidrógeno.

### 2.2.1.3. Unidad de control

Es la unidad encargada de ejercer los controles primarios, secundarios y terciarios en la micro-red, sujetos a una jerarquía y arquitectura de diseño determinados (depende de cada micro-red). Algunas de las funciones de control que realiza esta unidad se muestran a continuación [24]:

- Conexión con la red principal:
  - Capacidad de aislamiento.
  - Participación en el mercado.
  - Coordinación con red principal.
- Control de la micro-red:
  - Control de tensión/frecuencia.
  - Control de potencia activa/reactiva.
  - Partida en negro.
  - Demanda de electricidad.
- Control local y protecciones:
  - Control primario de tensión/frecuencia.
  - Control primario de potencia activa/reactiva.
  - Gestión del grupo de almacenamiento.

Junto con las definiciones anteriores, se pueden encontrar los sistemas de protecciones, que corresponde al conjunto de interruptores, relés de protección, medidores y fusibles. Estos sistemas se encargan de aislar zonas del sistema ante una eventual falla. Es necesario que el sistema de protecciones cuente con un sistema de comunicación robusto, independiente de la arquitectura de control implementada en la micro-red.

## 2.3. Micro-red *benchmark*

Una micro-red *benchmark*, también conocida como micro-red de prueba, es una red ficticia creada con el fin de comparar distintas propuestas e innovaciones dentro del área de micro-redes, ya sea en esquemas de control, sistemas de protecciones, inserción de distintas combinaciones de generación y demanda [9]. Este tipo de *benchmark* es un caso particular de las redes *benchmark* [25], las que tienen alcances destinados a sistemas de potencia más amplios que los aquí presentados.

Las micro-redes *benchmark* se diseñan con el fin de cumplir como base comparativa para distintos tipos de estudios. A causa de esto se presentan variados arquetipos de datos en estos trabajos. Actualmente, hay diversos focos de estudio en el área de micro-redes<sup>4</sup>, los que se presentan en la Tabla 2.1:

Tabla 2.1: Temas generales y posibles estudios a realizar sobre una micro-red *benchmark*.

Tema	Estudios potenciales
Planificación de la arquitectura	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Conexión óptima de la micro-red</li> <li>-Estudio de interfaz de la red de distribución</li> <li>-Planificación de redes tipo radial y enmallada</li> <li>-Planificación de expansión futura</li> </ul>
Administración de la energía	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Administración óptima de la energía</li> <li>-Despacho económico</li> <li>-Incertidumbre en la inserción de recursos distribuidos</li> </ul>
Control y estabilidad	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Estrategia de control jerárquico</li> <li>-Estrategia de control distribuido</li> <li>-Estrategia de control híbrido</li> <li>-Impacto de carga y recursos distribuidos en la estabilidad de la red</li> <li>-Impacto en cambios en la topología de la micro-red</li> </ul>
Flujo de potencia	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Flujo de potencia óptimo considerando las incertidumbres en generación y carga</li> </ul>
Confiabilidad del suministro	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Evaluación de índices de confiabilidad</li> <li>-Análisis de contingencias</li> <li>-Estudios de fallas y protecciones</li> </ul>
Resiliencia de la red	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Modelamiento de eventos extremos y fragilidad de la red</li> <li>-Análisis de impacto a la red por daño causado a raíz de eventos extremos</li> </ul>

<sup>4</sup> Se debe mencionar que los *benchmark* de micro-redes están ideados para ser sometidos a estudios particulares en este tipo de redes.

### 2.3.1. Métodos para la obtención de datos

En la obtención de datos para las variables que se requieren en la caracterización de una micro-red *benchmark*, se puede recurrir principalmente a 2 métodos. El primero es el método determinístico, que consiste en obtener los datos desde mediciones realizadas con equipos afines, por ejemplo, las que se obtienen mediante un sistema SCADA<sup>5</sup> en la potencia inyectada en un nodo específico. Otro ejemplo son las mediciones de radiación solar global mediante un piranómetro.

El segundo es el método estocástico, que contempla la obtención de datos mediante distintas aproximaciones y supuestos sobre el comportamiento de las variables a obtener. Algunos ejemplos de obtención estocástica se exhiben a continuación, junto con las publicaciones que permiten aproximar su comportamiento.

- Pronóstico de la velocidad del viento [26].
- Pronóstico de Irradiación solar [27].
- Pronóstico de la demanda de electricidad [28].
- Pronóstico de la marea y oleaje [29].
- Pronóstico de patrones de carga en usuarios de vehículos eléctricos [30].

Los métodos para el pronóstico de ciertos comportamientos existen de manera que al diseñar una red con cierta variedad de generación renovable, su recurso primario pueda ser completamente modelado con estas herramientas.

Algunos autores mencionan que los resultados conseguidos en *benchmark* confeccionados a partir de datos determinísticos (obtenidos a partir de datos medidos en una red establecida), obtienen soluciones óptimas, pero más específicas que las elaboradas en estudios similares con información de naturaleza estocástica [31].

---

<sup>5</sup> *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA) por sus siglas en inglés.

## 2.4. Micro-redes *benchmark* existentes

Actualmente, existen diversas micro-redes *benchmark*; estas son utilizadas para diversas validaciones de estudios. Por ejemplo: el análisis de desarrollo y respuesta de frecuencia realizado en [32] y el análisis de respuesta ante fallas publicado en [33].

Las micro-redes *benchmark* en diversas ocasiones presentan diferencias entre sí, tanto en dimensiones, fechas de creación y metodologías en su confección [9]. Estas micro-redes son presentadas con la completitud de sus componentes en la presente sección. A continuación se presentan algunos de los *benchmark* disponibles hoy en día, los que son utilizados para la validación de diversos estudios<sup>6</sup>.

### 2.4.1. *Benchmark* para redes de distribución en bajo voltaje diseñada por CIGRE

En el trabajo realizado en [8] se presenta una micro-red *benchmark* donde se caracteriza su demanda y equipos no correspondientes a los de generación, dejando a disposición del investigador el conjunto de generación con el que cuente el *benchmark*<sup>7</sup>. Esta red es una de las seis redes *benchmark* que se comparten en la publicación. Esta red es elegida por ser de bajo voltaje y con una configuración europea<sup>8</sup>.

Las características de la configuración de este *benchmark* consisten en 3 aspectos principales:

- Estructura: la distribución típica de las redes de distribución de bajo voltaje surgen a partir de un transformador de media a baja tensión y cuentan con una estructura radial. Los consumidores se pueden distribuir en variados puntos de las líneas. La frecuencia de operación es 50 [Hz].
- Simetría: la conexión monofásica de los consumos hace que la red de distribución este inherentemente desbalanceada, por lo que se debe abordar este tema cuando se haga uso del *benchmark* por los diversos problemas que ocasiona.
- Tipos de líneas: las líneas de distribución en bajo voltaje tienen principalmente dos opciones: soterradas<sup>9</sup> cuando la red se encuentra en áreas urbanas de alta densidad de carga, y aéreas en caso de zonas rurales con una densidad de carga más baja en comparación a la área urbana.

La topología de la red, cuenta con tres bloques de carga, estas son: residenciales, industriales y comerciales. En los subsistemas residencial e industrial, se ocupan cables soterrados, mientras que en el subsistema comercial se utilizan líneas aéreas<sup>10</sup>. La topología de la red, junto a sus subsistemas, se presenta en la Figura 2.3.

<sup>6</sup> Estos estudios son presentados en la Tabla 2.1.

<sup>7</sup> Algunos equipos de generación son presentados en la micro-red. Sin embargo, se plantea que el conjunto de generación sea dispuesto en los estudios a realizar en este *benchmark*.

<sup>8</sup> La red de distribución en bajo voltaje se asemeja más a una micro-red que las demás. La configuración europea comparte varios aspectos técnicos con las configuraciones presentes en las redes eléctricas chilenas.

<sup>9</sup> Tendido eléctrico que se instala en subsuelo.

<sup>10</sup> La geometría de las líneas aéreas y soterradas se exhiben en la Figura A.1

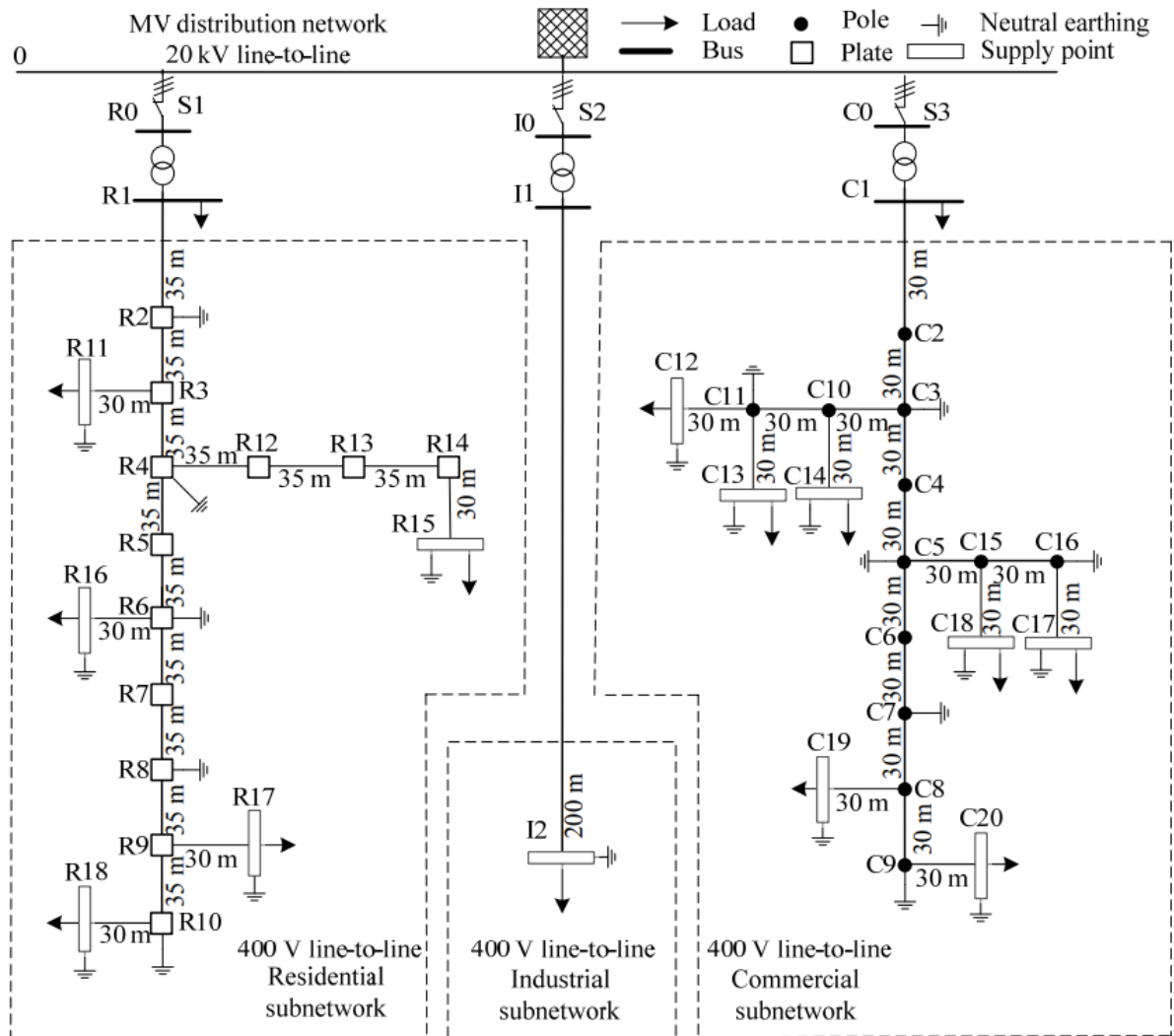


Figura 2.3: Topología presente en *benchmark* de red de distribución en bajo voltaje. Fuente: [8].

A modo de complementar los parámetros de la micro-red, las especificaciones de las líneas pueden ser homologados a las publicados en [35] (ver A.1 y A.2). Para la caracterización de la demanda en los 3 distintos subsistemas, se presentan los valores *peak* de demanda en cada nodo. Estos valores se presentan en la Tabla 2.2. Por último, En la Figura 2.4 se caracteriza la curva de demanda diaria para los distintos subsistemas.

Tabla 2.2: Demandas máximas en nodos en *benchmark* de red de distribución en bajo voltaje. Fuente: [8].

Nodo	Potencia aparente, S	Factor de potencia, pf
	[kVA]	
R1	200	0.95
R11	15	0.95
R15	52	0.95
R16	55	0.95
R17	35	0.95
R18	47	0.95
I2	100	0.85
C1	120	0.90
C12	20	0.90
C13	20	0.90
C14	25	0.90
C17	25	0.90
C18	8	0.90
C19	16	0.90
C20	8	0.90

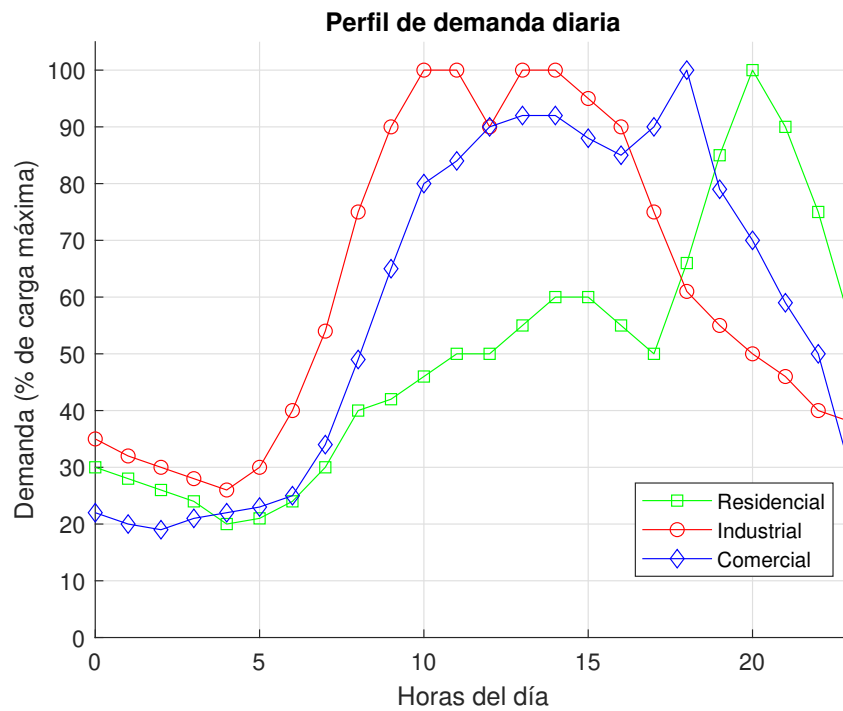


Figura 2.4: Perfiles de demanda diarios en *benchmark* de red de distribución en bajo voltaje. Fuente: Elaboración propia a partir de datos en [8].



## 2.4.2. *Benchmark* de múltiples micro-redes interconectadas

En [9] los autores presentan lo que apunta a ser un *benchmark* con una completitud en los datos publicados. El sistema eléctrico está compuesto por 4 micro-redes interconectadas, las que son obtenidas a partir de *benchmark* disponibles en la literatura, por lo que el conjunto representa heterogeneidad en sus topologías y parámetros.

El *benchmark* de las micro-redes interconectadas se presenta en la Figura 2.5, donde se comparten las disposiciones de los equipos de generación, puntos de consumo e interconexiones.

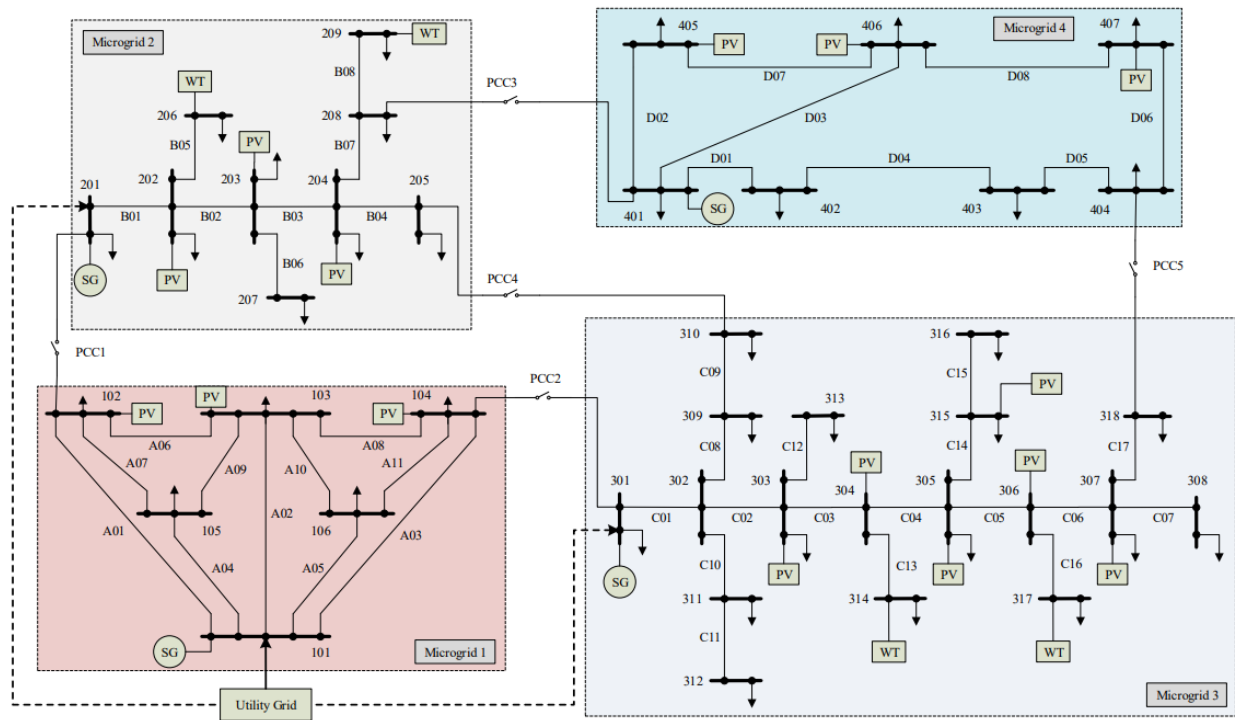


Figura 2.5: Unilineal del *benchmark* de múltiples micro-redes interconectadas. Fuente: [9].

La procedencia de las 4 micro-redes que componen el *benchmark* se detalla a continuación:

- Micro-red 1: compuesto a partir de la red de 6 barras publicado en [36].
- Micro-red 2: adoptado a partir de la red *benchmark* de la IEEE de 33 barras publicado en [37].
- Micro-red 3: adoptado a partir de la red *benchmark* de la IEEE de 67 barras publicado en [38].
- Micro-red 4: corresponde al sistema de distribución de la IEEE de 14 barras publicado en [39].

Las especificaciones de cada micro-red se presentan en la Tabla 2.3. Estos valores corresponden al recuento de los elementos presentados en la Figura 2.5.

Tabla 2.3: Recuento detallado de las micro-redes en el *benchmark* de múltiples micro-redes interconectadas. Fuente: [9].

Componente	Micro-red			
	1	2	3	4
Barras	6	9	18	7
Líneas	11	8	17	8
Generador Sinc.	3	3	3	2
Sistema FV	3	3	6	3
Sistemas eólicos	0	2	2	0
Barra slack	101	201	301	401
Topología	Enmallada	Radial	Radial	Enmallada

Finalmente, el *benchmark* de múltiples micro-redes conectadas presenta los siguientes conjuntos de datos:

- Datos de las líneas: se presentan los valores de longitudes, resistencias, reactancias, corriente nominal y corriente de corto circuito para cada una de las líneas. Estos datos se comparten en la Tabla A.3.
- Datos de las cargas: se presentan los valores y ubicaciones de las cargas conectadas a la red, especificando valores de potencia activa y reactiva. Estos valores son presentados tanto para cargas normales y críticas. Estos datos se comparten en la Tabla A.4.
- Datos de generación solar y eólica: se presentan los valores de potencia nominal y potencia reactiva máxima y mínima para este tipo de generación. Estos datos se comparten en la Tabla A.5.
- Datos de generadores sincrónicos: se presentan los valores y ubicaciones de los generadores sincrónicos conectados a la red, especificando valores de potencia aparente y potencia reactiva máxima y mínima. Estos datos se presentan en la Tabla A.6.
- Datos de equipos de almacenamiento: se presentan valores y ubicaciones de los equipos de almacenamiento, especificando las capacidades y *peak* de potencia suministrada. Estos valores se presentan en la Tabla A.7.

### 2.4.3. Campus BCIT Burnaby, Canadá

Este *benchmark* corresponde a una micro-red real presentada en [7], donde los investigadores cuentan con una completa caracterización de la red, la que entra también en la categoría de una red de “Investigación, Desarrollo y Demostraciones” (RB&D por sus siglas en inglés).

La particularidad de esta red, es que cumple con la meta de incentivar la investigación dentro del campus, por lo que los distintos esquemas de control que se proponen implementar no están limitados a simulaciones computacionales, sino que también pueden ser implementadas en los esquemas de control en la operación real de la red.

Esta micro-red esta compuesta por los siguientes subsistemas:

- Subsistema *Smart Home*: edificación capacitada para abastecer su consumo a la vez que esta conectada a la red. Cuenta con cargas, medidores inteligentes, panel fotovoltaico de 4 [kW], generador eólico de 5 [kW] y un banco de baterías de Ácido-Plomo de 4 [kWh] de capacidad. La arquitectura con la que se compone el subsistema de *Smart Home* se exhibe en la Figura 2.6.
- Subsistema *Open Access to Sustainable Intermittent Sources* (OASIS): compuesto por paneles fotovoltaicos de 250 [kW] de potencia, bancos de baterías de Ion-Litio con capacidad de 500 [kWh] de almacenamiento, un inversor, 3 cargadores de vehículos eléctricos de nivel 3<sup>11</sup>, junto con cargas misceláneas. La topología es presentada en la Figura 2.7.
- Subsistema de la turbina de generación a vapor: consiste en un generador de turbina a vapor de 250 [kW], un banco de baterías Ion-Litio de capacidad 75 [kWh], un inversor y algunas cargas desconectables. La arquitectura de este subsistema se presenta en la Figura 2.8.
- Subsistema de enlace con edificaciones de la micro-red: se compone por un arreglo de paneles fotovoltaicos con capacidad instalada de 17 [kW], ubicado en el techo de la edificación junto con un medidor encargado de las mediciones de generación solar.

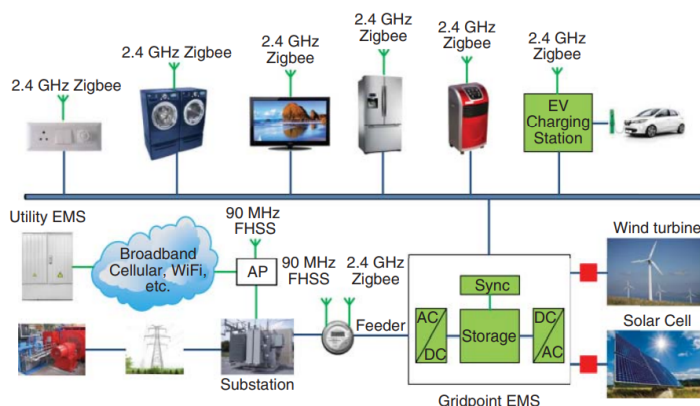


Figura 2.6: Subsistema *Smart Home* en Micro-red de Campus BCIT. Fuente [7].

<sup>11</sup> Este nivel de carga corresponde típicamente al de carga en corriente continua superiores a los 24 [kW] de potencia.

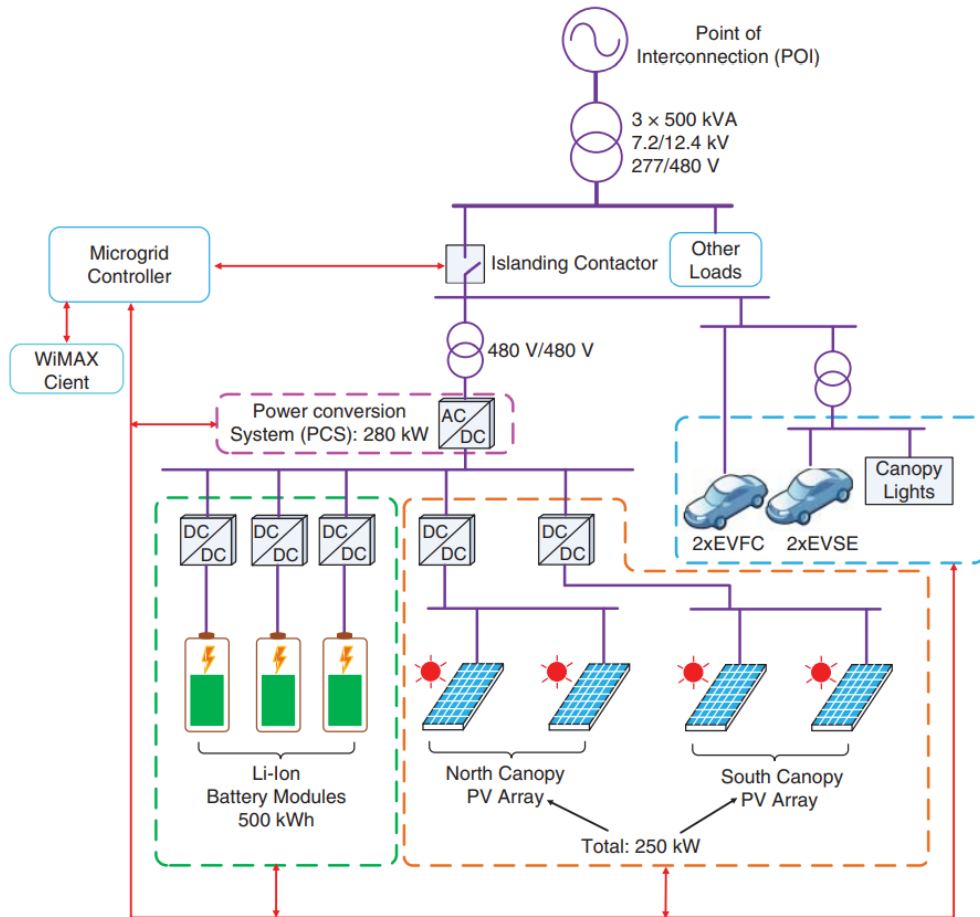


Figura 2.7: Subsistema Oasis en Micro-red de Campus BCIT. Fuente [7].

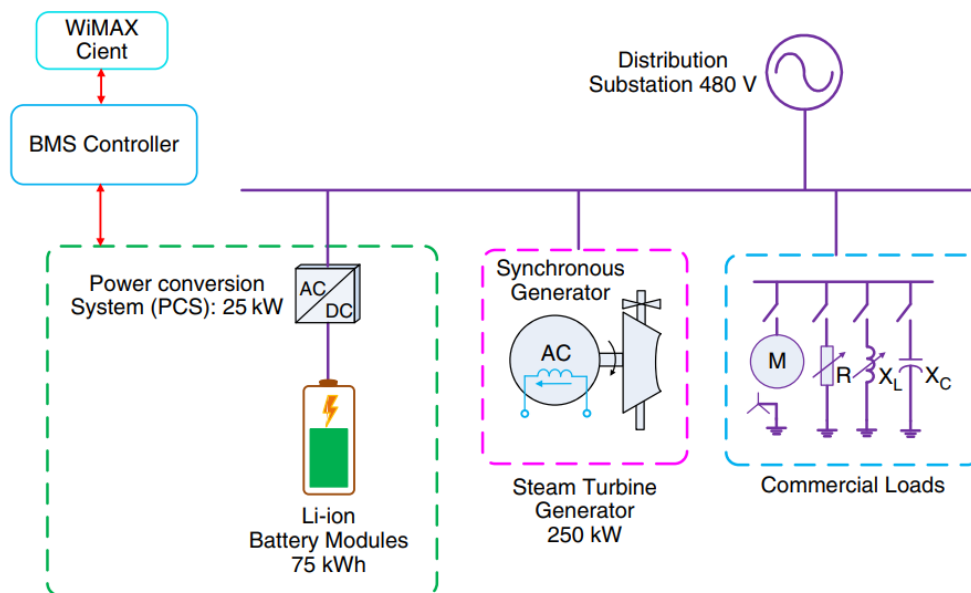


Figura 2.8: Subsistema de turbina a vapor en Micro-red de Campus BCIT. Fuente [7].

## 2.5. Metodología para la creación de un *benchmark* en sistemas de potencia.

Actualmente, no existen metodologías para la generación de micro-redes *benchmark* en específico, por lo que se toma como referencia el trabajo realizado en [5], el que describe detalladamente los pasos y consideraciones necesarias para poder generar una red *benchmark* de un sistema eléctrico de potencia. Esta metodología culmina en una red *benchmark* que cumpla con los requisitos propuestos por los diseñadores de la metodología.

Los autores de esta metodología ponen especial énfasis en que debido al continuo desarrollo de la tecnología, así como al sostenido cambio al que están sometidos los sistemas eléctricos de potencia, se necesita una constante extensión y creación de nuevos *benchmark*. Algunos ejemplos de estos cambios son: inserción de generación distribuida y existencia de transformadores controlables de media o baja tensión.

Se requiere que las redes generadas cumplan con una detallada metodología de creación, esto debido a que las redes *benchmark* actuales carecen de tales niveles de detalle. La metodología propuesta se presenta como un diagrama de flujo en la Figura 2.9.

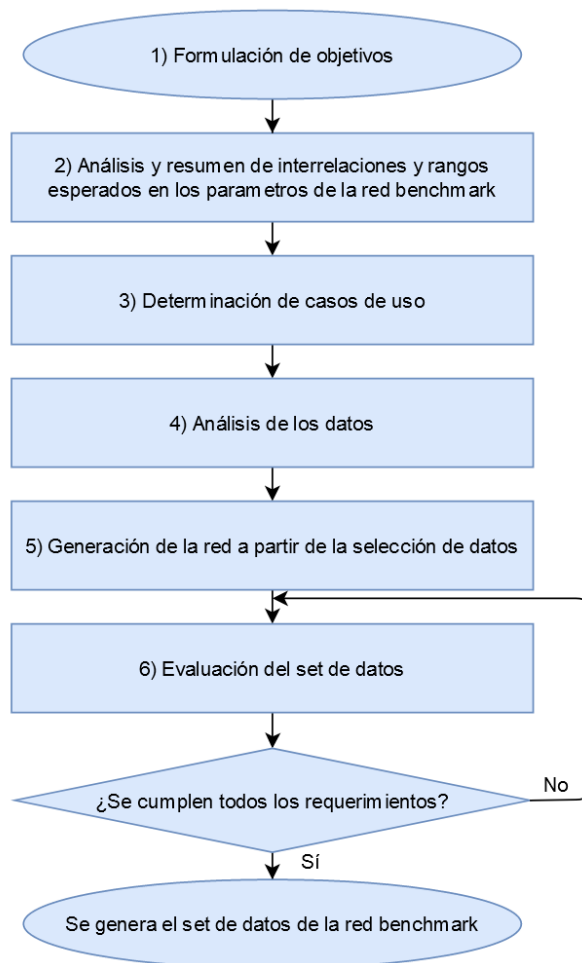


Figura 2.9: Diagrama de flujo para generación de *benchmark* en sistemas de potencia. Fuente: [5].

A continuación, se presenta el detalle de lo que cada etapa del flujo considera.

**1) Formulación de objetivos:** se pretende tener una clara formulación de los objetivos que cumplirá el *benchmark* generado, por lo que se estima la comunidad de usuarios, caracterizando a los posibles interesados en su uso y en cuales son sus necesidades. También se formulan una serie de casos de uso para los cuales el *benchmark* es diseñado. Estos casos de uso pueden ser variados; los principales casos se presentan en la Tabla 2.4.

Antes de concluir el primer paso del diagrama de flujo, se debe considerar el estado actual de la red en conjunto con los cambios futuros que esta pudiese tener. Por ejemplo, la generación de una red en crecimiento que cuente una proyección de aumento en la demanda anual en un porcentaje conocido. Estas caracterizaciones contribuyen a realizar estudios en horizontes de tiempo más amplios, lo que permite, finalmente, realizar análisis con mayor grado de complejidad.

**2) Análisis y resumen de interrelaciones y rangos esperados en los parámetros de la red *benchmark*:** se analizan las influencias presentes en los datos a ocupar, es decir, se deben analizar las características conocidas sobre los datos. Por ejemplo, bandas en las que se posiciona el voltaje en sistemas semejantes.

**3) Determinación de casos de uso, determinar los datos que se ingresarán al *benchmark*:** se deben incluir las manipulaciones aplicadas a estos datos, así como también una pretensión de las variables que resultantes del *benchmark*. Por ejemplo, consignas de generación y estados de apagado o encendido de ciertos equipos de la red.

**4) Análisis de los datos:** se debe realizar un completo análisis de los datos, donde son obtenidas distintas correlaciones y agrupaciones de los datos a ocupar en el *benchmark*. Esto con el propósito de caracterizar y dar conocimiento de las particularidades presentes en el conjunto de datos.

**5) Generación de la red a partir de la selección de datos:** se deben especificar todos los parámetros involucrados en la operación de la red. Por ejemplo, topología, especificaciones de líneas, posicionamiento de los transformadores, entre otros. Existe un sub-flujo detallado para este paso (ver Figura A.2.).

**6) Evaluación del conjunto de datos:** el conjunto de datos propuesto es evaluado bajo criterios y métricas que respalden la validez de los datos. En este paso existe una iteración, puesto que de incumplir las evaluaciones necesarias, se debe volver al paso 5) para actualizar y/o modificar los datos que sean necesarios. En caso de cumplir la evaluación se da por finalizado el flujo y se crea el *benchmark* del sistema de potencia diseñado.

Tabla 2.4: Tipos de casos de uso en *benchmark* en sistemas de potencia.  
Fuente: [5].

Tema	Casos de uso
Operación de la red de transmisión	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Control de voltaje</li> <li>- Control de potencia reactiva</li> <li>- Minimización de pérdidas</li> <li>- Simulaciones de re-despacho</li> <li>- Optimización de la topología</li> </ul>
Operación de la red de distribución	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Control de voltaje</li> <li>- Control de potencia reactiva</li> <li>- Suministro de potencia reactiva</li> <li>- Minimización de pérdidas</li> <li>- Gestión de congestión local</li> <li>- Corte de potencia activa</li> </ul>
Planificación de la red	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Planificación convencional de la red</li> <li>- Innovación en la planificación de la red</li> <li>- Planificación de una red multi-voltaje</li> </ul>
Simulación del sistema	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Estimación de estados</li> <li>- Análisis probabilística del flujo de potencia</li> <li>- Análisis acelerado y modificado del flujo de potencia</li> </ul>

### 2.5.1. Comparación con metodología para *benchmark* de micro-redes

La metodología presentada en la sección 2.5 contiene características replicables para la metodología que se propone llevar a cabo en el presente trabajo de título, a la vez que tiene características no del todo homologables. Las principales incongruencias se encuentran en la generalización de los casos de uso a utilizar, es decir, que los datos presentados en la Tabla 2.4, si bien considera temas generales, estos no son adecuados para los casos de uso que serían utilizados en una micro-red aislada o conectada<sup>12</sup>.

Otra razón por la que se debe realizar una metodología de generación exclusiva de *benchmark* de micro-redes, es la falta de consideración de una referencia técnica en la cual se enmarque la red generada, debido a que diversos marcos técnicos existentes en los sistemas eléctricos del mundo condicionan los atributos esperados en la red generada. Por ejemplo, existen diferencias considerables entre las redes de distribución norteamericanas y las europeas<sup>13</sup>, donde en las primeras se suministra al usuario final de manera trifásica, en cambio en las redes más comunes de Europa los usuarios finales tienen alimentación de forma monofásica (al igual que en Chile).

<sup>12</sup> Los casos de uso típicos en *benchmark* de micro-redes son presentados en la Tabla 2.1.

<sup>13</sup> Se contemplan diferencias generales, un caso de comparación específico entre ambas configuraciones es presentado en la Figura A.3

Posteriormente, se detecta un anacronismo en la caracterización de la red, pues hace falta una caracterización de la comunidad a la que pretende pertenecer la red. Esto es válido cuando hablamos de redes *benchmark* realizadas sobre un red existente, cómo los vistos en la Sección 2.4.3. Esta oportunidad de mejora cobra especial importancia en el aspecto de una metodología específica de micro-redes aisladas, ya que al tener que autoabastecer su demanda en todo momento, una completa caracterización de la demanda (hábitos y dinámicas de la comunidad), conduce a obtener resultados ajustados a los que se esperarían tener en la red, capturando a su vez la esencia de que cada comunidad detrás de una micro-red aislada es distinta y es importante conocer sus realidades y comportamientos.

Finalmente, se hace mención que esta metodología presenta un flujo de pasos que deben ser considerados para la confección del presente trabajo de título, haciendo la salvedad de que la metodología propuesta debe contener los datos y descripciones que caracterizan a cada micro-red aislada. También se debe reestructurar los casos de uso, adecuándolos a los presentes en micro-redes. Los análisis a estos nuevos datos deben ser contrastados de manera local, es decir, con normas técnicas nacionales. Además, como se menciona en la Sección 2.3.1, los datos a ocupar deben cumplir criterios de evaluación específicos según su método de obtención, ya sea estocástico o determinístico.



# Capítulo 3

## Diseño de una metodología para la generación de redes *benchmark* de micro-redes aisladas

El presente capítulo está enfocado en el planteamiento de la metodología para la generación de redes *benchmark* de micro-redes aisladas. De manera que se pueda abarcar cada uno de los componentes de la metodología propuesta. Se presenta en un inicio de una manera general y, posteriormente, se discute en detalle cada uno de sus componentes. Finalmente, se discuten los procesos realizados durante el diseño de la metodología.

### 3.1. Metodología propuesta

La metodología propuesta utiliza como referencia el flujo de trabajo presentado en la Figura 2.9, publicado en [5]. Esta propuesta se complementa con las lecciones aprendidas en la operación de la micro-red de Huatacondo, presentada en [12], junto con los conocimientos impartidos en el curso de “Micro-redes y generación distribuida”<sup>14</sup>.

Esta metodología tiene el fin de guiar al diseñador del *benchmark* desde instancias iniciales, como lo son la recopilación de características generales de una micro-red, hasta los últimos pasos que concluyen con la generación de la micro-red *benchmark*. Además, se incorporan a esta metodología diversos métodos de evaluación para la calidad de los datos a utilizar.

La metodología propuesta se presenta en la Figura 3.1.

---

<sup>14</sup> Curso de código EL7045, impartido en la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas en la Universidad de Chile.

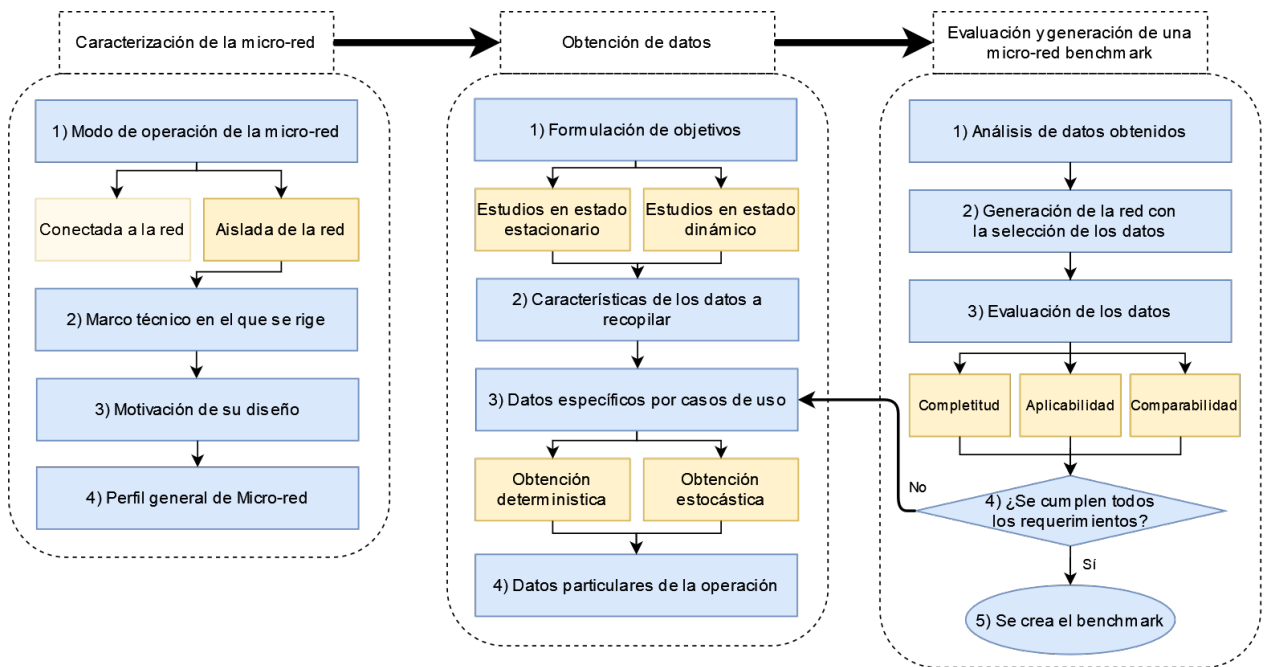


Figura 3.1: Metodología propuesta para la generación de micro-redes *benchmark* del tipo aisladas.

Dentro de la Figura 3.1 se destacan los 3 bloques principales:

1. Caracterización de la micro-red.
2. Obtención de datos.
3. Evaluación y generación de una micro-red *benchmark*.

A partir de los bloques propuestos, se plantea el seguimiento secuencial de la metodología, es decir que los pasos deben ser completados de manera que se siga el flujo propuesto. El término de un bloque principal es logrado, cuando cada una de sus etapas es completada. Posteriormente, se da continuación al flujo de trabajo del siguiente bloque principal. El fin de tener esta secuencia es que en pasos posteriores, como evaluaciones de los datos generados, se cumplan con los requerimientos previamente propuestos en la metodología.

En las siguientes secciones se especifican las acciones propuestas por cada uno de los bloques principales.

### 3.1.1. Caracterización de la micro-red

En este primer bloque se comienza con la elección de una micro-red del tipo aislada, para posteriormente dejar explícitas las normas técnicas bajo las que se rige la micro-red a generar. La iteración sigue con la recolección de información correspondiente a la motivación del diseño de la micro-red *benchmark*. Posteriormente, se obtiene un perfil completo de las características presentes en la micro-red a generar.

A continuación, se explican en detalle los pasos internos del bloque “Caracterización de la micro-red”:

**1) Modo de operación de la micro-red:** se aclara la operación de la micro-red *benchmark* a generar. Para el diseño de esta metodología se restringe esta elección a micro-redes aisladas.

**2) Marco técnico en el que se rige:** se especifican los marcos técnicos que rigen sobre la micro-red y los parámetros con los que cuenta. Por ejemplo: limitaciones de tensión, tiempos de despeje de fallas, niveles de sobre corriente, entre otros<sup>15</sup>.

**3) Motivación de su diseño:** se explica el trasfondo con el que se crea el *benchmark*, comentando sobre los datos en particular que se quieren compartir y los aportes que se planean realizar. Se dan los siguientes ejemplos de motivaciones: plasmar dinámicas de consumo en comunidades particulares [41], compartir novedosos sistemas de protecciones [42], publicar micro-redes *benchmark* con topologías distintas [43], entre otras.

**4) Perfil general de la micro-red:** se sintetizan las caracterizaciones anteriores. Es criterio del diseñador el agregar las características que le permitan tener una caracterización aún mayor de la micro-red a generar. Se dan los siguientes ejemplos de características complementarias: locación de la red, climas bajo los que opera, entre otros.

Finalmente, se obtiene un conjunto de características de la micro-red *benchmark*, estas características complementan y dan contexto a la realización de los siguientes pasos iterativos.

---

<sup>15</sup> Para el caso de operación chileno, estos parámetros pueden ser obtenidos desde la “Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio” [40].

### 3.1.2. Obtención de datos

El segundo bloque de la metodología propuesta se enfoca en la “Obtención de datos”, por lo que secuencialmente se formulan los objetivos que pretende cumplir el *benchmark* generado. Posteriormente, se especifican las características de los datos a recopilar, luego se toman los datos específicos para los objetivos formulados y, finalmente, se consideran los datos particulares con los que opera la micro-red *benchmark*.

A continuación, se explican en detalle los pasos internos del bloque “Obtención de datos”:

**1) Formulación de objetivos:** se formulan los objetivos específicos que el conjunto de datos generado pretende cumplir, por lo que se debe dejar explicitado el conjunto de variables requeridas para dicho objetivo. Un ejemplo de los objetivos son los estudios de estado estacionario o dinámico sobre la micro-red *benchmark*. Tipos de estudios existentes en micro-redes son presentados en la Tabla 2.1. Además, un ejemplo de las variables necesarias para los objetivos son los niveles de tensión en las distintas barras para estudios de control de voltaje<sup>16</sup>.

**2) Características de los datos a recopilar:** se identifican las características de los datos a recopilar con el fin de detectar patrones o ciertas anomalías en los datos, lo que posteriormente facilitaría el análisis de los mismos. Se ejemplifican las siguientes características de datos: tipos de demanda, valores reglamentarios de frecuencia-tensión y tipos de líneas, entre otros<sup>17</sup>.

**3) Datos específicos por casos de uso:** se desarrolla lo discutido en la Sección 2.3.1, tratándose de las posibles maneras de obtención de los datos necesarios para la generación de una micro-red *benchmark*. Este paso surge debido a la posibilidad de que no existan los datos reales necesarios, causando que estos deban ser obtenidos a partir de otras fuentes<sup>18</sup>. Posteriormente, se recopilan los datos necesarios para la generación de la micro-red *benchmark* según las alternativas existentes, dejando explícita su fuente de obtención.

**4) Datos particulares de la operación:** se comparten los datos particulares en la operación de esta micro-red. Un ejemplo de datos particulares, son las condiciones de operación anormal a las que puede estar sometida la micro-red en determinadas fechas o condiciones.

El término de la “Obtención de datos”, permite al diseñador continuar con el bloque final “Evaluación y generación de una micro-red *benchmark*”.

---

<sup>16</sup> Otros tipos de variable pueden ser: cantidad de barras en la red, topología, niveles de demanda y perfiles de generación, entre otros.

<sup>17</sup> Existen similitudes con paso “marco técnico bajo el que se rige la red”, pero en este paso se pretende dejar explícitas las características según los datos que se vayan a utilizar según los objetivos planificados con anterioridad, por lo que pretende ser más específica.

<sup>18</sup> Esta última alternativa de obtención de datos, toma más relevancia mientras menos datos sean compartidos para el diseño de la micro-red en cuestión, pudiendo extrapolar esta situación hasta la utilización de datos completamente estocásticos en la generación de una micro-red *benchmark*.

### 3.1.3. Evaluación y generación de una micro-red *benchmark*

En el tercer y último bloque de la metodología propuesta, se considera la realización de análisis y evaluaciones de los datos a utilizar. Este bloque de la metodología culmina con la generación del *benchmark*.

A continuación, se explican en detalle los pasos internos del bloque “Evaluación y generación de una micro-red *benchmark*”:

**1) Análisis de datos obtenidos:** se realiza un análisis exhaustivo de los datos recopilados, donde se puede utilizar el apoyo de la identificación de características en los datos recopilados, realizada en el bloque anterior. En esta parte de la metodología se recomienda identificar correlaciones entre las variables; adicionalmente, se pueden encontrar grupos o *clusters* en los comportamientos de los datos. Un ejemplo de esta práctica es hallar agrupaciones *clusters* de distintos usuarios debido a comportamientos de consumo energético.

**2) Generación de la red con la selección de datos:** se realiza la generación de la micro-red con los datos seleccionados ya analizados, donde esta red puede contar con una o más topologías (dependiendo de la información disponible).

**3) Evaluación de los datos:** se evalúan los datos generados a partir de las siguientes 3 métricas propuestas:

- **Complejidad:** se evalúa la complejidad en los datos a presentar, es decir, que para el periodo de tiempo que considere la operación de la micro-red, esta cuente con datos para cada muestra del periodo mismo. Se puede ejemplificar con el caso de un *benchmark* que considere datos de demanda en un mes particular, donde algunos días no cuenten con datos. En dicho caso los datos presentados no contarían con una complejidad en su información.
- **Aplicabilidad:** la aplicabilidad de los datos responde a que los datos y sus características sean coherentes con la aplicación a la que sean sometidos. Un ejemplo es la naturaleza de la frecuencia en una red, que debe ser coherente para todos los elementos de la misma, por lo que si se comparte información sobre elementos que operen a distintas frecuencias, estos podrían no ser aplicables dentro de la micro-red *benchmark*.
- **Comparabilidad:** las comparaciones que se puedan realizar sobre el *benchmark*, dependen fuertemente de las características que esta micro-red comparta con otras redes publicadas. Estas comparaciones podrían no ser factibles si es que la red generada cuente con características excesivamente únicas. Se pone como ejemplo una micro-red con niveles de generación muy altos, lo que puede resultar en la incomparabilidad de la red generada con otras ya publicadas.

**4) ¿Se cumplen todos los requerimientos?:** posterior a la evaluación de los datos se deben tomar acciones correctivas si es que incumple con alguna de las métricas propuestas o con la formulación de objetivos realizada; esta corrección se hace retrocediendo al paso “3)

Datos específicos por caso de uso” donde se deben obtener datos que cumplan con la metodología y que también cumplan con las métricas propuestas en el paso anterior. Finalmente, si los requerimientos se cumplen se procede con la creación del *benchmark*.

5) **Se crea el *benchmark***: se culmina la metodología con la creación de la micro-red *benchmark* de tipo aislada. Se debe tener en consideración la correcta publicación de todos los datos utilizados y necesarios para el uso del *benchmark*; se recomienda el uso de repositorios en línea.

## 3.2. Discusión

La metodología propuesta, si bien pretende ser aplicable para el caso exclusivo de micro-redes aisladas, esto puede ser adaptado en iteraciones futuras donde se logre identificar todas las medidas necesarias para caracterizar una micro-red *benchmark* conectada a la red. Esto es posible debido a que los bloques 2 y 3 consideran una obtención de datos concorde a los objetivos específicos, por lo que solo es necesario cambiar la estructura del primer bloque de la metodología propuesta.

El primer bloque de la metodología si bien propone una caracterización de la micro-red a generar, también sirve para dejar fijada información importante que corresponda a los datos técnicos de operación requeridos en los bloques 2 y 3. Esta información sirve para dar contexto a lo que la micro-red *benchmark* propone y para lo que es ideada.

El segundo bloque de la metodología corresponde a la iteración donde los datos son obtenidos. Esta parte de la metodología cuenta con pasos que permiten la generación de datos útiles y afines con los propósitos del *benchmark*. En este bloque se destaca el trabajo previo que existe antes del paso "Datos específicos por casos de uso", donde los objetivos del *benchmark* son formulados, así como quedan explícitas las características de los datos recopilados (pasos 1 y 2 del bloque 2). Por lo que los datos obtenidos están sometidos a criterios que corroboran la pertinencia con respecto a los requisitos planteados.

En el tercer y último bloque de la metodología es evaluado el *benchmark* confeccionado y, posteriormente, su generación. En este paso de la metodología se pone atención en la consideración que se tiene de retroceder al bloque 2 en caso de ser negativas las evaluaciones sobre la micro-red a generar. Esta parte del bloque permite obtener o actualizar los datos obtenidos en el bloque 2 para que las evaluaciones posteriores sean positivas, por lo que, finalmente, se obtienen los datos que permiten la correcta generación de una micro-red *benchmark*.

Finalmente, es presentada una metodología con las herramientas necesarias para confeccionar una micro-red *benchmark* del tipo aislada que cuente con variados criterios para la obtención de sus datos, así como evaluaciones sobre los mismos. El orden de la metodología presentada pretende tener la coherencia de ir desde características generales de la micro-red y, posteriormente, a datos específicos de la misma, culminando con las evaluaciones y generaciones del *benchmark* propuesto.

# Capítulo 4

## Aplicación de la metodología a la micro-red ESUSCON

En el presente Capítulo se plantea generar una micro-red *benchmark* del tipo aislada, siguiendo los pasos incluidos en la metodología diseñada en el Capítulo 3. La estructura de este Capítulo es la siguiente:

1. Caracterización de la micro-red *benchmark* a generar.
2. Obtención de datos necesarios para generación de micro-red *benchmark*.
3. Evaluación y generación de la micro-red *benchmark* ESUSCON.
4. Discusión sobre el *benchmark* generado.

### 4.1. Caracterización de la micro-red *benchmark* a generar

#### 4.1.1. Modo de operación de la micro-red *benchmark*

La micro-red *benchmark* de ESUSCON a generar, es del tipo aislada pues así es la operación real de la micro-red que se quiere replicar puesto que esta diseñada para este modo de operación<sup>19</sup>.

#### 4.1.2. Marco técnico en el que se rige la micro-red *benchmark*

El marco técnico bajo el cual se rige la operación de este *benchmark*, es que esta red sea del tipo trifásica, alimentando a los consumos por una única salida monofásica. La operación de la red es en 220/380 [V] en la tensión de consumo y distribución, respectivamente. Esta red es catalogada como una micro-red aislada de bajo voltaje con líneas del tipo aéreas. Finalmente, la frecuencia de operación en el sistema eléctrico es de 50 [Hz].

---

<sup>19</sup> El contexto en la operación de la micro-red ESUSCON es explicada en mayor detalle en la Sección 1.3.

### 4.1.3. Motivación en el diseño de la micro-red *benchmark*

La motivación en la generación de esta micro-red *benchmark*, es el aprovechamiento de la gran cantidad de datos generados en los casi 9 años en los que el equipo interdisciplinario<sup>20</sup> de la Universidad de Chile llevó a cabo el diseño y operación de la micro-red de Huatacondo, llamado por la misma comunidad ESUSCON.

Otra motivación, es obtener un mayor aprovechamiento de todas las lecciones aprendidas y documentaciones realizadas en el transcurso del proyecto ESUSCON. Debido al amplio trabajo que fue realizado por el equipo ESUSCON, existe una gran cantidad de información sobre la operación, fallas, disconformidades, eventos y crecimiento en el sistema eléctrico de la comunidad de Huatacondo.

Con el presente trabajo se pretende otorgar un valor agregado al trabajo realizado por estudiantes, ingenieros y profesores en el diseño y operación de la micro-red presente en Huatacondo.

### 4.1.4. Perfil general de la micro-red *benchmark*

La red eléctrica de Huatacondo corresponde a una micro-red del tipo aislada que suministra energía eléctrica a cerca de 100 personas<sup>21</sup>, con el fin de abastecerlas de electricidad las 24 horas del día. Su ubicación geográfica se presenta en la Figura 4.1 junto con las comunas aledañas.

Esta micro-red fue implementada en 2010 y sigue en operación hasta el día de hoy. A partir del historial de operación se tiene acceso a los datos desde marzo 2014 hasta marzo 2019, por lo que se puede crear un *benchmark* con datos actualizados de las demandas junto con el crecimiento histórico. Una vista de la red de distribución es presentada en la Figura 4.2.

Finalmente, se debe contar con la información vista en la Tabla 1.1, además de explicar en primera instancia cierta particularidad de la red, que si bien cuenta con un aerogenerador este, en la práctica, inyecta un muy bajo porcentaje de su potencia nominal<sup>22</sup>, por lo que su relevancia en el sistema eléctrico es ínfima.

---

<sup>20</sup> Este equipo de profesionales contaba con académicos de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas y de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile, además de profesionales del área de Ingeniería Civil Eléctrica e Ingeniería en Recursos Renovables.

<sup>21</sup> Esta cantidad va variando a lo largo de un mismo año, debido a eventos y población viajante.

<sup>22</sup> Esta información se presenta en la disponibilidad de recurso eólico en la Sección 4.2.6.



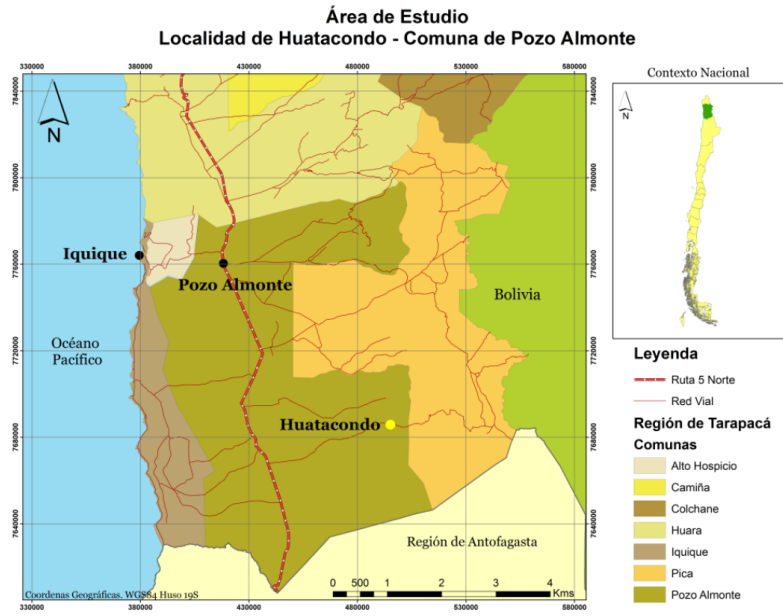


Figura 4.1: Contexto geográfico Huatacondo. Fuente: [14].

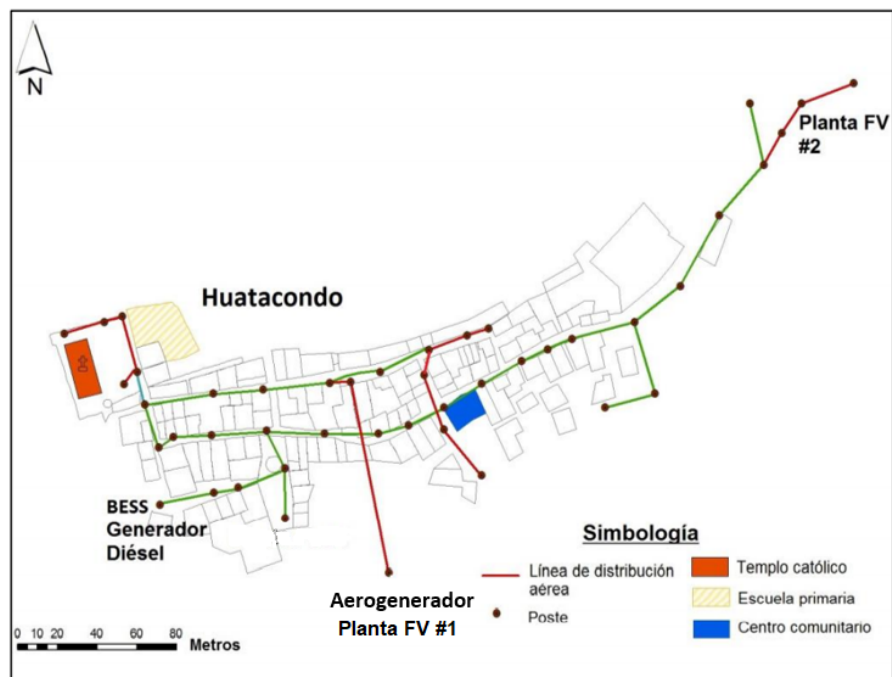


Figura 4.2: Red de distribución disponible en Huatacondo. Fuente: : [14].

## 4.2. Obtención de datos necesarios para generación de la micro-red *benchmark*

### 4.2.1. Formulación de objetivos

El *benchmark* a generar, se formula bajo los siguientes objetivos<sup>23</sup>:

- Estudios de planificación de arquitectura.
- Estudios de administración de energía.
- Estudios de flujo de potencia.
- Estudios de confiabilidad de suministro.
- Estudios de resiliencia de la red.

Para el conjunto de estudios propuestos se requieren diversos parámetros para poder generar una micro-red *benchmark* adecuada. Los parámetros necesarios se presentan a continuación:

- Topología de la red.
- Perfiles de demanda.
- Cargas dentro de la red.
- Unidades de generación y almacenamiento en la red.
- Parámetros de las líneas de distribución.
- Perfiles de generación.
- Eventos de falla y/o alteraciones.

Se procede a presentar los conjuntos de datos en el orden que se mencionan. Se esclarece que algunos conjuntos de datos, como lo son los perfiles de demanda en un año, tienen un tamaño del orden de los 35.040 datos por lo que este trabajo se limita a presentar un resumen de estos<sup>24</sup>.

Los datos disponibles para la generación de la micro-red *benchmark* se componen por 27 atributos, entre los que destacan las potencias activas y reactivas de: generación solar, generación eólica, inversor de las baterías y generación Diésel. El total de atributos es presentado en la Tabla A.8.

Posteriormente, el conjunto de datos disponible cuenta con una resolución temporal de un minuto para los años mencionados, donde existen vacíos en los registros debido a variadas

---

<sup>23</sup>Se mencionan temas de estudios de carácter estacionario por la correspondencia que estos tienen a los datos disponibles de ESUSCON. Estudios dinámicos requieren en general, parámetros certeros de todos los equipos que participan en una red eléctrica influyendo en su dinámica propia.

<sup>24</sup>La completitud de los datos es publicada en el repositorio adjunto: <https://github.com/OscarDorner-UCH/ESUSCON-Isolated-Microgrid-Benchmark..>

causas, cómo lo son la interrupción del sistema SCADA de ESUSCON. En la Tabla 4.1 se presentan la cantidad de tuplas<sup>25</sup> para cada año de operación utilizado.

Tabla 4.1: Cantidad de tuplas y tamaños de los archivos de operación en red ESUSCON.

Año	Cantidad de tuplas	Tamaño [MB]	Representación anual [%]
2014	421.919	128,14	80,27
2015	524.160	114,91	99,73
2016	385.920	93,82	77,22
2017	357.120	154,61	67,95
2018	472.320	200,62	89,86
2019	74.880	25,90	14,25

El *benchmark* generado contempla un conjunto de datos con una resolución temporal de 15 minutos, esta decisión se basa en que esta resolución permite confeccionar un conjunto de datos más acotado, por lo que el tratamiento que se aplique a estos datos no requieran una alta capacidad computacional en su procesamiento. Además de ser una resolución que permite la realización de los objetivos ya formulados.

Finalmente, se puede observar que en todos los años existen valores faltantes en los datos recopilados, por lo que se propone estimar de forma estocástica las tuplas restantes para obtener un *benchmark* con completitud en el conjunto de datos. El método de obtención de datos es compartido en la Sección B.1.

#### 4.2.2. Topología de la micro-red

La topología generada para la micro-red *benchmark* ESUSCON se basa en la red de distribución real presentada en la Figura 4.2, así como también considera la distribución de la demanda vista en la Figura B.5.

La topología generada es exhibida en la Figura 4.3.

---

<sup>25</sup> Una tupla es una secuencia de valores agrupados.

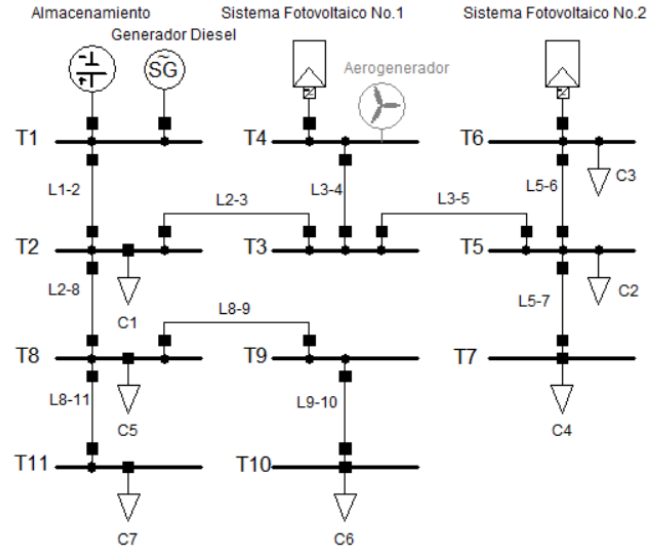


Figura 4.3: Esquemático de la micro-red *benchmark* ESUSCON.

Posteriormente, los detalles de la micro-red *benchmark* se presentan en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2: Recuento de equipos en micro-red *benchmark* ESUSCON.

Componente	Valor
Barras	11
Líneas	10
GenDiesel	1
Sistema FV	2
Aerogenerador	1
Topología	Radial

### 4.2.3. Perfiles de demanda

Los perfiles de demanda existentes en la micro-red real de Huatacondo son obtenidos a partir de los datos resumidos en la Tabla 4.1, en la que se propone que la demanda debe ser representada por la ecuación 4.1.

$$Demanda_{total} = Iny.Solar + Iny.Eolica + Iny.Diesel * 10^{-3} + Iny.Baterias \quad (4.1)$$

Donde:

- $Demanda_{total}$ : demanda completa de la localidad de Huatacondo expresada en potencia activa [kW].
- $Iny.Solar$ : inyección solar, medida en el poste 40 de la red de distribución<sup>26</sup>. Valor en potencia activa [kW].

<sup>26</sup> En la Sección B.2 se presentan las correspondencias entre los postes de la red de distribución y los atributos entregados por el sistema de adquisición de datos.

- *Iny.Eolica*: inyección del aerogenerador, es medido en el poste 40 de la red de distribución. Valor en potencia activa [kW].
- *Iny.Diesel*: Inyección del grupo electrógeno, es medido en el poste 24 de la red de distribución. Valor en potencia activa [W].
- *Iny.Baterias*: inyección del grupo de almacenamiento, es medido en el poste 24 de la red de distribución. Este componente puede inyectar energía a la red (valor positivo en la ecuación), o absorbiendo energía (valor negativo) cuando el grupo de almacenamiento se encuentre en modo de carga. Valor en potencia activa [kW].

Con la ecuación 4.1 se obtienen los valores de manera determinística para la demanda en Huatacondo, a estos valores se les debe aplicar el proceso planteado en la Sección B.1 para lograr una representación completa de los datos anuales en el período de operación de la micro-red.

A modo general, se presentan los datos de consumos totales para los años entre el 2014 y 2019, diferenciando los datos reales y los datos estimados en la micro-red. Estos resultados se exhiben en la Figura 4.4

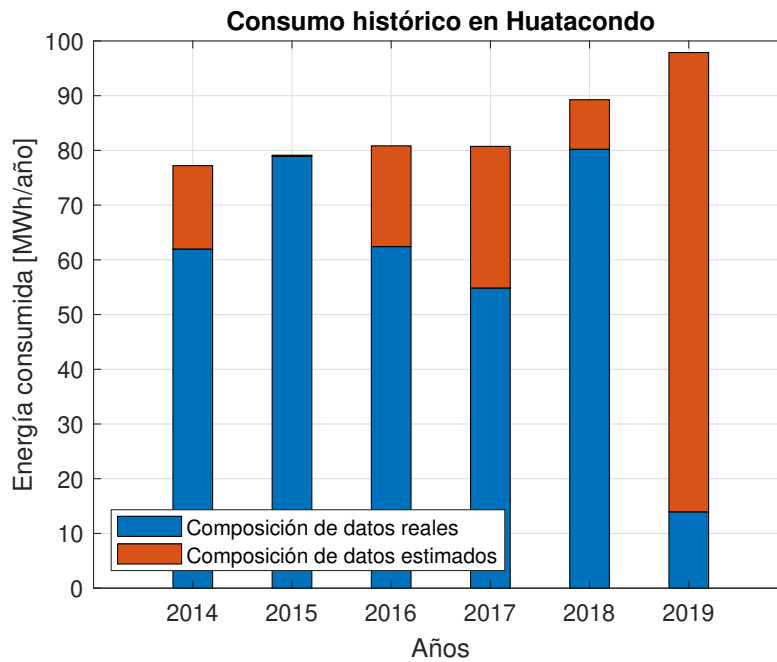


Figura 4.4: Demanda histórica de Huatacondo

Con respecto a la evolución histórica de la demanda en Huatacondo, la Figura 4.4 permite ver el constante crecimiento de la demanda anual. Si bien existe una alta demanda con respecto a años anteriores al 2019, este valor es casi un 85 % estimado, por lo que se debe tener en consideración al momento de concluir o hacer aseveraciones sobre los resultados que esta estimación pueda conllevar.

El conjunto de datos de demanda en Huatacondo es compartida en el repositorio adjunto, por lo que en este capítulo se exhibe un resumen del comportamiento de la demanda en la

comunidad de Huatacondo. En la Tabla 4.5 se presentan los perfiles de consumo promedio para las distintas estaciones del año 2018<sup>27</sup>.

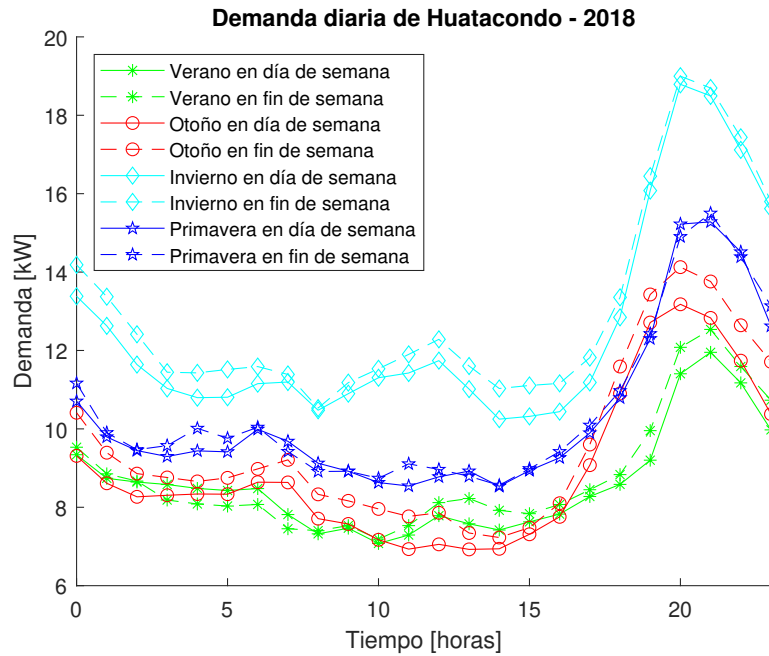


Figura 4.5: Perfiles de demanda para las distintas estaciones de 2018 en Huatacondo.

Se observa desde la Figura 4.5 que la demanda se ve incrementada notablemente en la estación de invierno, en conjunto con un aumento sostenido en cada una de las estaciones después de las 16:00 horas. Posteriormente, se ve que la comunidad de Huatacondo tiende a incrementar su consumo eléctrico los fines de semana.

Finalmente, los datos presentados en la Figura 4.5 en conjunto con los de años restantes, son presentados en las Figuras A.4, A.5 y A.6.

#### 4.2.4. Cargas dentro de la red

La distribución de cargas dentro de la micro-red se presenta en el esquemático exhibido en la Figura 4.3. Se consideran las aglomeraciones de demanda presentes en la Figura B.5, la fijación de la matriz de participación<sup>28</sup> en el consumo es explicado en la Sección B.3.

Finalmente, distribución de las cargas en conjunto con su participación a la demanda se presentan en la Tabla 4.3.

<sup>27</sup> Es elegido por ser el año más actual junto con una cantidad de datos mayoritariamente reales. De igual manera siguen disponibles los datos de años restantes.

<sup>28</sup> Esta matriz debe estar representada en porcentaje, debido a que los datos de operación reales no permiten hacer un análisis al detalle sobre cada una de las áreas de consumo.

Tabla 4.3: Distribución de cargas y su participación en la demanda.

Carga	Barra	Participación [%]
C1	T2	27,59
C2	T5	13,79
C3	T6	13,79
C4	T7	6,90
C5	T8	17,24
C6	T10	13,79
C7	T11	6,90
Total		100,00

#### 4.2.5. Unidades de generación y almacenamiento en la red

Las unidades de generación con las que cuenta la micro-red *benchmark* ESUSCON, son catalogadas como generación distribuida debido a su naturaleza de utilización en una micro-red aislada.

La disposición de las unidades generadoras, junto con sus parámetros asociados se presentan en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4: Disposición de unidades generadoras en la micro-red *benchmark* ESUSCON.

Barra	Tipo de GD	Pot. Nominal	Unidad
T1	GenDiesel	120	[kVA]
T4	Fotovoltaica	22,68	[kWp]
T6	Fotovoltaica	3	[kWp]
T8	Aerogenerador	3	[kWp]

La disposición del grupo de almacenamiento junto a la tecnología de su composición, se exhibe en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5: Almacenamiento disponible en la micro-red *benchmark* ESUSCON.

Barra	Tipo de almacenamiento	Capacidad de almacenamiento [kWh]	Potencia de suministro [kVA]
T1	Plomo-Ácido	140	40

#### 4.2.6. Perfiles de generación

En la obtención de los perfiles de generación de la micro-red *benchmark* ESUSCON, se trabaja sobre los siguientes datos sobre la operación real presentados en la Tabla A.8:

- Generación solar de activos y reactivos.

- Generación eólica de activos y reactivos.
- Generación diésel de activos y reactivos.
- Inyección del inversor del conjunto de baterías en activos y reactivos<sup>29</sup>.

A continuación se exhiben los perfiles de generación solar y eólica, para el año 2018<sup>30</sup> en cada una de sus estaciones en la Figura 4.6. De la misma manera, se comparten los perfiles de la generación diésel y del inversor de las baterías en la Figura 4.7.

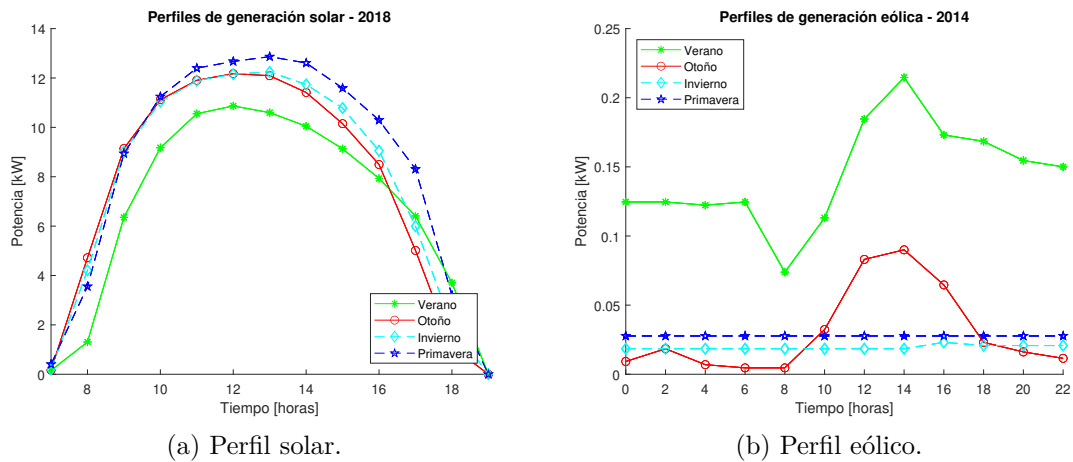


Figura 4.6: Perfiles de generación solar y eólica en los años 2018/2014.

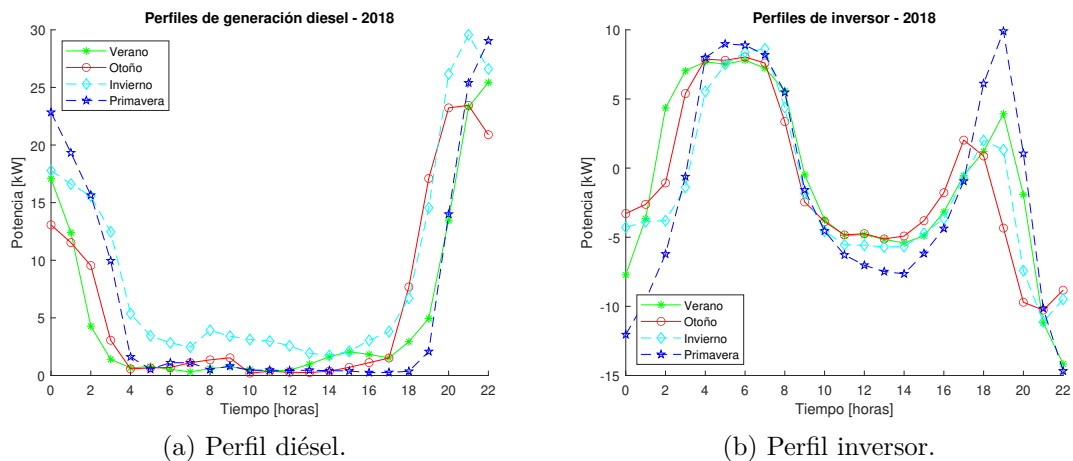


Figura 4.7: Perfiles de generación diésel e inversor en el año 2018.

<sup>29</sup> Este valor puede ser positivo o negativo, dependiendo de si esta en modo descarga o carga, respectivamente.

<sup>30</sup> El perfil de generación eólica corresponde a los datos del 2014, debido a que para años posteriores la micro-red no cuenta con este tipo de generación.



#### 4.2.7. Parámetros de las líneas de distribución

Los parámetros de las líneas son exhibidos en la Tabla 4.6. Estas líneas representan una aproximación de la red de distribución real, la cual es planteada en la Figura 4.2.

Tabla 4.6: Parámetros de líneas en la micro-red ESUSCON

Línea	R [Ohm/km]	X [Ohm/km]	Longitud [km]
L1-2	0.372	0.0890	0.0910
L2-3	0.744	0.093	0.068
L3-4	1.010	0.097	0.178
L3-5	0.744	0.093	0.025
L5-6	1.010	0.097	0.044
L5-7	0.744	0.093	0.229
L2-8	0.744	0.093	0.084
L8-9	1.010	0.097	0.148
L8-11	1.010	0.097	0.037
L9-10	1.010	0.097	0.089

Estos datos son extraídos de [44], donde se especifica que los parámetros son obtenidos a partir de entrevistas hacia el operador de la micro-red de Huatacondo.

#### 4.2.8. Eventos de falla y/o alteraciones

Los eventos de falla y alteraciones en la operación de la micro-red ESUSCON, son obtenidos a partir de los informes de falla generados por el equipo encargado. Estos documentos esclarecen el tipo de falla, los dispositivos afectados y la solución otorgada.

La Tabla 4.7 muestra la fallas acontecidas en la micro-red de Huatacondo desde 2014 hasta 2019.

Tabla 4.7: Fallas ocurridas en Huatacondo.

Fecha incidente	Elemento dañado	Pérdida de Carga [kWh]	Duración [días]
24 mayo 2014	Aerogenerador	3	No fue reparado
14 de agosto 2014	Módulo Fotovoltaico A1	1500	150
1 abril 2015	Inversores de FV	240	2
23 febrero 2016	Convertor batería	N/A	22
19 marzo 2016	Módulo Fotovoltaico C1	50	5
31 enero 2018	Inversor de FV	9000	75

Se debe hacer mención de que las magnitudes en la pérdida de carga corresponden a estimaciones de lo que el dispositivo dañado dejó de generar a causa de la falla. Estos eventos

deben ser considerados para las simulaciones realizadas, dado que los datos publicados están sujetos a estos eventos.

Posteriormente, los periodos donde se altera la demanda debido a festividades se presentan en la Tabla 4.8.

Tabla 4.8: Eventos anuales celebrados en Huatacondo.

Mes	Evento	Alteración
Enero	Invierno boliviano	Reducción de 20 % de la población
Febrero	Invierno boliviano y carnaval	Reducción del 20 % y por 3 días se duplica la población
Marzo	No hay evento	No hay alteración
Abril	Semana Santa	Por duración de evento se duplica la población
Mayo	Las Cruces	Por duración de evento hay 300 personas
Junio	No hay evento	No hay alteración
Julio	La Tirana	Por duración de evento se duplica la población
Agosto	Asunción de la Virgen	Por duración de evento hay 400 personas
Septiembre	Fiestas Patrias	Por duración de evento se duplica la población
Octubre	No hay evento	No hay alteración
Noviembre	No hay evento	No hay alteración
Diciembre	Navidad y Año Nuevo	Por duración de eventos se duplica la población

Los eventos presentados en la Tabla 4.8 en conjunto con las alteraciones que estas conllevan son extraídas del trabajo presentado en [45].

### 4.3. Evaluación y generación de la micro-red *benchmark* ESUSCON.

#### 4.3.1. Análisis de datos obtenidos

Los datos obtenidos sobre la operación de la micro-red, inicialmente, son analizados con respecto a 8 atributos de operación, por lo que se revisan las correlaciones presentes en sus variables. El análisis se realiza con el fin de poder identificar patrones esperados en la operación de la micro-red *benchmark*.

El análisis de correlaciones se presenta en las Figuras A.7 y A.8, para los atributos de potencia activa y reactiva, respectivamente. Dentro de las correlaciones, la más directa es la que existe entre la generación diésel y la demanda; esta se exhibe en la Figura 4.8.

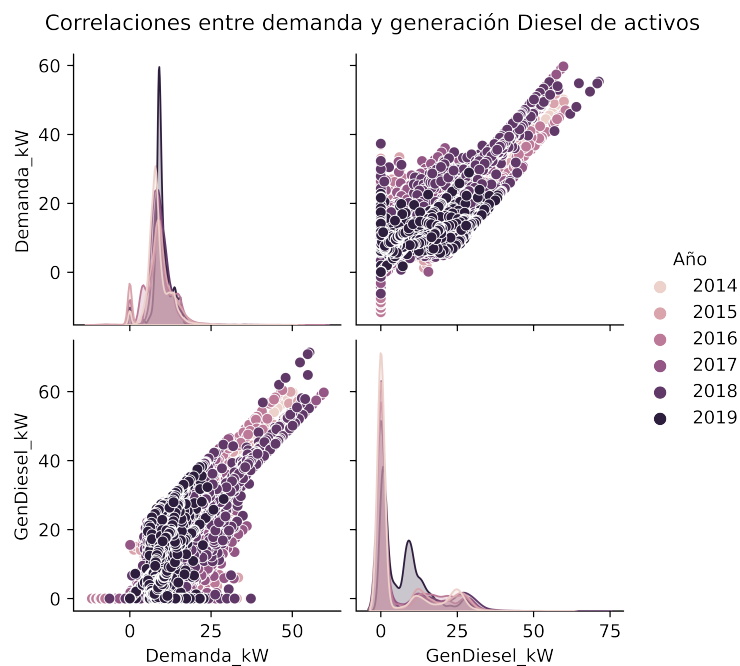


Figura 4.8: Correlación entre generación diésel y demanda para potencia activa

En la Figura 4.8 se resalta la correlación entre estos 2 atributos, debido a que esta es fuertemente positiva y deja entrever que, para todos los años analizados, la generación diésel crece linealmente a medida que aumenta la demanda. Esta dinámica se puede deber a que, para aumentos significativos de la demanda, esta es complementada en gran medida por inyección de activos a partir del grupo electrógeno.

Se realiza la salvedad de que, si bien, se han compartido los parámetros de operación de la red, esta opera con un *Energy Management System* (EMS) lo que explica las jerarquías en la participación de unidades generadoras, debido a que este *benchmark* no pretende compartir el EMS específico de la red. Este es abordado en el Capítulo 5 para realizar una validación del *benchmark* generado.

### 4.3.2. Generación de la red con la selección de los datos

La red generada se encuentra publicada en el repositorio <https://github.com/OscarDorner-UCH/ESUSCON-Isolated-Microgrid-Benchmark>., donde se comparten los conjuntos de datos de:

- Topología de la micro-red.
- Perfiles de demanda.
- Cargas dentro de la red.
- Unidades de generación y almacenamiento en la red.
- Perfiles de generación
- Parámetros de las líneas de distribución.
- Eventos de falla y/o alteraciones.

De manera de instruir al usuario para que haga uso de estos datos, un diagrama de la ubicación de los distintos archivos es presentada en la Figura 4.9.

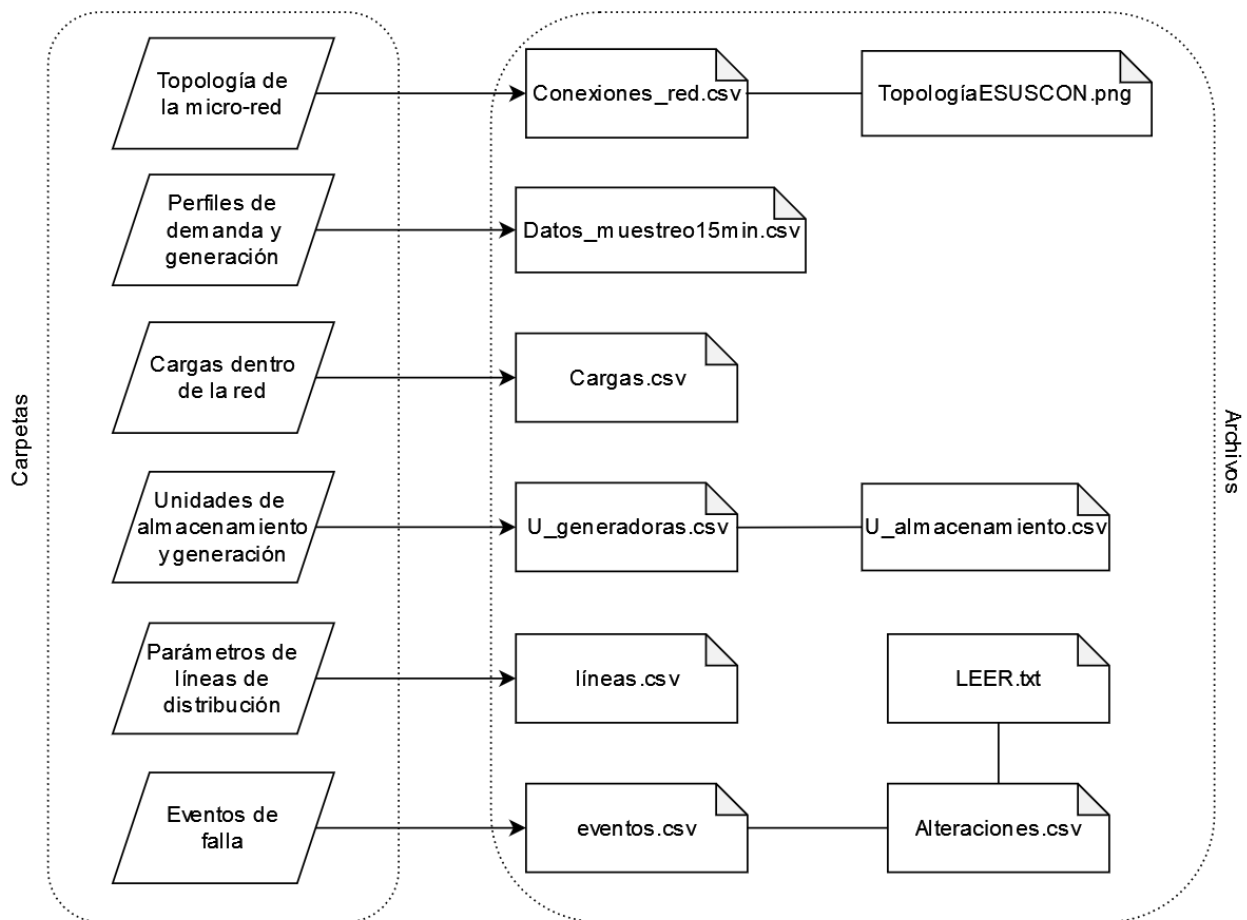


Figura 4.9: Diagrama de archivos y carpetas en repositorio.

### 4.3.3. Evaluación de los datos

Para la evaluación de los datos recopilados para la publicación del *benchmark*, se procede a evaluarlo el conjunto de datos bajo las 3 métricas propuestas, las que son:

- Completitud
- Aplicabilidad
- Comparabilidad

#### 4.3.3.1. Completitud

En la evaluación de la completitud de los datos a publicar, se comienza con el recuento de datos existentes. Como se mencionó anteriormente, se cuenta con una resolución de 15 minutos para el muestro de los datos de generación y demanda. Por lo que, para validar la completitud de estos datos, es necesario revisar el recuento de muestras existentes, las que se presentan en la Tabla 4.9.

Tabla 4.9: Comparación de cantidad de muestras esperadas con las obtenidas.

Año	Cantidad de horas	Muestras esperadas	Muestras existentes	Completitud [%]
2014	8760	35040	35040	100
2015	8760	35040	35040	100
2016	8784 <sup>31</sup>	35136	35136	100
2017	8760	35040	35040	100
2018	8760	35040	35040	100
2019	8760	35040	35040	100

Como se observa en la Tabla 4.9, se obtiene el 100 % de los datos esperados, donde se debe recordar que esto es logrado mediante la estimación de datos inexistentes (ver Figura 4.4).

El resto del conjunto de datos no requiere una evaluación de completitud, pues son datos menor magnitud en su tamaño que los ya evaluados, por lo que fueron revisados en su correspondiente presentación.

---

<sup>31</sup> 2016 es un año bisiesto por lo que cuenta con 24 horas más, lo que es equivalente a 96 muestras adicionales.

### 4.3.3.2. Aplicabilidad

Dado que los datos presentados en el *benchmark* de ESUSCON corresponden a los datos operacionales reales de la red homónima, la aplicabilidad de estos datos debe ser cerciorada con respecto al conjunto de datos reales.

Debido a que existen altos porcentajes de datos estimados, se presentan dos perfiles, uno para un día estimado y otro para un día real. Estos perfiles son exhibidos en la Figura 4.10.

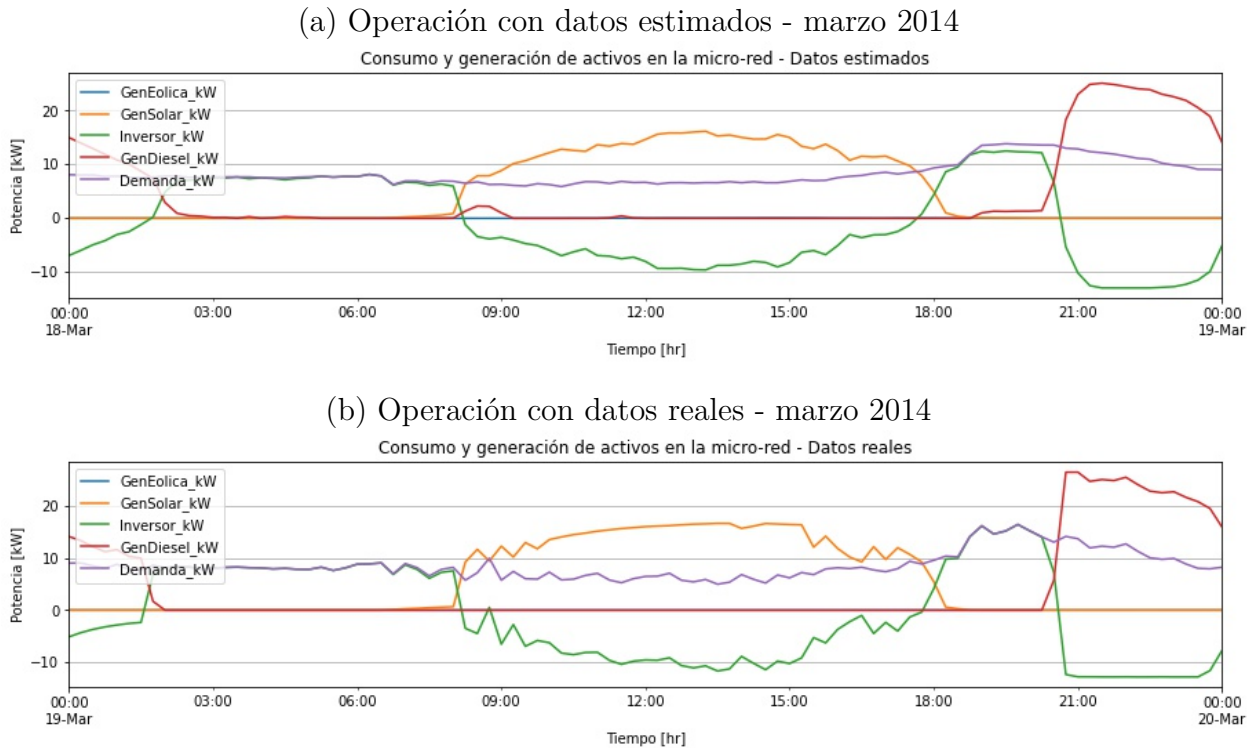


Figura 4.10: Perfiles de consumo y generación de activos para días de marzo de 2014.

Al comparar las dos Figuras presentadas, se observa cómo estas tienen un comportamiento similar con algunos cambios en los *peak* de generación. La similitud lograda se debe a la utilización de las ya mencionadas *Look Up Tables* que permiten la representación de datos inexistentes a partir de datos reales del mismo año o de años anteriores.

Finalmente, se debe esclarecer que existen casos específicos donde la herramienta utilizada para estimar datos inexistentes pierde robustez. Si bien no ocurre con los conjuntos de datos trabajados, puede existir en días de operación crítica donde no exista información, como lo pueden ser las festividades presentadas en la Tabla 4.8, donde estas serían estimadas como perfiles de menor magnitud debido a que las *Look Up Tables* son correspondientes a estaciones y no a días particulares.

### 4.3.3.3. Comparabilidad

La evaluación de la comparabilidad que este *benchmark* tiene, con micro-redes del mismo tipo ya publicadas, se presenta en forma resumida en la Tabla 4.10, donde se comparan los principales atributos del *benchmark*: ESUSCON, múltiples micro-redes interconectadas [9] y la micro-red BV de CIGRE [8].

Tabla 4.10: Comparación de las distintas características entre los *benchmark* analizados.

Característica	Benchmark			
	ESUSCON	Micro-red de BV CIGRE	Múltiples Micro-redes	Micro-red BCIT
Múltiples topologías	No cuenta	No cuenta	Cuenta	No cuenta
Datos de demanda históricos	Cuenta	No cuenta	Cuenta	No cuenta
Datos de generación históricos	Cuenta	No cuenta	Parcial	No cuenta
Evolución de la demanda	Cuenta	No cuenta	Cuenta	No cuenta
Distintos tipos de demanda	Cuenta	Cuenta	Cuenta	Cuenta
Parámetros de líneas	Cuenta	Cuenta	Cuenta	Cuenta
Modo de operación (Conectada/Aislada)	Aislada	Ambas	Ambas	Conectada

Las distintas características exhibidas en la Tabla 4.10 pretenden ser las cualidades que permitan comparabilidad con los *benchmark* presentados, por lo que propiedades como: tipos de demanda, parámetros de líneas, parámetros de unidades de generación y capacidad de operar en modo aislado, aseguran la comparación que se pueda tener en estudios que incluyan estos parámetros.

Continuando con la evaluación de la comparabilidad de la micro-red *benchmark* ESUSCON, si bien, esta no cuenta con las mismas características que el *benchmark* de múltiples micro-redes interconectadas, tienen puntos de coincidencias considerables. Algunas características importantes que comparten son las de: datos de generación y demanda históricos con el *benchmark* de múltiples micro-redes interconectadas.

El *benchmark* de micro-red BV de CIGRE no cuenta con algunas de las cualidades mencionadas. Esto se puede deber a que es un trabajo más antiguo por lo que se espera que cuente con menos información; de igual forma se pueden realizar comparaciones en las características comunes ya mencionadas.

Finalmente, se observa que existe variedad en los parámetros que comparten las micro-redes seleccionadas, por lo que es posible realizar estudios comparables entre ellas, siempre que se ponga atención en los atributos compartidos.

## 4.4. Discusión sobre el *benchmark* generado

Durante el Capítulo 4, se ha seguido el diagrama de flujo requerido para confeccionar una micro-red *benchmark* del tipo aislada propuesta en el Capítulo 3. Se destaca la linealidad que propone la metodología, yendo desde características generales a detalles específicos y aplicados.

En el primer módulo de la metodología, que corresponde a la “Caracterización de la micro-red *benchmark* a generar”, se logra un detallado perfil de la micro-red de Huatacondo. Este nivel de detalle pretende ser útil para el contexto del *benchmark* generado, pues se comparten las motivaciones de su diseño así como también detalles básicos de su operación. Se pretende que el futuro usuario de la micro-red *benchmark* tenga un entendimiento más completo del conjunto de datos debido a esta información.

Con respecto al módulo de “Obtención de datos necesarios para la generación de una micro-red *benchmark*”, se asimila que, si bien, existe una cantidad de datos considerable para muchos aspectos, esta puede ser compartida en un modo sintetizado con el fin de no recurrir a redundancias en la información presentada. Se ejemplifica esta situación con lo presentado en las Figuras 4.6 y 4.7, donde se toman datos promediados de las estaciones sin tener que presentar supuestos de días típicos para las estaciones de los años seleccionados.

En el módulo de “Evaluación y generación de una micro-red *benchmark*” se destaca cómo solo 2 variables tienen una correlación directa. Esto es atribuido a que ante incrementos no previstos en la demanda, el generador diésel tendrá que suplir el déficit de generación. Esta explicación surge bajo el supuesto que ninguno de los otros recursos distribuidos pueda suplir el aumento de consumo.

Continuando en el mismo módulo, se recapitula la generación de la red con la selección de los datos. En este paso del diagrama de flujo se confecciona un diagrama de cómo se distribuyen las carpetas y archivos en el repositorio. Este diagrama pretende ser de utilidad para que los interesados en revisar los datos del *benchmark* ESUSCON, puedan entender la ubicación de cada tipo de información publicada.

Con respecto a las evaluaciones realizadas sobre el *benchmark* generado, se cumplen con en medida satisfactoria las 3 métricas propuestas. Sobre la completitud se observa cómo se cuenta con el 100 % de los datos de generación y consumo, lo que asciende a más de 210.000 datos. La aplicabilidad del *benchmark* se evalúa con la comparación satisfactoria de los datos estimados con los reales, ya que se asume que al utilizar los datos reales de una micro-red estos ya son aplicables. Por último, la evaluación de la comparabilidad del *benchmark* concluye con que este sí es aplicable teniendo en cuenta las características que comparten las distintas micro-redes analizadas.

Finalmente, el último módulo de la metodología propuesta culmina con el cumplimiento de todos los requisitos previamente fijados. Por lo que el *benchmark* es publicado según lo propuesto, en la Figura 4.9, donde se ocupa la misma distribución de carpetas y archivos.



# Capítulo 5

## Caso de estudio: EMS de Huatacondo

El último objetivo específico de la presente memoria consiste en la validación de los datos generados para el *benchmark* de ESUSCON. Esto se logra comparando la operación real de la micro-red con respecto a las dinámicas simuladas por el *benchmark* bajo presencia de un *Energy Management System*<sup>32</sup> (EMS). El caso de estudio contempla una ventana temporal de corto y largo plazo. El EMS propuesto es el utilizado en la micro-red ESUSCON, por lo que se esperan resultados similares entre las simulaciones del EMS con el *benchmark* y la operación real de la micro-red bajo el mismo sistema de gestión energética.

Para la implementación del EMS se replica el propuesto en [48], donde se especifican los modelos de: unidad térmica, banco de baterías y demanda. Por lo que se hace uso de una considerable variedad de los datos generados para el *benchmark*, como lo son los datos operacionales de demanda y generación solar. El código del EMS utilizado en el presente caso de estudio, es implementado en el software Xpress IVE 8.10.

Se hace mención de que la operación real de la micro-red contempla la opción de 2 modos de operación, los que son los siguientes:

- Operación manual: operación donde el operador del sistema establece los períodos en los que se enciende el generador diésel.
- Operación automática: operación donde el EMS establece todas las consignas de las unidades, en este modo el operador solo supervisa el sistema.

Debido a que el caso de estudio contempla la comparación de la simulación EMS con respecto a la operación real, es necesario evaluar fechas donde la micro-red operaba en modo automático; estas fechas son discutidas en la Sección C.2.

### 5.1. EMS utilizado en Huatacondo y adaptación para simulación

El EMS utilizado es de Horizonte Deslizante, el que es propuesto en [49] donde se explican los beneficios en las certezas de predicción debido al uso de un horizonte deslizante. El

---

<sup>32</sup> En la Figura 5.1 se descompone el EMS en UC (*Unit Commitment*), que consta de la solución para alcanzar la demanda. Y en ELD (*Economic Load Dispatch*) para poder considerar el costo de oportunidad de la energía almacenada en el banco de baterías.

diagrama de operación del EMS de Huatacondo es presentado en la Figura 5.1.

Donde el resumen de su operación consta de que en función de la operación histórica de la micro-red se generan vectores de generación (solar y eólica) y consumo esperado (demanda y consumo de agua). A lo anterior, se le suma un estimador del estado de carga inicial del sistema de almacenamiento y estado inicial de la unidad térmica (encendida o apagada). Estos vectores ingresan al EMS, el que resuelve el problema de optimización, entregando finalmente, las consignas de generación (Potencia Solar, Potencia del Inversor y Potencia de unidad térmica).

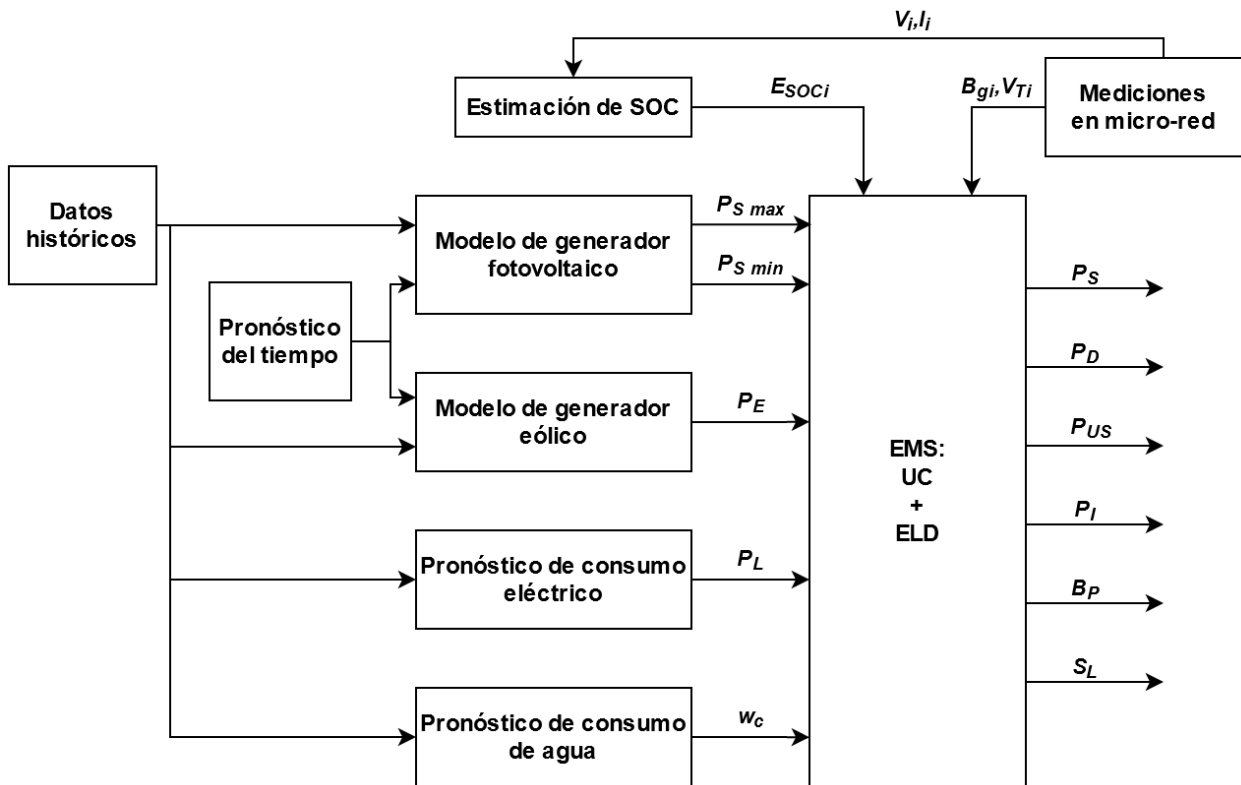


Figura 5.1: Diagrama de bloques del EMS implementado en Huatacondo. Fuente [49].

El EMS tiene las siguientes consideraciones:

- Consumo energético de la bomba de agua presente en Huatacondo.
- Volumen del estanque de agua.
- Control de la demanda.
- Consumo residencial.
- Consigna de potencia de generador diesel.
- Generación de la planta fotovoltaica.
- Generación de la planta eólica.

- Uso óptimo del banco de baterías.

El método del horizonte deslizante consiste en la retroalimentación del sistema de control con la entrada de nuevos valores de predicción. En el caso del problema de optimización propuesto, los valores que retroalimentan al EMS son [48]:

- Nuevo valor de demanda.
- Nuevo valor de generación solar.
- Valor real del estado de carga inicial del banco de baterías.
- Estado inicial de la unidad térmica (encendida o apagada).

También, deben ser presentadas las variables de entrada y salida con las que opera el EMS, estas son las siguientes:

- Variables de entrada:
  - $P_{smax}$ : Predicción de máxima potencia solar posible.
  - $P_{smin}$ : Predicción de mínima potencia solar posible.
  - $E_{SOCi}$ : Condición inicial de carga del banco de baterías.
  - $P_E$ : Potencia eólica.
  - $P_L$ : Demanda esperada.
  - $w_c$ : Consumo de agua.
  - $V_i$ : Voltaje del banco de baterías.
  - $I_i$ : Corriente del banco de baterías.
  - $B_{gi}$ : Estado binario de generador diesel (encendido/apagado).
  - $V_{Ti}$ : Nivel del almacenamiento de agua.
- Variables de salida:
  - $P_S$ : Potencia solar esperada.
  - $P_D$ : Potencia de referencia para generador diesel.
  - $P_{US}$ : Potencia de falla (en inglés *Unreserved*, se refiere a la energía no servida).
  - $P_I$ : Potencia del inversor del banco de baterías.
  - $B_P$ : Señal binaria para el sistema de suministro de agua.
  - $S_L$ : Señales de deslizamiento de la demanda.

Posteriormente, en las siguientes subsecciones se explicarán los modelos utilizados para los distintos componentes del EMS.

Finalmente, debido a que el *benchmark* no contempla la simulación del pronóstico eólico y tampoco la simulación del consumo de agua potable, se reduce la simulación al diagrama de bloques presentado en la Figura 5.2.

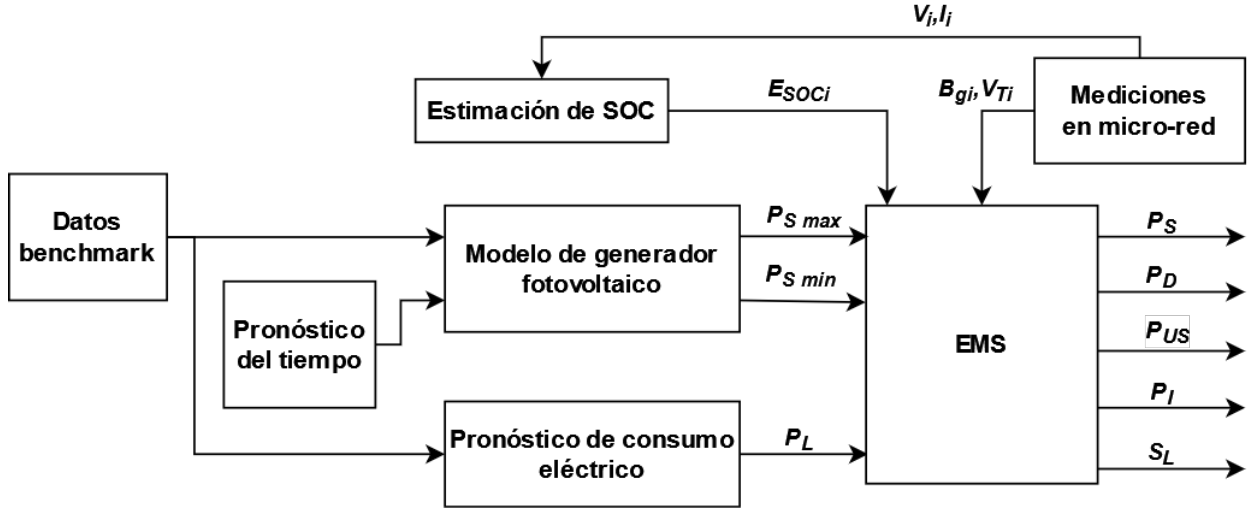


Figura 5.2: EMS adaptado para la simulación del caso de estudio.

### 5.1.1. Función objetivo

La función objetivo del EMS considera todos los costos involucrados en la operación del sistema, siendo estos directos e indirectos. La función objetivo se presenta en la ecuación 5.1.

$$J = \delta_t \sum_{t=1}^T C_{com}(t) + \sum_{t=1}^T C_{par}(t) + \delta_t C_{man} T_{man} + \delta_t C_f \sum_{t=1}^T P_f(t) + \delta_t C_{ver} \sum_{t=1}^T P_{ver}(t) + C_{inv} SoH_{per} \quad (5.1)$$

Donde:

- Costos directos:
  - $\delta_t \sum_{t=1}^T C_{com}(t)$ : representa el costo combustible por uso de unidad térmica.
  - $\sum_{t=1}^T C_{par}(t)$ : representa los costos de partida de la unidad térmica, estimación de combustible usado para una partida en frío.
  - $\delta_t C_{man} T_{man}$ : representa los costos asociados al mantenimiento de la unidad térmica en función de las horas de uso. Aquí  $T_{man}$  es el número de intervalos en que la unidad térmica estuvo operando.
- Costos indirectos:
  - $\delta_t C_f \sum_{t=1}^T P_f(t)$ : representa el costo de falla, es decir, no abastecer la demanda en su completitud.
  - $\delta_t C_{ver} \sum_{t=1}^T P_{ver}(t)$ : representa el costo asociado a la energía renovable vertida por excesos.
  - $C_{inv} SoH_{per}$ : representa al costo por pérdida de vida útil de la batería.

Para esta formulación, la variable temporal  $t$  corresponde a una unidad discreta de tiempo, lo que aporta en disminuir la complejidad del problema con respecto a formulaciones donde se usa una variable temporal continua.

### 5.1.2. Modelo de la unidad térmica

El consumo de combustible de una unidad térmica puede ser representado por una curva no lineal. Para incorporar una curva no lineal a un problema de optimización lineal, se aproxima la curva en  $n_v$  tramos lineales como se muestra en la Figura 5.3:

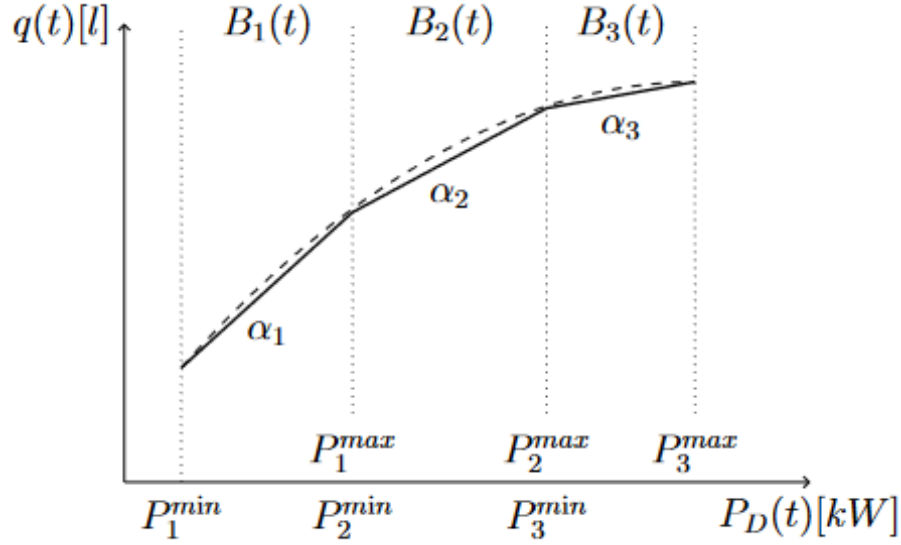


Figura 5.3: Curva segmentada de consumo de unidad térmica. Fuente [48].

Cada tramo introduce la variable binaria  $B_v(t)$  la cual representa qué tramo de la linealización se encuentra activo. Además, se incorpora la variable auxiliar  $P_v(t)$  que representa la potencia generada en cada tramo  $v$ , por cada intervalo  $t$ . El consumo de combustible de la unidad térmica queda determinado por la ecuación 5.2.

$$q(t) = \sum_{v=1}^{n_v} (\alpha_v P_v(t) + \beta_b B_v(t)) \quad (5.2)$$

Para que solo un tramo pueda estar activo en cada uno de los intervalos  $t$ , se debe incorporar la restricción presentada en la ecuación 5.3.

$$\sum_{v=1}^{n_v} B_v(t) \leq 1 \quad (5.3)$$

La desigualdad de la ecuación 5.3 existe debido a que el EMS podría determinar el apagado de la unidad térmica, es decir  $\sum_{v=1}^{n_v} B_v(t) = 0$ .

La relación entre la variable auxiliar  $P_v(t)$  y la potencia real generada por la unidad térmica  $P_D(t)$  es presentada en la restricción de la ecuación 5.4.

$$P_D(t) = \sum_{v=1}^{n_v} P_v(t) \quad (5.4)$$

La restricción presentada en la ecuación 5.5 asegura que la potencia auxiliar  $P_v(t)$  sea cero

cuando no se encuentre dentro del tramo correspondiente.

$$P_v^{min} B_v(t) \leq P_v(t) \leq P_v^{max} B_v(t) \quad (5.5)$$

Donde  $P_v^{min}$  y  $P_v^{max}$  son los límites inferior y superior de cada tramo  $v$ . Además, el costo del combustible usado queda representado por la ecuación 5.6.

$$C_{com}(t) = C_{die}q(t) \quad (5.6)$$

Donde  $C_{die}$  corresponde al valor del combustible por litro. Los costos de partida quedan representados en las ecuaciones 5.7, 5.8 y 5.9.

$$C_{par}(t) \geq C_D \left( \sum_{v=1}^{n_v} B_v(t) - B_{g0} \right) \quad t = 1 \quad (5.7)$$

$$C_{par}(t) \geq C_D \left( \sum_{v=1}^{n_v} B_v(t) - \sum_{v=1}^{n_v} B_v(t-1) \right) \quad t > 1 \quad (5.8)$$

$$C_{par}(t) \geq 0 \quad (5.9)$$

Donde  $C_D$  corresponde al costo de partida en frío. Posteriormente, para incorporar períodos de indisponibilidad de la unidad térmica, se debe incorporar la matriz de indisponibilidad  $M_{ind}$ , en donde  $M_{ind}(i, 1)$  contiene los intervalos de inicio de la indisponibilidad y  $M_{ind}(i, 2)$  contiene los intervalos finales de la indisponibilidad,  $n_i$  representa el número de indisponibilidades en el horizonte de optimización. La restricción asociada a los períodos de indisponibilidad se presenta en la ecuación 5.10.

$$\forall i \in \{1..n_i\}, \sum_{v=1}^{n_v} B_v(t) = 0 \quad \forall t \in \{M_{ind}(i, 1)..M_{ind}(i, 2)\} \quad (5.10)$$

Debido a que el tanque de combustible que utiliza la unidad térmica es de volumen finito, se debe considerar restricciones sobre esta unidad; esta se presenta en la ecuación 5.11.

$$V_D(t) = V_D(t-1) - \left( \sum_{v=1}^{n_v} \alpha_v P_v(t) + \beta_b B_v(t) \right) \quad (5.11)$$

La ecuación 5.11 representa el volumen del estanque en cada intervalo  $t$  en función del volumen del intervalo anterior. Para garantizar el correcto funcionamiento de la unidad térmica, el estanque siempre debe tener combustible dentro de los rangos nominales, los que quedan fijados en la ecuación 5.12

$$V_D^{min} \leq V_D(t) \leq V_D^{max} \quad (5.12)$$

Finalmente, se agrega una restricción que limita el consumo de combustible en el horizonte de optimización imponiendo un volumen mínimo al final del horizonte, esto se presenta en la ecuación 5.13.

$$V_D(T) \geq V_{fin}^{min} \quad (5.13)$$

### 5.1.3. Modelo del banco de baterías

Para implementar un modelo del banco de baterías, se debe tener en consideración las siguientes variables que determinaran la operación óptima del sistema:

- $E(t)$ : Energía disponible del banco de baterías en el intervalo  $t$ .
- $P_B^+(t)$ : Potencia entregada por el banco de baterías en el intervalo  $t$ , régimen de descarga.
- $P_B^-(t)$ : Potencia consumida por el banco de baterías en el intervalo  $t$ , régimen de carga.
- $P_I(t)$ : Potencia del inversor vista desde el lado AC, determinada por las potencias de carga o descarga de las baterías.

#### 5.1.3.1. Restricciones de energía y potencia

La energía disponible en cada intervalo  $t$ , queda representada por la restricción 5.14.

$$E(t) = E(t-1) - \delta_t \eta_B^+ P_B^+(t) - \delta_t \eta_B^- P_B^-(t) \quad (5.14)$$

En la restricción 5.14,  $\eta_B^+$  y  $\eta_B^-$  representan los valores de eficiencia energética del banco de baterías en régimen de descarga y carga, respectivamente. A partir de la ecuación 5.14 se puede definir el estado de carga de la batería, así como la relación entre la energía disponible en el intervalo  $t$  y la energía máxima que puede almacenar el banco de baterías. Esta relación queda presentada en la ecuación 5.15.

$$SoC(t) = \frac{E(t)}{E_{max}} \quad (5.15)$$

Es deseable que la operación quede restringida a un rango determinado de carga, por lo que se incorpora la ecuación 5.16.

$$SoC_{min} \leq SoC(t) \leq SoC_{max} \quad (5.16)$$

Se propone, además, restringir la energía almacenada disponible en el último intervalo del horizonte de optimización; esta restricción se presenta en la ecuación 5.17.

$$E(T) \geq E_{fin}^{min} \quad (5.17)$$

La potencia entregada por el inversor en el lado AC de la red de distribución, queda expuesto en la ecuación 5.18.

$$P_I(t) = \eta_{Id} P_B^+(t) + \eta_{Ic} P_B^-(t) - P_{I0} \quad (5.18)$$

Donde,  $\eta_{Id}$  y  $\eta_{Ic}$  corresponden a la eficiencia del inversor en la descarga y carga, respectivamente,  $P_{I0}$  corresponde a la potencia consumida internamente por el inversor. Además, el banco de baterías está limitado por la corriente de carga y descarga, que se ve reflejado por su potencia de carga y descarga. Estos comportamientos se presentan en la ecuaciones 5.19 y 5.20, respectivamente.

$$0 \leq P_B^+(t) \leq B_B^+(t) P_B^{max} \quad (5.19)$$

$$0 \geq P_B^-(t) \geq -B_B^-(t)P_B^{max} \quad (5.20)$$

Se desprende de las restricciones 5.19 y 5.20, que se introducen nuevas variables binarias  $B_B^+(t)$  y  $B_B^-(t)$  que indican cuando la batería entrega o recibe energía de la micro-red. Ya que el banco puede estar entregando o bien recibiendo energía de la micro-red, se debe imponer la restricción del modo de operación en la ecuación 5.21.

$$B_B^+(t) + B_B^-(t) \leq 1 \quad (5.21)$$

### 5.1.3.2. Restricciones de potencia máxima de carga

Para presentar las restricciones presentes en la potencia máxima de carga de las baterías, se debe ejemplificar que cuando las baterías están a un cierto nivel de estado de carga y entregan corriente a una carga. La tensión de circuito cerrado puede superar el umbral máximo impuesto por la tensión de flotación<sup>33</sup>. Este efecto se acentúa conforme la operación se acerca a un estado de carga completo (100%) y depende de la corriente de descarga de la batería.

Como este modelo representa la corriente de la batería como potencia, se presentan un conjunto de restricciones que aseguran que el umbral del tensión de flotación nunca se supere, por lo que se opera la batería en un nivel seguro. La Figura 5.4 muestra la relación entre la potencia máxima de carga y el estado de carga de la batería.

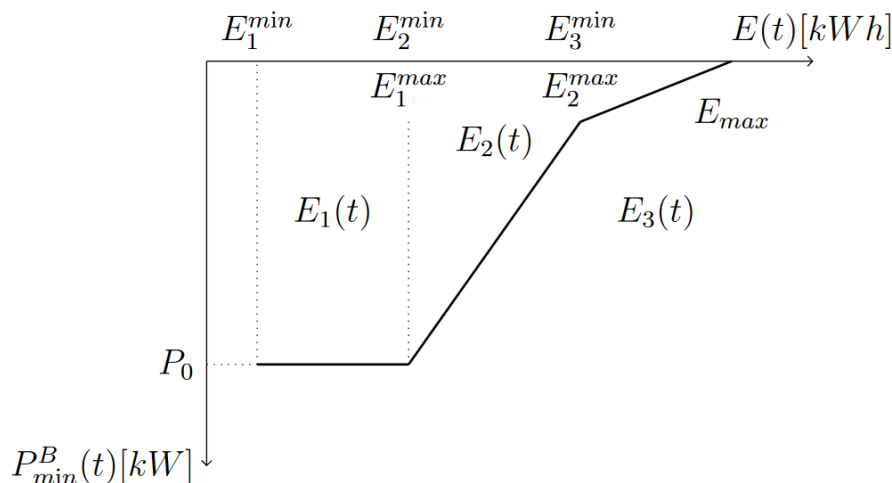


Figura 5.4: Curva de potencia máxima de carga de una batería. Fuente [48].

Para la incorporación de esta restricción al problema de optimización, se debe linealizar por tramos al igual que lo realizado sobre la curva de consumo de la unidad térmica. Esto se logra con el conjunto de ecuaciones 5.22, 5.23 y 5.24.

$$P_{min}^B(t) = P_0 + \sum_{s=1}^{n_s} \alpha_s^B E_s(t-1) \quad (5.22)$$

<sup>33</sup> El voltaje de flotación es la tensión a la que se mantiene una batería después de haber sido completamente cargada para mantener esa capacidad, mediante la compensación de la auto-descarga de la batería.



$$(E_s^{max} - E_s^{min})B_{s+1}(t) \leq E_s(t) \leq (E_s^{max} - E_s^{min})B_s(t) \quad (5.23)$$

$$0 \leq E_{n_s}(t) \leq (E_{n_s}^{max} - E_{n_s}^{min})B_{n_s}(t) \quad (5.24)$$

Donde,  $n_s$  representa el número de tramos totales,  $E_s^{min}$  y  $E_s^{max}$  representan los límites inferiores y superiores de cada tramo  $s$ . Se introduce la variable binaria  $B_s(t)$  y la variable auxiliar  $E_s(t)$  para explicitar y determinar el tramo de la curva que debe estar activo. La variable auxiliar se relaciona con la variable real según la ecuación 5.25.

$$E(t) = E_{soc}^{min} + \sum_{s=1}^{n_s} E_s(t) \quad (5.25)$$

Donde  $E_{soc}^{min}$  representa el límite inferior del primer tramo de la linealización. Por último, la potencia máxima de carga queda determinada por la ecuación 5.26.

$$P_B^-(t) \geq P_{min}^B(t) \quad (5.26)$$

### 5.1.3.3. Restricciones de modelo de envejecimiento cíclico de Copetti

El modelo de envejecimiento Coppeti corresponde al utilizado en el EMS de Huatacondo, el que es explicado a continuación.

Para determinar que ponderador utilizar en el momento indicado se introduce la variable auxiliar  $SoC_c(t)$  y la variable auxiliar binaria  $B_c^{soc}(t)$ , que se presentan en la ecuación 5.27.

$$SoC_c^{min} B_c^{soc}(t) \leq SoC_c(t) \leq SoC_c^{max} B_c^{soc}(t) \quad (5.27)$$

En la ecuación 5.27 los términos  $SoC_c^{min}$  y  $SoC_c^{max}$  corresponden a los límites inferior y superior de la zona de operación  $c$ . La relación entre la variable auxiliar  $SoC_c(t)$  y la variable original  $SoC(t)$ , queda determinada por la ecuación 5.28.

$$SoC(t) = \sum_{c=1}^{n_c} SoC_c(t) \quad (5.28)$$

Donde,  $n_c$  corresponde al número de zonas de operación. Además, debido a que el operador se debe encontrar activo en la zona de operación por intervalo, se incorpora la restricción 5.29.

$$\sum_{c=1}^{n_c} B_c^{soc}(t) = 1 \quad (5.29)$$

Otras variables auxiliares binarias que debieron ser implementadas fueron  $B_c^+(t)$  y  $B_c^-(t)$ , las que representan cuando el banco de baterías está entregando potencia a la micro-red o bien, cuando este está siendo cargado, respectivamente, a la vez que recorren todos los intervalos y todas las zonas de operación. Estas variables se relacionan con las variables originales imponiendo las siguientes 5.30 y 5.31.

$$B_B^+(t) = \sum_{c=1}^{n_c} B_c^+(t) \quad (5.30)$$

$$B_B^-(t) = \sum_{c=1}^{n_c} B_c^-(t) \quad (5.31)$$

Las restricciones 5.30 y 5.31, a su vez, imponen que sólo una zona de operación esté activa para cada intervalo del horizonte de optimización. La siguiente restricción obliga a las variables auxiliares  $B_c^+(t)$  y  $B_c^-(t)$  a tomar valor 0 cuando no se está en la zona de operación correspondiente, pero le da la libertad de operar (tomar valor 1), o no operar, cuando se está en la zona de operación correspondiente; esto se presenta en en las ecuaciones 5.32 y 5.33.

$$B_c^+(t) \leq B_c^{soc}(t) \quad (5.32)$$

$$B_c^-(t) \leq B_c^{soc}(t) \quad (5.33)$$

Finalmente, se agregan las ecuaciones 5.34, 5.35 y 5.36 donde se calculan las pérdidas de estado de salud por intervalo y la pérdida de estado de salud en el horizonte de optimización.

$$SoH_{per}^+(t) = \sum_{c=1}^{n_c} \eta_c^{wz} B_c^+(t) \quad (5.34)$$

$$SoH_{per}^-(t) = \sum_{c=1}^{n_c} \eta_c^{wz} B_c^-(t) \quad (5.35)$$

$$SoH_{per} = \sum_{t=1}^T SoH_{per}^+(t) + SoH_{per}^-(t) \quad (5.36)$$

Donde,  $\eta_c^{wz} B_c^+(t)$  corresponde al valor del ponderador en la zona de trabajo  $c$ . De forma análoga al modelo anterior, se incorpora el costo por pérdida de vida útil  $C_{inv} SoH_{per}$  en la función objetivo, donde  $C_{inv}$  representa el costo de inversión en el banco de baterías.

#### 5.1.4. Modelo de la demanda

Las ecuaciones presentes en el EMS consideran el supuesto que la demanda puede ser levemente controlada, enviando señales de retroalimentación a los consumidores. Esta modificación queda determinada por los coeficientes de deslizamiento  $S_L(t)$ , los cuales son entregados como resultados por el EMS. Así, para una estimación de demanda determinada, se sigue el comportamiento presentado en la ecuación 5.37.

$$P_L(t) = S_L(t) \tilde{P}_L(t) \quad (5.37)$$

Donde,  $\tilde{P}_L(t)$  corresponde a la demanda estimada y  $P_L(t)$  a la demanda modificada. Los coeficientes de deslizamientos están restringidos a tomar valores dentro de un rango determinado; límite que se presenta en la ecuación 5.38.

$$S_L^{min} \leq S_L(T) \leq S_L^{max} \quad (5.38)$$

Se toma en consideración que la demanda modificada puede ser mayor a la demanda estimada.

Este comportamiento queda explicitado en la ecuación 5.39

$$\sum_{t=T_1}^{T_2} P_L(t) \geq \sum_{t=T_1}^{T_2} \tilde{P}_L(t) \quad (5.39)$$

Por último, se debe destacar que el control de demanda puede ejercerse por subperíodos dentro del horizonte de optimización.

## 5.2. Incorporación del *benchmark* al EMS Huatacondo

Con el fin de realizar una validación en los datos generados para la micro-red *benchmark*, se propone simular el comportamiento del EMS con los datos generados para, posteriormente, compararlo con los datos reales de operación en Huatacondo, donde la configuración de la red contempla la operación bajo el mismo EMS [49].

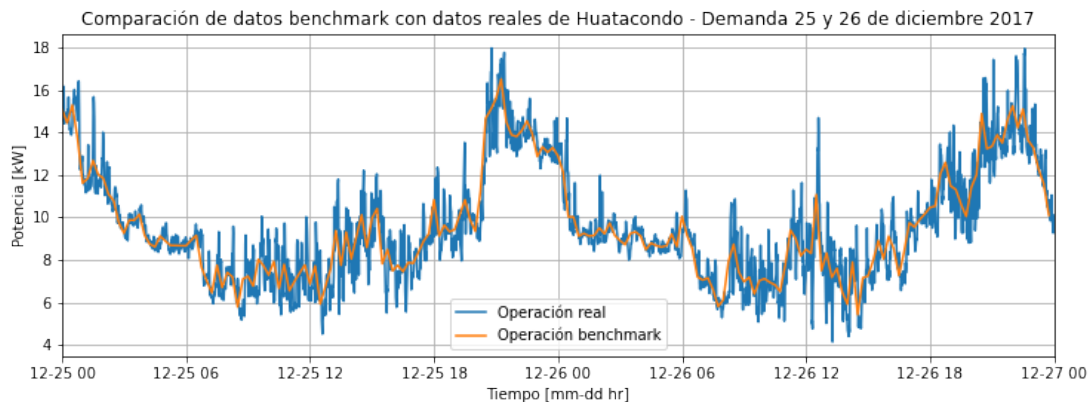
En la presente sección se presentan en detalle los datos del *benchmark* que serán utilizados, a la vez, que se especifican los parámetros a incorporar en el EMS.

### 5.2.1. Datos de demanda y generación solar

El modelo de EMS implementado en Huatacondo, considera la incorporación de datos históricos para la predicción de horizonte deslizante, por lo que se requieren 2 días de operación previos. Se ejemplifica con la simulación en corto plazo, donde se deben ingresar las entradas de generación solar y de demanda para el 25 y 26 de diciembre de 2017 para obtener, en primera iteración, las salidas necesarias para los días 27 y 28 del mismo mes.

A continuación, se presentan los datos de operación del *benchmark* generado junto con los datos de operación real. La demanda y generación solar se presentan en la Figura 5.5.

(a) Datos de demanda para predicción - julio 2016



(b) Datos de generación solar para predicción - julio 2016

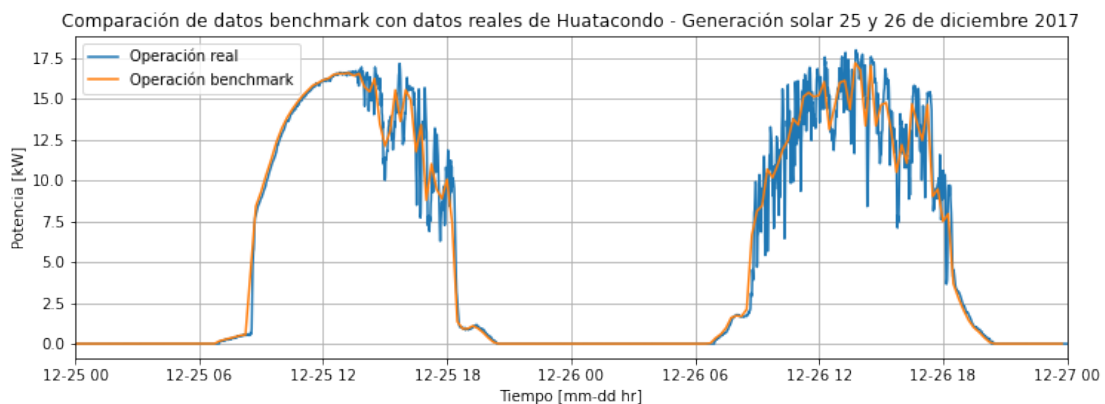


Figura 5.5: Datos para predicción de EMS 10 y 11 de julio 2016.

Posteriormente, si bien se presentan tanto los datos de operación real como los generados por el *benchmark*, los datos utilizados en el caso de estudio son los del *benchmark*, los que luego serán contrastados con la operación real. Se aprecia que los datos del *benchmark* cuentan con un comportamiento similar al de la operación real, pero al ser un muestreo de 15 minutos se obtiene una curva con variaciones menos abruptas.

Finalmente, el modelo inicial contempla la predicción de la generación eólica, pero al estar fuera de operación desde el 2014 (incidente reportado en Tabla 4.7), no es utilizado en la simulación. Debido a que el diagrama de operación del EMS, presentado en la Figura 5.1, contempla las variables de operación del conjunto de baterías y del generador diésel como variables controladas; estas no son presentadas en la presente sección.

## 5.3. Resultados de la implementación

En la implementación del EMS propuesto, se realizan simulaciones a corto y largo plazo con el fin de comparar los resultados y apreciar diferencias entre estas dos aproximaciones.

### 5.3.1. Implementación del EMS en el corto plazo

Para la validación del *benchmark* generado, se propone la realización de una simulación a corto plazo de la operación del EMS. La ventana temporal a evaluar corresponde a los días 27 y 28 de diciembre 2017<sup>34</sup>; para la correcta implementación del EMS propuesto se consideran los parámetros de la Tabla 5.1.

Tabla 5.1: Configuración para la simulación del EMS a corto plazo.

Configuración de la simulación en el corto plazo	
Parámetro	Valor
Fecha de evaluación inicial	27-12-2017
Fecha de evaluación final	28-12-2017
Número de iteraciones	48
Tasa de refresco de simulaciones [min]	60
Horizonte de evaluación [Hr]	48
Gap absoluto [p.u]	1e-3
$SoC_{min}$ del banco de baterías [%]	30
$SoC_{max}$ del banco de baterías [%]	100
$SoC_{ini}$ del banco de baterías [%]	85
Costo diesel [\$/lt]	500
Costo partida grupo electrógeno [\$]	2.000
Costo mantenimiento [\$/Hr]	-
Costo variable por uso de baterías [\$/kWh]	112
Costo falla [\$/kWh]	2.000
Costo potencia vertida [\$/kWh]	10

La simulación a corto plazo propone una tasa de refresco para las consignas entregadas por un EMS de 60 [min], mientras que la operación real contempla uno de 15 [min]. Esta decisión se toma debido que en la ventana temporal del corto plazo, no existen cambios significativos entre ambas tasas, mientras que los costos computacionales se ven reducidos. Una comparación de los resultados bajo distintas tasas de refresco se presenta en la Sección C.1.

Los resultados de la implementación a corto plazo del EMS se presentan en la Tabla 5.2, donde se muestran los costos totales propuestos en la función objetivo planteada en la Sección 5.1.1, contrastados con los costos de operación reales.

<sup>34</sup> No existen datos estimados en esta ventana temporal. Esta ventana temporal corresponde a fechas donde el EMS operó sobre la completitud de la micro-red (Ver Sección C.2).

Tabla 5.2: Resumen de costos de operación a corto plazo (2 días).

Resumen de costos a corto plazo [\$]						
Escenario	$C_{die}$	$C_{par}$	$C_f$	$C_{ver}$	$C_{bat}$	$C_{tot}$
Op. Real	38.689	4.000	0	781	11.722	55.193
EMS benchmark	38.716	4.000	0	141	22.000	64.856

En los resultados presentados en la Tabla 5.2 se observa como los costos de operación para la simulación EMS son mayores a los costos de operación real, siendo la operación real un 9,7 [%] menos costosa que la operación simulada por el EMS. Las principales diferencias se dan en la inyección de generación solar, que es mayor en el escenario de operación real, lo que conlleva, finalmente, a una reducción en los costos de operación para dicho escenario. El comportamiento de la generación solar se exhibe en la Figura 5.6.



Figura 5.6: Generación solar para ventan temporal del 27 al 28 de diciembre 2017.

El comportamiento visto en la Figura 5.6 exhibe que la generación solar presenta ciertos comportamientos atribuibles a nubosidades. Esto, finalmente, hace que el modelo predictivo defina una operación con menos inyección de energía por generación solar. Debido a esta diferencia se generan distintos perfiles de uso de baterías y generación diésel.

Los costos de mantenimiento del grupo electrógeno ( $C_{man}$ ) y costos de falla ( $C_f$ ) son nulos o no son considerados para los costos totales, pues estos no están documentados con valores que permitan realizar un análisis real de la operación de la micro-red. Los costos por energía vertida  $C_{ver}$  son menores en el escenario de simulación EMS, debido al uso óptimo que se le da a la operación del conjunto de baterías. Las razones por las que el costo total ( $C_{tot}$ ) resulta más costoso para el caso de la simulación del EMS está ligado a la operación general de la micro-red, por lo que se debe analizar la operación en general de la micro-red.

Haciendo referencia a la operación general de la micro-red, se presentan diversas comparaciones con respecto a la penetración de ERNC en ambos escenarios. Los resultados de la energía inyectada por generación solar e inyectadas a partir del grupo electrógeno, son exhibidos en la Figura 5.7. Estos datos se complementan con la Tabla 5.3 donde se resume

la energía inyectada en cada escenario.

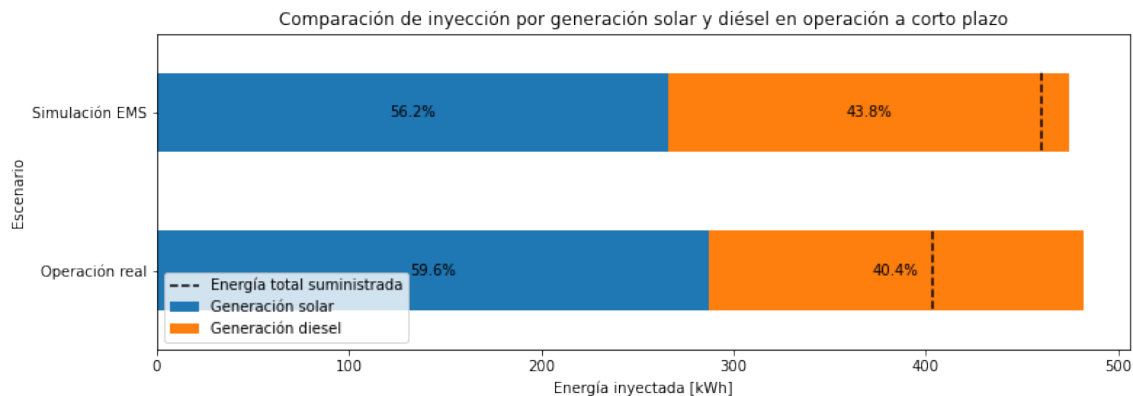


Figura 5.7: Penetración de ERNC para escenario de simulación EMS y operación real de la micro-red en el corto plazo.

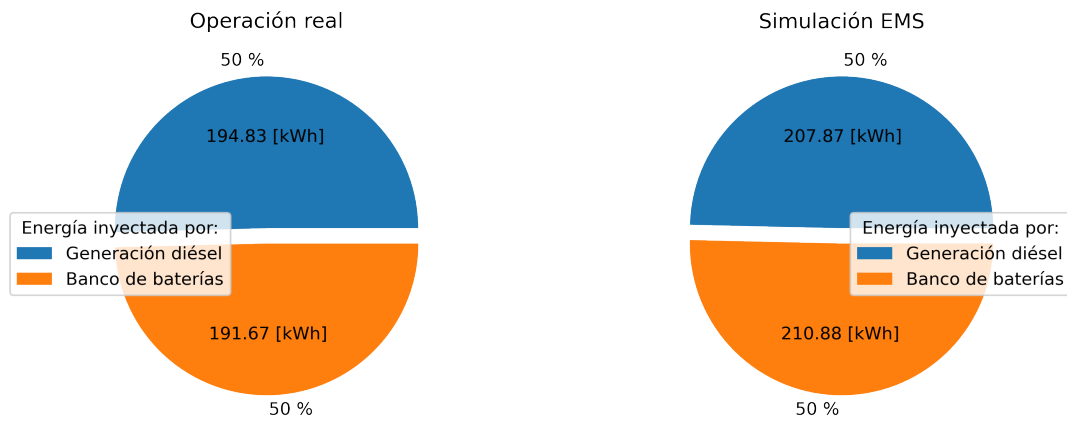
Tabla 5.3: Resumen de energía inyectada para los escenarios en corto plazo.

Energía inyectada para simulación en corto plazo		
Escenario	Inyección	Energía inyectada [kWh]
Operación real	Solar	287,13
	Diésel	194,83
	BESS	191,67
Simulación EMS	Solar	266,37
	Diésel	207,87
	BESS	210,88

En la Figura 5.7 se presentan las diferencias entre la energía total inyectada en ambos escenarios, debido a que el escenario de simulación EMS considera suplir un suministro 14 [%] superior al de la operación real. Este comportamiento se atribuye a limitaciones en el pronóstico de demanda, visto en la Sección 5.1.4, lo que conlleva a una mayor inyección por parte del BESS, significando un aumento de los costos totales de operación.

Para complementar la diferenciación de ambos escenarios, los niveles de inyección de energía del BESS, junto con la energía inyectada por el generador diésel, se presentan en la Figura 5.8.





(a) Operación real.

(b) Simulación EMS.

Figura 5.8: Comparación de energía inyectada para ambos escenarios en el corto plazo.

Se observa que los resultados de ambos escenarios se asemejan tanto en inyección diésel e inyección del BESS. Las proporciones son idénticas debido a las consignas entregadas por el EMS simulado y el EMS de la operación real de Huatacondo, teniendo puntuales diferencias en la demanda pronosticada.

Se hace mención que los resultados vistos en esta simulación pronostican menor generación solar en el caso de simulación EMS. Por otro lado, la inyección diésel, inyección BESS y pronóstico de demanda son sobredimensionadas en la simulación EMS. Estos resultados se presentan en la Figura 5.9.

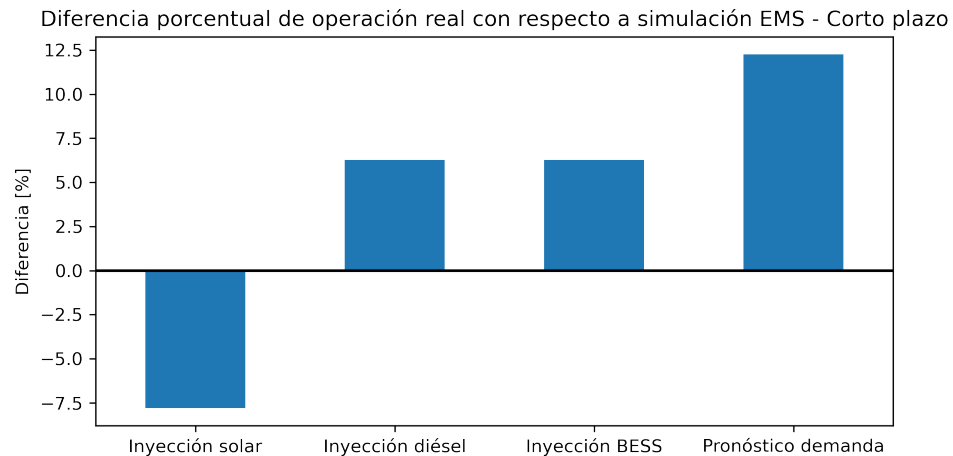


Figura 5.9: Diferencias porcentuales de simulación EMS con respecto a operación real en el corto plazo.

### 5.3.2. Implementación del EMS en el largo plazo

Para la validación del *benchmark* generado, se propone una simulación a largo plazo de la operación del EMS. La ventana temporal a evaluar es el segundo semestre del año 2017<sup>35</sup>. Para la correcta implementación del EMS se consideran los parámetros de la Tabla 5.4.

Tabla 5.4: Configuración para simulación de EMS a largo plazo.

Configuración de simulación en el largo plazo	
Parámetro	Valor
Fecha de evaluación inicial	01-07-2017
Fecha de evaluación final	31-12-2017
Número de iteraciones	183
Tasa de refresco de simulaciones [min]	1.440
Horizonte de evaluación [Hr]	48
Gap absoluto [p.u]	1e-3
$SoC_{min}$ del banco de baterías [%]	30
$SoC_{max}$ del banco de baterías [%]	100
$SoC_{ini}$ del banco de baterías [%]	85
Costo diesel [\$/lt]	500
Costo partida grupo electrógeno [\$]	2.000
Costo mantenimiento [\$/Hr]	-
Costo variable por uso de baterías [\$/kWh]	112
Costo falla [\$/kWh]	2.000
Costo potencia vertida [\$/kWh]	10

La simulación en el largo plazo establece una tasa de refresco para las consignas entregadas por el EMS de 1.440 [min], mientras que la operación real contempla un refresco de 15 [min]. Esta decisión se debe al amplio horizonte de evaluación junto con el alto coste computacional que significaría una tasa de refresco de menos minutos.

Los resultados de la implementación en el largo plazo del EMS se presentan en la Tabla 5.5, donde se muestran los costos totales propuestos en la función objetivo, planteada en la Sección 5.1.1, contrastados con los costos de operación real.

Tabla 5.5: Resumen de costos de operación en el largo plazo (6 meses).

Resumen de costos a largo plazo [\$]						
Escenario	$C_{die}$	$C_{par}$	$C_f$	$C_{ver}$	$C_{bat}$	$C_{tot}$
Op. Real	5.372.940	590.000	0	504.400	890.015	7.357.354
EMS benchmark	4.356.581	402.000	0	463.951	2.040.336	7.262.868

El comportamiento de los costos vistos en la Tabla 5.5, muestran que la generación diésel

<sup>35</sup> Mínima cantidad de datos inexistentes en esta ventana temporal (ver Tabla B.1).

considera más energía inyectada a la micro-red que la simulación realizada por el EMS, lo que conlleva a aumentos en el  $C_{die}$  de aproximadamente 1.000.000 [\$], siendo la operación real más costosa. Además, se observa como la operación real de la micro-red contempla más partidas que las existentes en la simulación realizada. Es por esta razón que los costos de partida ( $C_{par}$ ) son 188.000 [\$] superiores a la simulación EMS.

Los costos de mantenimiento del grupo electrógeno ( $C_{man}$ ) y costos de falla ( $C_f$ ) son nulos o no son considerados para los costos totales, pues estos no están documentados con valores que permitan realizar un análisis real de la operación de la micro-red. Los costos por vertimientos de energía ( $C_{ver}$ ), son levemente más costosos para la operación real, debido a que este escenario resulta ser subóptimo debido a las variabilidades a las que esta sujeta el sistema<sup>3637</sup>.

A partir de los resultados presentados en la Tabla 5.5, se aprecia como los costos totales de operación para la simulación EMS son menores a los costos de operación real. Las principales diferencias se encuentran en el costo de operación por consumo diésel (ligado al costo de combustible) y en el costo de operación de baterías. Un resumen de la energía inyectada por generación solar y por generación diésel es presentada en la Figura 5.10, complementada con la Tabla 5.6, donde se registra la energía inyectada total para los tipos de generación presentes en cada escenario.

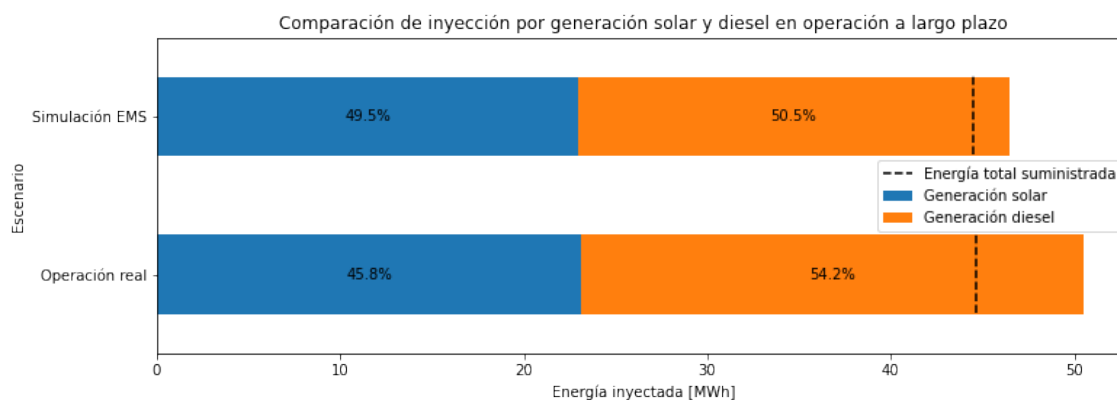


Figura 5.10: Penetración de ERNC para escenario de simulación EMS y operación real de la micro-red en el largo plazo.

<sup>36</sup> Un ejemplo son los episodios de festividades de la Tabla 4.8, donde los perfiles de demanda pueden verse incrementados. Estas variabilidades no son consideradas para el escenario de simulación EMS.

<sup>37</sup> Segundo semestre de 2017 no tiene completitud en la operación del EMS, teniendo algunas fechas con operación manual de la micro-red (ver Sección C.2).

Tabla 5.6: Resumen de energía inyectada para operación real y simulación EMS en el largo plazo.

Energía inyectada para simulación de largo plazo		
Escenario	Inyección	Energía inyectada [MWh]
Operación real	Solar	23,13
	Diésel	27,36
	BESS	15,45
Simulación EMS	Solar	22,97
	Diésel	23,47
	BESS	20,44

En la Figura 5.10 se exhiben diferencias en la penetración de ERNC entre los escenarios de operación, contando con una mayor penetración de ERNC en el escenario de simulación por EMS. Este comportamiento se le atribuye a que, si bien la generación solar en ambos escenarios es similar, el comportamiento de la generación diésel resulta ser distinto entre ambos escenarios, lo que, posteriormente, conlleva que la operación del BESS sea distinto debido a que el sistema debe suministrar un mismo nivel de demanda en ambos escenarios. El BESS con el que cuenta la micro-red inyecta menos energía en el escenario de operación real, esto se puede deber tanto a la presencia de periodos de operación manual de la micro-red donde se prioriza el uso de generación diésel, así como también a variaciones en el modelo de baterías usado en el EMS con respecto al conjunto de baterías existentes en la micro-red.

Para complementar la diferenciación de ambos escenarios, los niveles de inyección de energía del BESS junto a su comparación con respecto a la energía inyectada por el generador diésel, se presenta en la Figura 5.11.

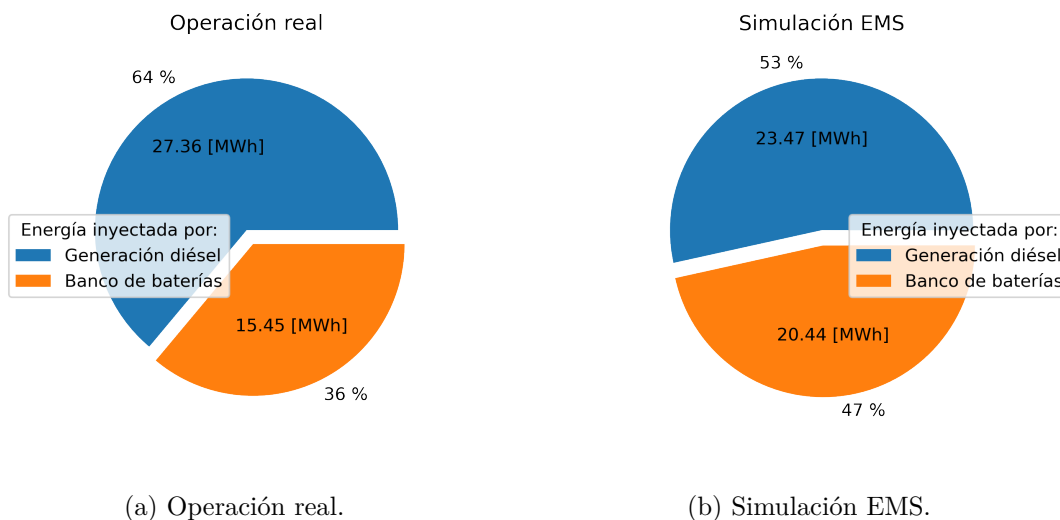


Figura 5.11: Comparación de energía inyectada para ambos escenarios en el largo plazo.

Los resultados vistos en la Figura 5.11 muestran que para la simulación a largo plazo,

los niveles de energía inyectada se diferencian entre ambos escenarios. Estas variaciones no se presentan en la simulación de corto plazo donde las consignas de inyección resultan ser similares entre ambos escenarios. Esto se le atribuye a que para el corto plazo se escoge una ventana temporal con completa certeza de la operación del EMS en la micro-red, mientras que para la simulación a largo plazo se tienen en cuenta fechas donde no se asegura la operación del EMS en el sistema, existiendo fechas donde se utiliza la operación manual de los despachos en la micro-red y no una completa operación por EMS.

Finalmente, se hace mención que los resultados vistos en esta simulación muestran altos niveles de semejanza para la inyección de generación solar y para la energía total suministrada. Por otro lado, variables como la energía inyectada por BESS e inyectada por diésel resultan ser ampliamente diferentes para esta simulación. Estos resultados son presentados en la Figura 5.12.

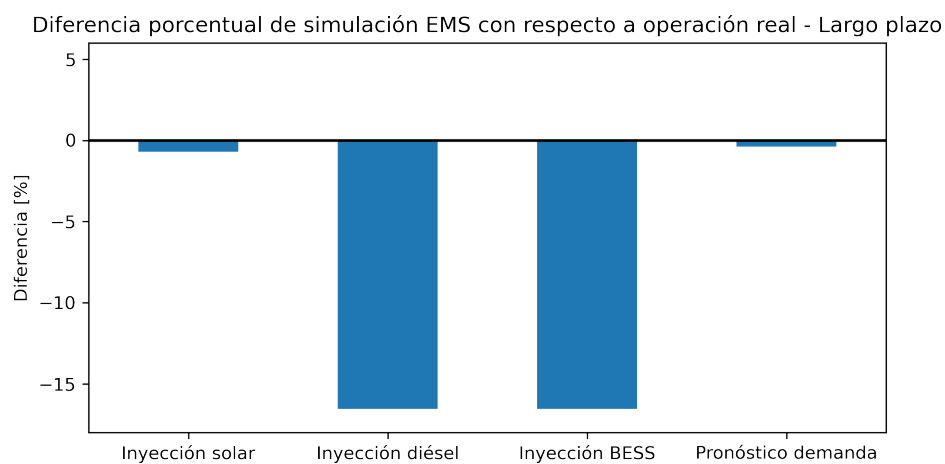


Figura 5.12: Diferencias porcentuales de simulación EMS con respecto a operación real en el largo plazo.

## 5.4. Resumen de resultados

La validación mediante simulación de EMS consta en la comparación de las variables de inyección y energía total inyectada. Estas son comparadas entre la simulación por EMS y la operación real de la micro-red. Las diferencias porcentuales entre ambos escenarios son presentados en la Tabla 5.7.

Tabla 5.7: Resumen de diferencias porcentuales para la simulación EMS con respecto a la operación real.

Resumen de resultados		
Diferencia en variable de simulación EMS con respecto a la de operación real	Corto plazo [%]	Largo plazo [%]
Inyección solar	-7,79	-0,70
Inyección diésel	6,28	-16,55
Inyección BESS	6,28	-16,55
Energía total suministrada	12,25	-0,37

Las diferencias negativas, presentadas en la Tabla 5.7, significan que la simulación EMS representa valores menores a los existentes en la operación real, mientras que diferencias positivas representan una simulación EMS con magnitudes mayores a la operación real.

## 5.5. Discusión de resultados

En este capítulo se plantea el EMS presente en la micro-red ESUSCON para, posteriormente, realizar simulaciones en una versión reducida del mismo y contrastar los resultados simulados con respecto a la operación real. Las simulaciones realizadas logran tener similitudes con la operación real, en especial, cuando existe una completa certeza en que los datos de operación real son obtenidos bajo la operación del EMS, como es el caso de la simulación a corto plazo.

Los resultados de la simulación a corto plazo muestran un menor uso del generador diésel, llegando a tener magnitudes similares al uso del BESS. Este comportamiento se logra debido a la elección de una ventana temporal donde se tiene certeza de la operación de la micro-red bajo el EMS planteado. Por otra parte, existen diferencias tanto para la generación solar como para la energía total suministrada, por lo que los datos del benchmark, si bien consiguen aproximarse al comportamiento esperado, no representa la real operación de la red. Esta diferencia se basa en que para observar resultados realistas, las consignas encontradas por el EMS simulado deben afectar el funcionamiento de la micro-red.

Posteriormente, los resultados de la simulación en el largo plazo muestran una gran similitud para la inyección solar y para el pronóstico de demanda, teniendo diferencias porcentuales menores a las encontradas en el corto plazo. Las diferencias en la inyección BESS y diésel se atribuyen a las descargas más profundas en el BESS de la simulación EMS. Este comportamiento se debe a los niveles de degradación presentes en el BESS de la micro-red, ya que el modelo utilizado no contempla una actualización de este aspecto en las baterías por lo que

se limita la capacidad de inyección del BESS, teniendo que suplir la demanda con inyección diésel. Si bien existen diferenciaciones entre los escenarios, se destaca que en el largo plazo se alcanza un valor similar de costo total de operación, siendo la simulación EMS levemente inferior. Los costos de operación por generación diésel y uso de baterías son los grandes diferenciadores de ambos escenarios, los que no logran tener un comportamiento idéntico debido a las limitaciones mencionadas.

Con respecto a las diferencias entre los resultados del corto y largo plazo, se destaca la similitud presente en el corto plazo para el balance de inyección por BESS y diésel, mientras que para el largo plazo no se presenta este comportamiento. No obstante, se logra una similitud en la energía total suministrada e inyección solar. Se hace mención que en el corto plazo la operación real contempla una operación completamente bajo las consignas del EMS, mientras que la operación a largo plazo no asegura una completa operación bajo EMS, además de estar sujeta a variabilidades del sistema a causa de festividades<sup>38</sup>, las que significan incrementos importantes en la demanda que, finalmente, son equiparadas con incrementos de generación diésel. Con respecto a la operación del BESS, las diferencias en las dos simulaciones realizadas se atribuyen a limitaciones por la degradación de las baterías. Esta no logra una influencia apreciable en el corto plazo por tener menos ciclos de descarga, mientras que se hace notable en el largo plazo por el aumento en el uso del conjunto de baterías.

Finalmente, el presente capítulo logra exhibir cómo los datos generados para el *benchmark* ESUSCON cumplen con el objetivo de realizar estudios sobre el sistema, tal como lo es el EMS implementado en la micro-red. Los resultados, si bien presentan las diferencias ya mencionadas, logran alcanzar niveles de similitud importantes para algunos atributos, por lo que la validación se logra de manera satisfactoria, pues se debe tener en cuenta las limitaciones existentes en la micro-red simulada, tales como la degradación de baterías y periodos de operación manual en el sistema.

---

<sup>38</sup> Ver Sección 4.2.8.

# Capítulo 6

## Conclusiones

En el presente trabajo de título se propone una novedosa metodología para la generación de micro-redes *benchmark* del tipo aisladas. La metodología logra guiar al diseñador en el proceso de confección. La aplicación de esta metodología a los datos existentes de la micro-red ESUSCON se realiza de manera satisfactoria, logrando seguir el flujo de trabajo planteado previamente, realizando la generación y publicación de una nueva micro-red *benchmark*.

La metodología propuesta logra los objetivos planteados, por lo que se espera que en aplicaciones a nuevas micro-redes *benchmark* aisladas, se tenga un desempeño satisfactorio tal como el logrado con la micro-red ESUSCON. Se destaca el carácter generalizado de los pasos iterativos de la metodología, donde se busca obtener el máximo uso de los datos disponibles para cada proyecto en que se genera una micro-red *benchmark*, con el fin de enriquecer la información publicada en dicho trabajo.

La aplicación de la metodología es realizada en la micro-red ESUSCON, culminando con la generación de una micro-red *benchmark* en la que se comparten más de 210.000 datos operacionales correspondientes a 6 años (2014 a 2019), en conjunto a información complementaria que permite realizar los estudios propuestos. Los principales aportes en la aplicación de la metodología se explican a continuación:

- En “Caracterización de la micro-red”, se presenta el marco técnico bajo el que opera la red. Además, se presenta un resumen de los componentes principales instalados. La información complementaria presentada, como los años de operación y las razones de su diseño, permiten un mejor entendimiento del propósito de la micro-red ESUSCON.
- El apartado de “Obtención de datos” logra obtener los datos propuestos según la metodología. El principal aporte de este apartado son los diversos criterios utilizados para la estimación de datos inexistentes. Estas estimaciones sirven como guía para futuras aplicaciones, así como también para dejar constancia de oportunidades de mejora en la implementación de estimaciones.
- La “Evaluación y generación de una micro-red *benchmark*” permite el análisis de los datos ya recopilados. El principal aporte de este apartado es la opción de volver a realizar pasos anteriores si es que no se satisfacen los requerimientos del *benchmark*. La opción de volver a realizar pasos previos, permite volver a la “Obtenciones de datos”, de forma tal que los objetivos del trabajo sean alcanzados.



Con respecto a la validación sobre el *benchmark*, las simulaciones realizadas presentan resultados parcialmente satisfactorios, teniendo como métricas las distintas inyecciones de energía que se tienen en el sistema. En estas simulaciones ocurre que para casos donde existe certeza de operación real bajo EMS, las inyecciones de BESS y diésel tienen un comportamiento similar, mientras que para inyección solar y energía total suministrada no son semejantes. Estas variables se estima que debiesen ser equiparadas en el largo plazo para los dos escenarios. Esta aseveración no puede ser concretada debido a que en el largo plazo no se cuenta con la certeza de la operación real bajo EMS.

Finalmente, se logra la confección de una metodología que permite generar micro-redes *benchmark* del tipo aisladas, cumpliendo así, el objetivo principal de la presente memoria. Se logra realizar en completitud los pasos propuestos en la metodología. Los datos de ESUSCON son utilizados para este propósito de manera satisfactoria, culminando en la publicación de una micro-red *benchmark* y la respectiva metodología de creación.

De forma análoga, los objetivos específicos de la memoria se logran cumplir, los cuales comienzan con la recopilación de información sobre las micro-redes *benchmark* existentes, continuando con una propuesta metodológica para la confección de este tipo de micro-redes, siguiendo con la aplicación de esta propuesta sobre los datos existentes sobre la operación de la micro-red ESUSCON y, finalizando, con una validación de los datos generados donde se simula el EMS existente en Huatacondo con los datos *benchmark*, contrastándolos con la operación real de la red, obteniendo importantes similitudes.

## Trabajos futuros

Para trabajos futuros se proponen las siguientes actividades:

- Incorporar y analizar nuevos métodos de estimación de datos, las que permitan una mejor representación de los datos inexistentes en los conjuntos de datos.
- La metodología propuesta está limitada a las micro-redes aisladas debido a la diversidad de características que se deben considerar para el estudio de micro-redes conectadas a la red. Una reestructuración de la metodología a partir del primer bloque se propone como trabajo futuro para poder incorporar micro-redes conectadas a la red en la metodología.
- La micro-red *benchmark* generada es validada según la operación bajo EMS con la que cuenta la operación real en distintas fechas. Debido a la intermitencia de la operación EMS los resultados obtenidos están condicionados a este comportamiento. Se propone la realización de otros métodos de validación que no presenten el inconveniente mencionado, tales como: estudios de resiliencia y coordinación de protecciones.

# Bibliografía

- [1] Lasseter, R. H. (2002, January). Microgrids. In 2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No. 02CH37309) (Vol. 1, pp. 305-308). IEEE.
- [2] Akpolat, A. N., & Dursun, E. (2016, December). From microgrid to smart grid: A review of campus projects. In Proc. Int. Eng., Sci. Educ. Conf. (pp. 379-387).
- [3] Barsali, S. (2014). Benchmark systems for network integration of renewable and distributed energy resources.
- [4] Strunz, K. (2006, June). Developing benchmark models for studying the integration of distributed energy resources. In 2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting (pp. 2-pp). IEEE.
- [5] Meinecke, S., Bornhorst, N., & Braun, M. (2018, September). Power system benchmark generation methodology. In NEIS 2018; Conference on Sustainable Energy Supply and Energy Storage Systems (pp. 1-6). VDE.
- [6] Ross, M., Abbey, C., Brissette, Y., & JOÓS, G. (2014). Real-time microgrid control validation on the Hydro-Québec distribution test line. CIGRE.
- [7] Farhangi, H. (2008, October). Intelligent micro grid research at BCIT. In 2008 IEEE Canada Electric Power Conference (pp. 1-7). IEEE.
- [8] Papathanassiou, S., Hatziargyriou, N., & Strunz, K. (2005, April). A benchmark low voltage microgrid network. In Proceedings of the CIGRE symposium: power systems with dispersed generation (pp. 1-8). CIGRE.
- [9] Alam, M. N., Chakrabarti, S., & Liang, X. (2020). A benchmark test system for networked microgrids. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 16(10), 6217-6230.
- [10] Meinecke, S., Bornhorst, N., & Braun, M. (2018, September). Power system benchmark generation methodology. In NEIS 2018; Conference on Sustainable Energy Supply and Energy Storage Systems (pp. 1-6). VDE.
- [11] Carreño, G., & Huepe Minoletti, C. (2013). Redes inteligentes: oportunidades de desarrollo y estrategia de implementación en Chile.
- [12] Palma-Behnke, R., Ortiz, D., Reyes, L., Jimenez-Estevez, G., & Garrido, N. (2011, July). A social SCADA approach for a renewable based microgrid—The Huatacondo project. In 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting (pp. 1-7). IEEE.
- [13] Garrido, N., L. Reyes, C. Alvial & P. Weber. 2011. Informe de cierre Proyecto ESUSCON. Centro de Energía, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 20p.

- [14] Álvarez, M. & Garrido, N. 2011. Informe Área Social - Proyecto ESUSCON. Centro de Energía, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 85p
- [15] Lanás, F. 2011. Desarrollo y validación de un modelo de optimización energética para una microrred. Memoria Ingeniero Civil Electricista. Santiago, Chile: Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. 98p.
- [16] Área Redes Inteligentes CE. Informe de daños colapso aerogenerador. Centro de Energía FCFM, Informe Técnico, 2014.
- [17] NAVIGANT Consulting. (2006, May). Microgrids research assessment - phase 2. final report. California Energy Commission and Department of Energy.
- [18] Series, I. R. E. (2009). Microgrids and active distribution networks. The institution of Engineering and Technology.
- [19] Ubilla, K., Jiménez-Estévez, G. A., Hernández, R., Reyes-Chamorro, L., Irigoyen, C. H., Severino, B., & Palma-Behnke, R. (2014). Smart microgrids as a solution for rural electrification: Ensuring long-term sustainability through cadastre and business models. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 5(4), 1310-1318.
- [20] Chowdhury, S. P., Chowdhury, S., & Crossley, P. A. (2011). UK scenario of islanded operation of active distribution networks with renewable distributed generators. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 33(7), 1251-1255.
- [21] Mirez, J. L., Chamorro, H. R., Ordonez, C. A., & Moreno, R. (2014, October). Energy management of distributed resources in microgrids. In 2014 IEEE 5th Colombian workshop on circuits and systems (CWCAS) (pp. 1-5). IEEE.
- [22] Soshinskaya, M., Crijns-Graus, W. H., Guerrero, J. M., & Vasquez, J. C. (2014). Microgrids: Experiences, barriers and success factors. *Renewable and sustainable energy reviews*, 40, 659-672.
- [23] Faisal, M., Hannan, M. A., Ker, P. J., Hussain, A., Mansor, M. B., & Blaabjerg, F. (2018). Review of energy storage system technologies in microgrid applications: Issues and challenges. *Ieee Access*, 6, 35143-35164.
- [24] Olivares, D. E., Mehrizi-Sani, A., Etemadi, A. H., Cañizares, C. A., Iravani, R., Kazerani, M., ... & Hatziargyriou, N. D. (2014). Trends in microgrid control. *IEEE Transactions on smart grid*, 5(4), 1905-1919.
- [25] Nassif, S. R. (2008, March). Power grid analysis benchmarks. In 2008 Asia and South Pacific Design Automation Conference (pp. 376-381). IEEE.
- [26] Soman, S. S., Zareipour, H., Malik, O., & Mandal, P. (2010, September). A review of wind power and wind speed forecasting methods with different time horizons. In North American Power Symposium 2010 (pp. 1-8). IEEE.
- [27] Diagne, H. M., Lauret, P., & David, M. (2012, May). Solar irradiation forecasting: state-of-the-art and proposition for future developments for small-scale insular grids. In WREF 2012-World Renewable Energy Forum.
- [28] Suganthi, L., & Samuel, A. A. (2012). Energy models for demand forecasting—A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 16(2), 1223-1240.
- [29] Widén, J., Carpman, N., Castellucci, V., Lingfors, D., Olauson, J., Remouit, F., ... &

- Waters, R. (2015). Variability assessment and forecasting of renewables: A review for solar, wind, wave and tidal resources. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44, 356-375.
- [30] Amini, M. H., Kargarian, A., & Karabasoglu, O. (2016). ARIMA-based decoupled time series forecasting of electric vehicle charging demand for stochastic power system operation. *Electric Power Systems Research*, 140, 378-390.
- [31] Guo, L., Liu, W., Jiao, B., Hong, B., & Wang, C. (2014). Multi-objective stochastic optimal planning method for stand-alone microgrid system. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 8(7), 1263-1273.
- [32] Ayaz, M. S., Azizipanah-Abarghooee, R., & Terzija, V. (2018, June). European LV microgrid benchmark network: Development and frequency response analysis. In *2018 IEEE international energy conference (ENERGYCON)* (pp. 1-6). IEEE.
- [33] Plet, C. A., Graovac, M., Green, T. C., & Iravani, R. (2010, July). Fault response of grid-connected inverter dominated networks. In *IEEE PES general meeting* (pp. 1-8). IEEE.
- [34] Farhangi, H. (2008, October). Intelligent micro grid research at BCIT. In *2008 IEEE Canada Electric Power Conference* (pp. 1-7). IEEE.
- [35] Short, T. A. (2003). *Electric power distribution handbook*. CRC press.
- [36] Alam, M. N., Das, B., & Pant, V. (2016). An interior point method based protection coordination scheme for directional overcurrent relays in meshed networks. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 81, 153-164.
- [37] Baran, M. E., & Wu, F. F. (1989). Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing. *IEEE Power Engineering Review*, 9(4), 101-102.
- [38] Savier, J. S., & Das, D. (2007). Impact of network reconfiguration on loss allocation of radial distribution systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 22(4), 2473-2480.
- [39] Ojaghi, M., & Mohammadi, V. (2017). Use of clustering to reduce the number of different setting groups for adaptive coordination of overcurrent relays. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 33(3), 1204-1212.
- [40] C. N. de Energía, Norma técnica de seguridad y calidad de servicio. Chile: Gobierno de Chile, 2019.
- [41] Syrri, A. L., & Mancarella, P. (2016). Reliability and risk assessment of post-contingency demand response in smart distribution networks. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 7, 1-12.
- [42] Núñez-Mata, O., Palma-Behnke, R., Valencia, F., Mendoza-Araya, P., & Jiménez-Estévez, G. (2018). Adaptive protection system for microgrids based on a robust optimization strategy. *Energies*, 11(2), 308.
- [43] Meinecke, S., Sarajlić, D., Drauz, S. R., Klettke, A., Lauven, L. P., Rehtanz, C., ... & Braun, M. (2020). Simbench—a benchmark dataset of electric power systems to compare innovative solutions based on power flow analysis. *Energies*, 13(12), 3290.
- [44] Núñez Mata, Ó. (2018). Sistema de protección adaptativo para micro-redes basado en optimización robusta. Santiago, Chile: Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. 154p.

- [45] Llanos Proaño, J. (2012).Método para la Generación de Perfiles de Demanda en Comunidades Aisladas y Predicción de Demanda de Corto Plazo, para Micro-Redes Basadas en Energías Renovables. Disponible en <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/102768>
- [46] Weber Cornejo, P. (2011).Diseño e Implementación de Plataforma Scada para Sistema de Electrificación Sustentable en la Localidad de Huatacondo. Disponible en <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/104356>
- [47] Roje Godoy, T. (2015).Diseño de estrategia de control para gestión de demanda de micro-redes aisladas. Disponible en <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/133126>
- [48] Retamal Vallejos, C. (2018).Desarrollo de software de evaluación de sistemas de almacenamiento basado en baterías enfocado en modelos de envejecimiento para su uso en un EMS. Disponible en <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/169776>
- [49] R. Palma-Behnke et al., .<sup>A</sup> Microgrid Energy Management System Based on the Rolling Horizon Strategy,in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 4, no. 2, pp. 996-1006, June 2013, doi: 10.1109/TSG.2012.2231440

# ANEXOS

# Anexo A

## Figuras y Tablas complementarias

En el siguiente Anexo se publican las Figuras y Tablas complementarias a las ya compartidas en las secciones anteriores de la presente memoria.

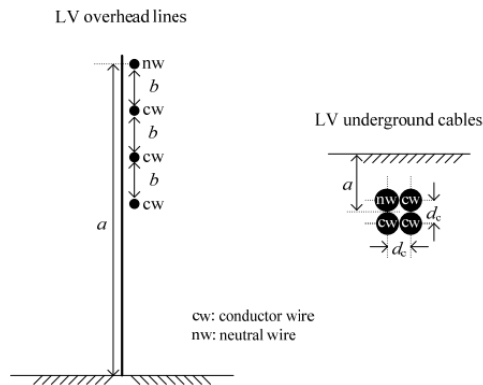


Figura A.1: Geometría de líneas aéreas y soterradas en benchmark de redes de distribución en bajo voltaje. Fuente: Benchmark Systems for Network Integration of Renewable and Distributed Energy Resources - Task Force C6.04

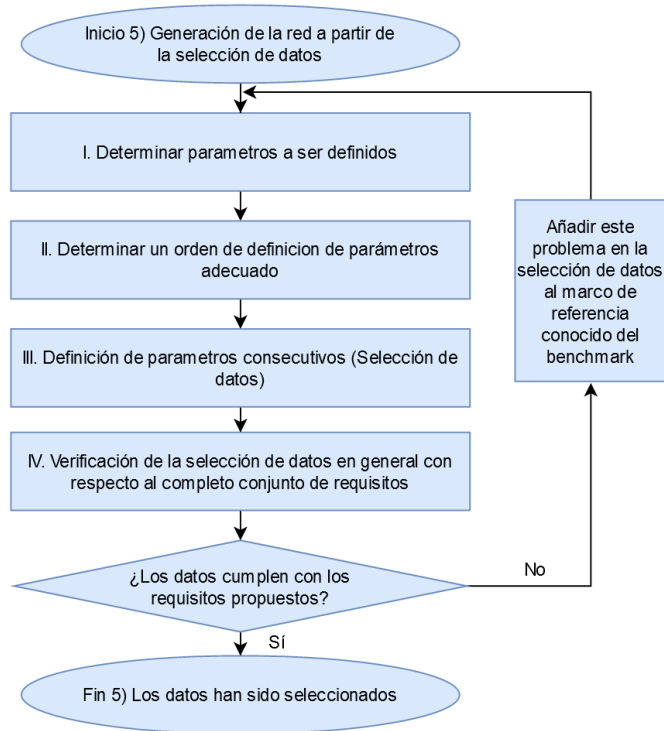


Figura A.2: Diagrama de flujo específico para el paso 5) selección de datos - Fuente: Power System Benchmark Generation Methodology

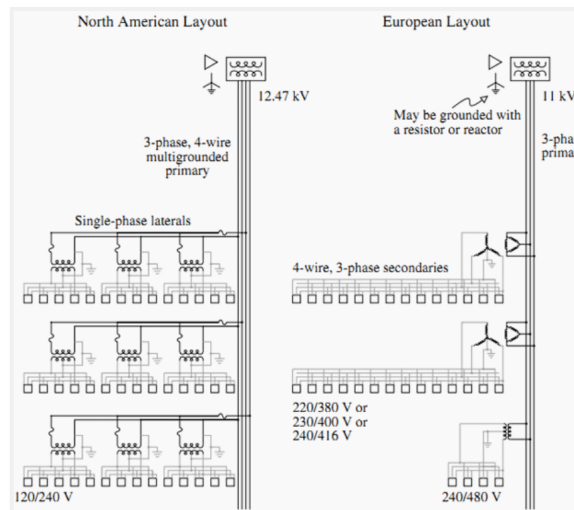


Figura A.3: Diferencias generales en un sistema de distribución norteamericano y europeo - Fuente: <https://crushtymks.com/es/high-voltage/976-north-american-versus-european-distribution-systems.html>



Tabla A.1: Geometría de líneas aéreas en benchmark para redes de distribución en bajo voltaje diseñada por CIGRE.

ID del conductor	Tipo	Size [mm <sup>2</sup> ]	Nro. hebras	d <sub>c</sub> [cm]	R' <sub>ac</sub> 50°C [Ω/km]	GMR	a [m]	b [m]
OH1	Al	70	19	1.05	0.491	0.398	8	0.3
OH2	Al	25	7	0.63	1.320	0.228	8	0.3
OH3	Al	16	7	0.51	2.016	0.185	8	0.3

Tabla A.2: Geometría de líneas soterradas en benchmark para redes de distribución en bajo voltaje diseñada por CIGRE.

ID del conductor	Tipo	Size [mm <sup>2</sup> ]	Nro. hebras	d <sub>c</sub> [cm]	R' <sub>ac</sub> 50°C / 70°C [Ω/km]	GMR	a [m]
UG1	NA2XY	240	1	1.75	0.162	0.634	0.90
UG2	NA2XY	150	1	1.38	0.265	0.501	0.90
UG3	NA2XY	50	1	0.80	0.822	0.289	0.90

Tabla A.3: Datos de las líneas en el *benchmark* de múltiples micro-redes interconectadas.

Barra i	Barra j	Longitud [km]	Resistencia [ohm]	Reactancia [ohm]	Corriente nominal [A]	SCCR [kA]
101	102	3	0.0927	0.1431	1000	114.4
101	103	2.4	0.09336	0.11988	890	83.8
101	104	3	0.0927	0.1431	1000	114.4
101	105	1.6	0.06224	0.07992	890	83.8
101	106	1.6	0.06224	0.07992	890	83.8
102	103	2	0.0778	0.0999	890	83.8
102	105	1.5	0.05835	0.07493	890	83.8

Tabla A.4: Datos de cargas en el *benchmark* de múltiples micro-redes interconectadas.

ID barra	Carga total de barra		Carga Crítica		Carga en la barra
	[kW]	[kVAr]	[kW]	[kVAr]	% de la carga total
101	0	0	0	0	0
102	2125	336	450	65	6.9
103	3329	1023	650	124	10.81
104	2050	555	200	50	6.66
105	1257	310	200	35	4.08

Tabla A.5: Generación distribuida en *benchmark* de múltiples micro-redes interconectadas.

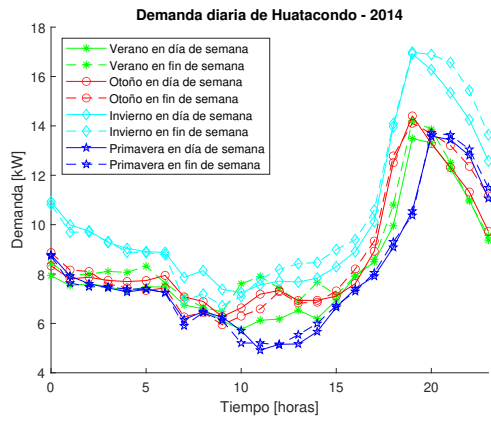
ID barra	Tipo de generación	Potencia activa [kW]	Potencia reactiva máxima [kVAr]	Micro-red
102	PV	2000	400	MG1
103	PV	2400	480	MG1
104	PV	2000	400	MG1
202	PV	1600	320	MG2
203	PV	1600	320	MG2

Tabla A.6: Datos de generadores sincrónicos en el *benchmark* de múltiples micro-redes interconectadas.

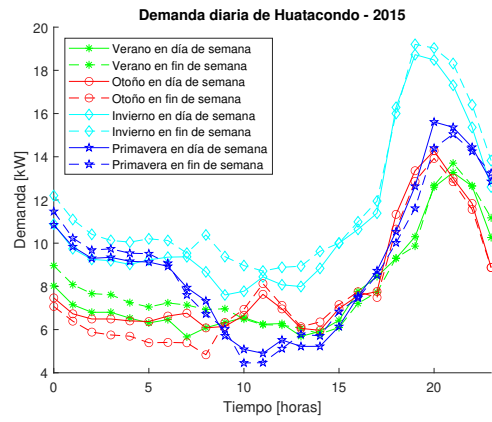
ID Barra	Capacidad de la unidad [kVA]	Número de unidades	Potencia reactiva máxima [kVAr]	Micro-red
101	5000	3	5000	MG1
201	2000	3	2000	MG2
301	2000	3	2000	MG3
401	2000	3	2000	MG4

Tabla A.7: Capacidad de almacenamiento en *benchmark* de múltiples micro-redes interconectadas.

ID Barra	Capacidad de equipo de almacenamiento [kWh]	Potencia máxima suministrada [kW]	Micro-red
102	3000	2000	MG1
103	4000	2400	MG1
104	3000	2000	MG1
202	4000	1600	MG2
203	4000	1600	MG2

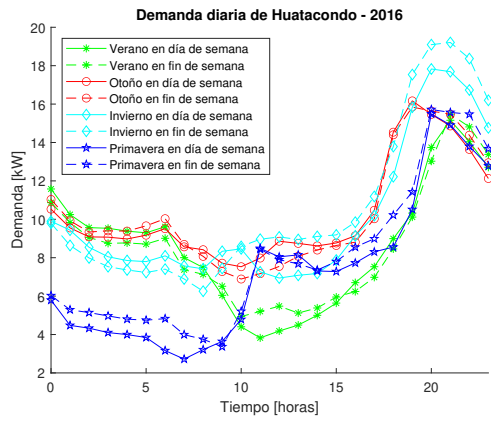


(a) Año 2014.

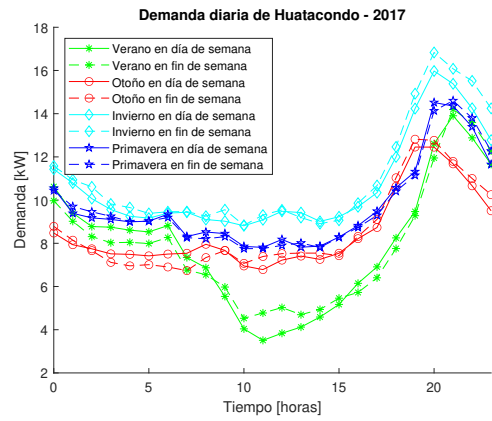


(b) Año 2015.

Figura A.4: Perfiles de demanda para las distintas estaciones de 2014 y 2015 en Huatacondo.

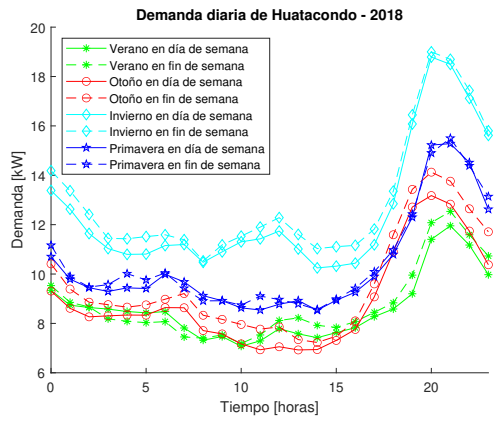


(a) Año 2016.

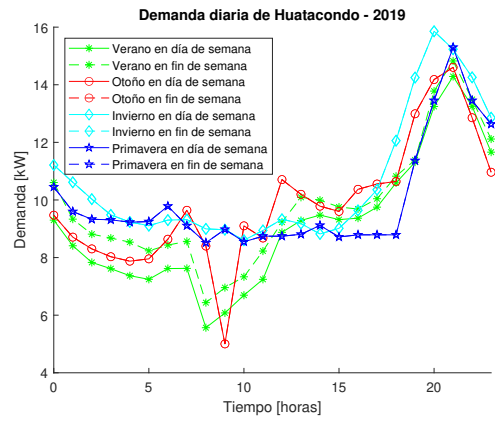


(b) Año 2017.

Figura A.5: Perfiles de demanda para las distintas estaciones de 2016 y 2017 en Huatacondo.



(a) Año 2018.



(b) Año 2019.

Figura A.6: Perfiles de demanda para las distintas estaciones de 2018 y 2019 en Huatacondo.

Correlaciones entre atributos de potencia activa

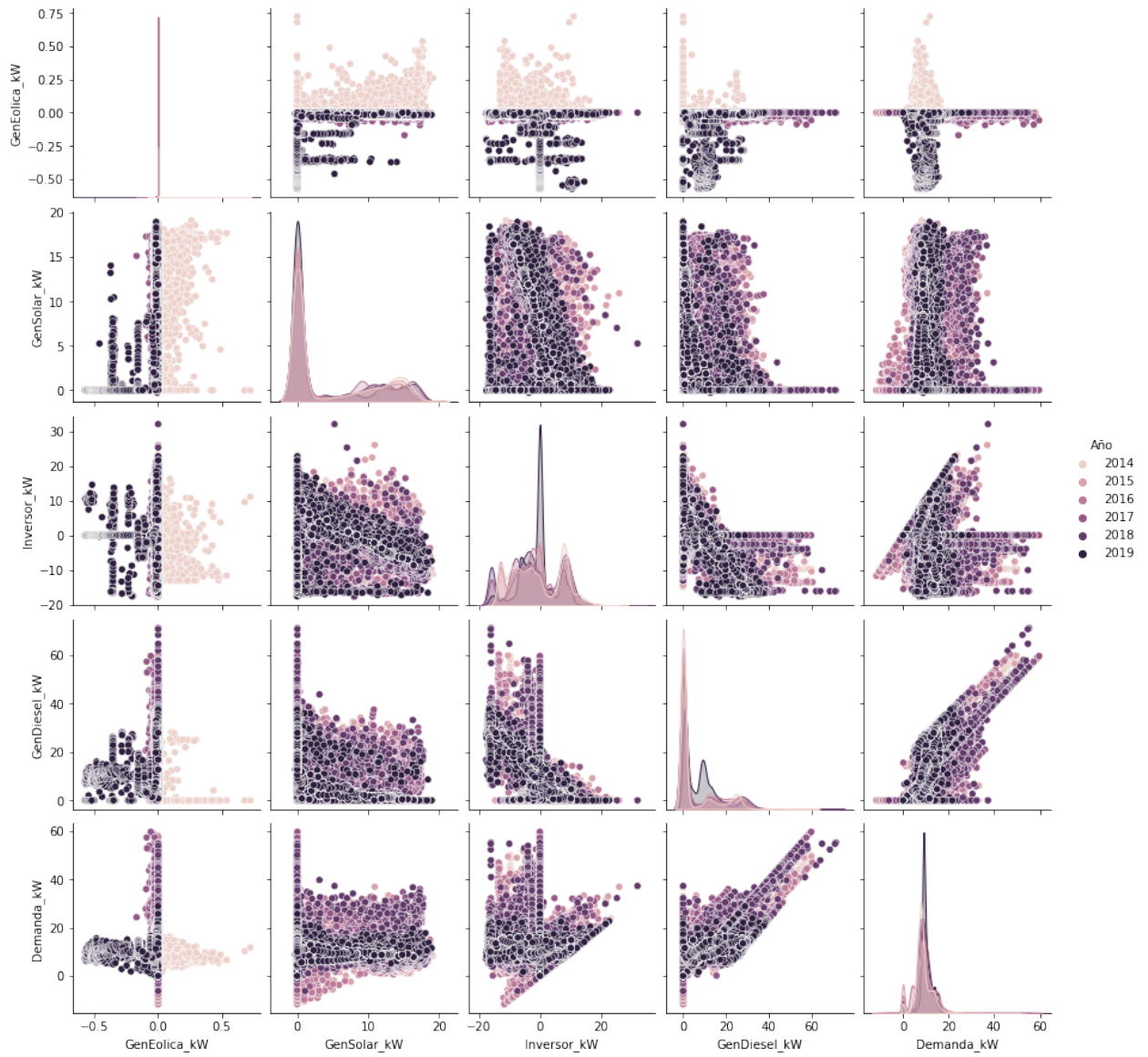


Figura A.7: Correlaciones entre atributos de potencia activa en *benchmark* ESUSCON.

Correlaciones entre atributos de potencia reactiva

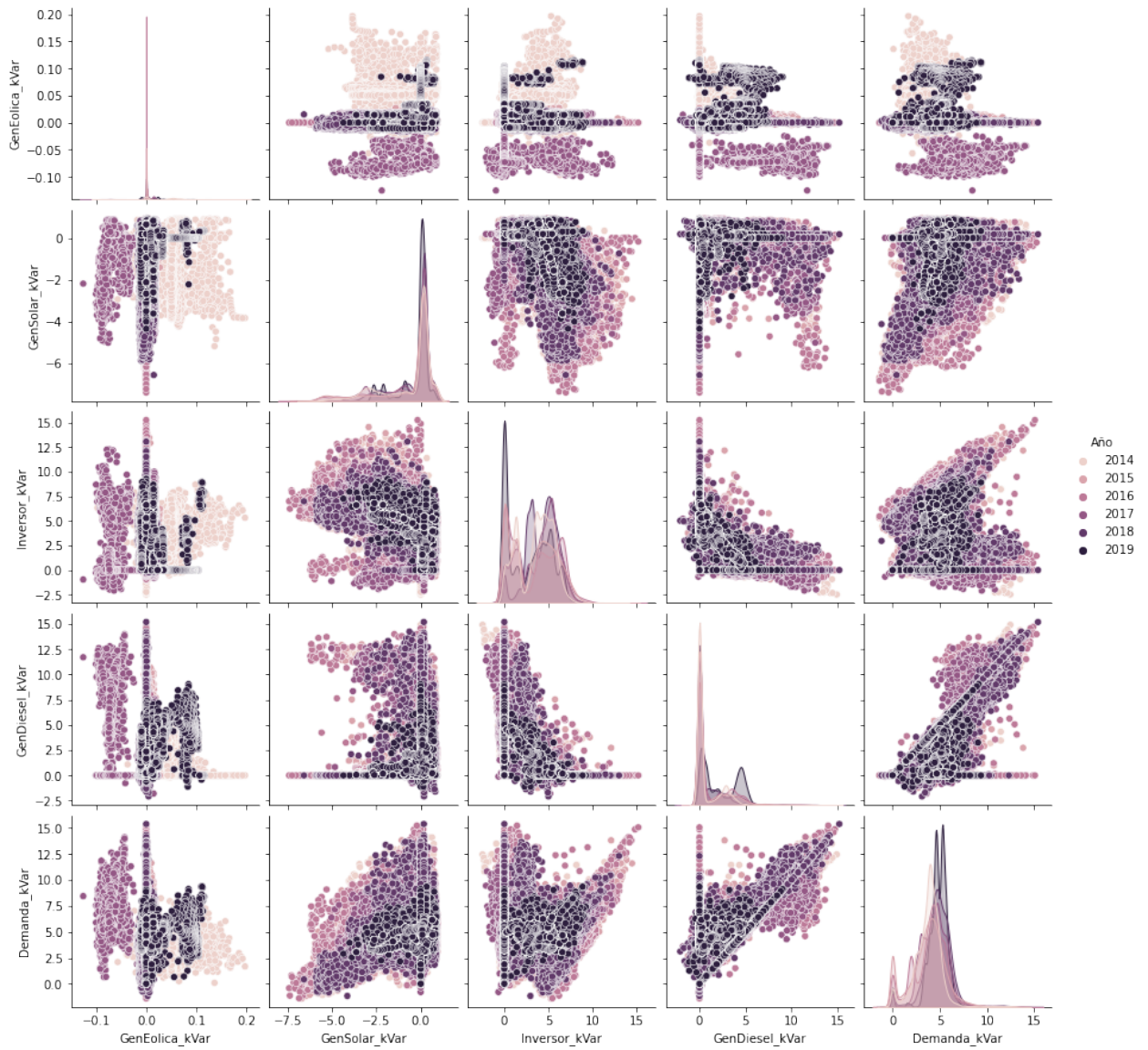


Figura A.8: Correlaciones entre atributos de potencia reactiva en *benchmark* ESUSCON.

Tabla A.8: Atributos de los datos a utilizar para la generación de la micro-red *benchmark* de ESUSCON.

Nombre del atributo
'Periodo'
'Diesel.Monitorio.PotenciaActiva [W]'
'Diesel.Monitorio.PotenciaReactiva [W]'
'Inversor.Estado.BateriasCorriente [A]'
'Inversor.Estado.BateriasTension [V]'
'M40pm750e.DatosMedidos.PotenciaActiva1 [kW]'
'M40pm750e.DatosMedidos.PotenciaReactiva1 [kVar]'
'M40pm750e.DatosMedidos.Tension1N [V]'
'M40pm750f.DatosMedidos.PotenciaActivaTotal [kW]'
'M40pm750f.DatosMedidos.PotenciaReactivaTotal [kVar]'
'M40pm750f.DatosMedidos.TensionFaseNeutroMedia [V]'
'T15pm750.DatosMedidos.PotenciaActivaTotal [kW]'
'T15pm750.DatosMedidos.PotenciaReactivaTotal [kVar]'
'T15pm750.DatosMedidos.TensionFaseNeutroMedia [V]'
'T15pm810.DatosMedidos.PotenciaActivaTotal [kW]'
'T15pm810.DatosMedidos.PotenciaReactivaTotal [kVar]'
'T15pm810.DatosMedidos.TensionFaseNeutroMedia [V]'
'T19pm750.DatosMedidos.PotenciaActivaTotal [kW]'
'T19pm750.DatosMedidos.PotenciaReactivaTotal [kVar]'
'T19pm750.DatosMedidos.TensionFaseNeutroMedia [V]'
'T19pm810.DatosMedidos.PotenciaActivaTotal [kW]'
'T19pm810.DatosMedidos.PotenciaReactivaTotal [kVar]'
'T19pm810.DatosMedidos.TensionFaseNeutroMedia [V]'
'T24pm750.DatosMedidos.Frecuencia [Hz]'
'T24pm750.DatosMedidos.PotenciaActivaTotal [kW]'
'T24pm750.DatosMedidos.PotenciaReactivaTotal [kVar]'
'T24pm750.DatosMedidos.TensionFaseNeutroMedia [V]'

# Anexo B

## Procesos metodológicos complementarios

En el presente Anexo, se adjuntan procesos metodológicos complementarios utilizados para la confección del *benchmark* de ESUSCON, estos son:

- Método de estimación de datos inexistentes.
- Ubicación de los datos medidos.
- Distribución de cargas en la micro-red *benchmark* ESUSCON.

### B.1. Método de estimación de datos inexistentes

A causa de que el conjunto de datos utilizado para la elaboración de la micro-red *benchmark* no cuenta con completitud en sus datos (ver datos incompletos en Tabla 4.1), se necesita realizar una estimación de estos con el fin de obtener un completo conjunto de datos para la generación del *benchmark*. Debido al uso de 8 atributos para la generación del *benchmark*<sup>39</sup>, se debe tener en consideración el reemplazo de cada una de sus variables en el caso de no existir información.

Para esclarecer el proceso de estimación de datos inexistentes para la micro-red *benchmark*, se presenta un diagrama de flujo en la Figura B.1.

---

<sup>39</sup> Potencias activas y reactivas de: generación solar, generación eólica, inversor y generador diesel.



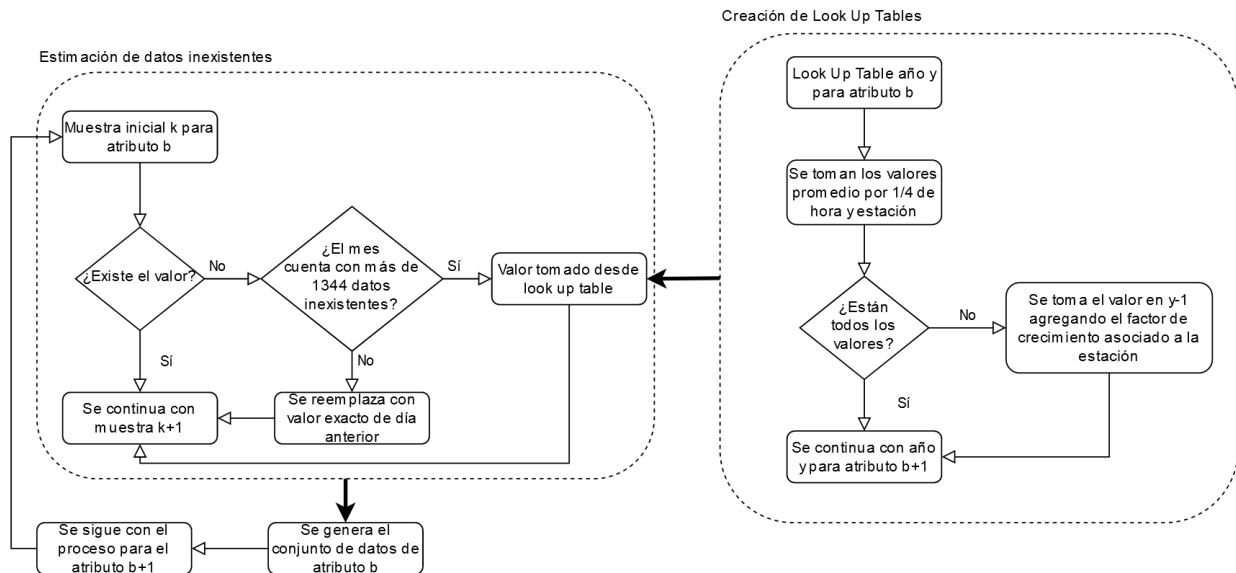


Figura B.1: Diagrama de flujo para estimación de datos inexistentes

A partir de la Figura B.1 se observa que los datos pueden ser obtenidos principalmente por datos homologados de el día anterior o por la consulta de *Look Up Tables* (LUTs)<sup>40</sup>. Esta última estimación puede ser en base a datos de la estación del año correspondiente y en caso de no tener datos disponibles, se realiza con respecto a datos de años anteriores ponderados por un factor de crecimiento.

El criterio que se utiliza para escoger un método de estimación por sobre otro, es la cantidad de datos inexistentes por cada mes (ver en Tabla B.1), este criterio busca tener más representatividad en los datos estimados y es discutido en la Sección B.1.1.

Los métodos de estimación son presentados en las Secciones B.1.2 y B.1.3, y en resumen se espera un mejor desempeño de la estimación mediante LUT para meses con grandes cantidades de datos inexistentes, y en caso contrario la estimación mediante una réplica de los datos del día anterior.

### B.1.1. Criterio para elección de método de estimación de datos

Para ejemplificar el criterio utilizado, se presenta en la Tabla B.1 la cantidad de datos inexistentes por mes y por año en los datos de operación previo a la estimación de datos.

<sup>40</sup> Tablas con valores predefinidos para el rápido acceso a sus datos

Tabla B.1: Datos inexistentes en datos de operación con muestreo de 15 minutos previo a estimación de datos.

	Datos inexistentes para años y meses					
mes/año	2014	2015	2016	2017	2018	2019
1	2975	0	0	2975	0	96
2	2688	0	672	2688	0	768
3	1248	0	2976	2976	0	2784
4	0	0	0	864	0	2880
5	0	0	0	288	96	2976
6	0	192	0	0	864	2880
7	0	96	0	0	2016	2976
8	0	0	0	0	0	2976
9	0	0	384	192	0	2880
10	0	0	288	1248	480	2976
11	0	288	2784	0	96	2880
12	0	0	2881	0	0	2881

### B.1.2. Estimación con método de *Look Up Tables*

Para la estimación de datos se toma en consideración la generación de *Look Up Tables* (*LUT*) para los perfiles de cada uno de los 8 atributos en distintos años, estos cuentan con un muestreo de 15 minutos para un día típico en cada estación del año. Estos valores son obtenidos a partir de los promedios presentes en los datos existentes del mismo año, en caso de no existir los datos necesarios en esa ventana temporal, se utilizan los de años anteriores ponderados por un factor de crecimiento.

El factor de crecimiento utilizado se presenta en la ecuación B.1.

$$F.crecimiento_{i,w,h,m,b} = \frac{\overline{Valor}_{i-1,w,h,m,b} - \overline{Valor}_{i-2,w,h,m,b}}{\overline{Valor}_{i-2,w,h,m,b}} \quad (B.1)$$

Donde:

- $F.crecimiento_{i,w,h,m,b}$ : Es el factor de crecimiento para el año  $i$ , estación  $w$ , hora  $h$ , minuto  $m$  y atributo  $b$ .
- $\overline{Valor}_{i,w,h,m,b}$ : Valor promedio del valor del atributo  $b$  para el año  $i$ , estación  $w$ , hora  $h$  y minuto  $m$ .

Los valores obtenidos para los factores de crecimiento de las distintas estaciones de los años que contempla el *benchmark* son presentados en la Tabla B.2. Debido a que la ecuación B.1 contempla 2 años anteriores para obtener el factor de crecimiento, los 2 primeros años (2014 y 2015) no cuentan con una estimación de este indicador. Además, se contempla la creación de factores de crecimiento solo cuando requieran ser utilizados, es debido a esta razón que solo existen 204 valores creados.

Tabla B.2: Valores de factores de crecimiento para generación diesel activa y reactiva.

	año	semana	hora	minuto	GenDiesel_kW [fc] <sup>a</sup>	GenDiesel_kVar [fc]
0	2017	13	0	0	0.81228695	0.59134845
1	2017	13	0	15	0.82184298	0.51924795
2	2017	13	0	30	0.86763156	0.53390827
3	2017	13	0	45	0.88506108	0.55048777
...	...	...	...	...	...	...
200	2019	52	22	30	0.98963527	1.89638554
201	2019	52	22	45	0.96789207	1.77502594
202	2019	52	23	0	0.94380207	1.74819646
203	2019	52	23	45	0.79009744	1.81719541

<sup>a</sup> Factor de crecimiento

El uso de *LUT* tiene como condición de uso la cantidad de datos inexistentes en el mes en donde se requieren estimar datos. Esto debido a que para meses donde el numero de datos inexistentes sea menor (una cantidad menor se puede entender como menos de 14 días), se estima que la representatividad del comportamiento real se logra de manera más completa con los datos de semanas anteriores que a las obtenidas a partir del valor promedio para la misma estación del año.

En casos donde el mes donde se estén estimando los datos cuente con una cantidad importante de datos inexistentes (mayor a las 2 semanas), se observa como se obtienen comportamientos mas adecuados a la operación real estimando estos datos a partir de las *LUT* generadas por estaciones del mismo año. Un problema que se observa al implementar una estimación exclusiva con *LUT*, es que al existir una cantidad de datos inexistentes considerable en la estación de la *LUT*, los datos estimados pueden representar a comportamientos puntuales de la operación y no a tendencias reales.

El factor de crecimiento utilizado es el cambio porcentual de una misma muestra para el año anterior y el de la muestra al año anterior a este, por lo que se asume que la muestra inexistente en el año actual podría tener un crecimiento semejante.

Posteriormente, a modo de ejemplificar la forma que tiene una *LUT* para esta aplicación, se presentan los datos iniciales y finales de la información generada para el *benchmark* ESUSCON en la Tabla B.3.

Tabla B.3: Datos iniciales y finales de *Look Up Table* de los atributos necesarios para *benchmark* ESUSCON.

	Año	semana	hora	minuto	GenDiesel_kW	GenDiesel_kVar
0	2014	13	0	0	15.0021145	2.7891444
1	2014	13	0	15	13.9752869	2.89785135
2	2014	13	0	30	12.9510366	3.03631152
3	2014	13	0	45	11.8995027	3.02838795
4	2014	13	1	0	10.8369799	3.17550303
...	...	...	...	...	...	...
2299	2019	52	22	45	27.3296799	4.15000864
2300	2019	52	23	0	26.3660203	4.13037799
2301	2019	52	23	15	27.9359635	2.36265092
2302	2019	52	23	30	27.9359635	2.36265092
2303	2019	52	23	45	19.7550999	4.29342212

### B.1.3. Estimación con método de replica de datos de semana anterior

Este método se utiliza cuando en el mes al que se le este aplicando la estimación de datos tenga pocas entradas inexistentes (criterio visto en B.1.1), para este método se espera poder replicar el comportamiento previo de la micro-red con el fin de no obtener datos disonantes en días particulares.

A modo de esclarecer la existencia de datos anormales en el benchmark, se ejemplifica en la Figura B.2 el reemplazo mediante LUTs en un mes con bajo nivel de datos inexistentes (96 según Tabla B.1), en vez de estimación mediante el método de semana anterior.

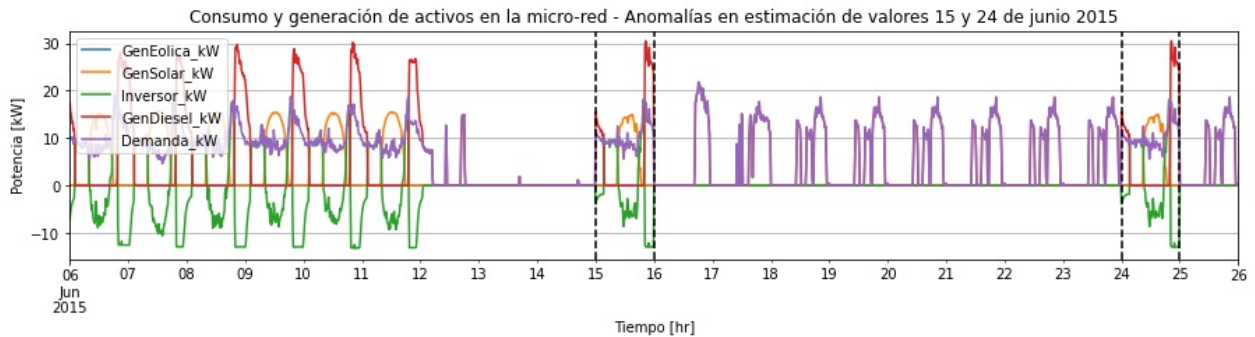


Figura B.2: Estimación de datos mediante LUTs en junio 2015.

En la Figura B.2 se observa cómo al estimar con datos de la estación mediante LUTs, se puede entrar en conflicto con la operación específica de la micro-red en ventanas temporales específicas, teniendo datos anómalos en generación ERNC como se observa en los días 15 y 24 de junio 2015. Es por esta razón que se propone la estimación mediante replica de datos de la semana anterior, donde se espera obtener comportamientos similares al esperado.

En la Figura B.3 se exhibe como una estimación mediante el método de estimación mediante la replica de los datos del día anterior al de los datos inexistentes, muestra un desempeño con menor grado de anomalías con respecto a la operación instantánea.

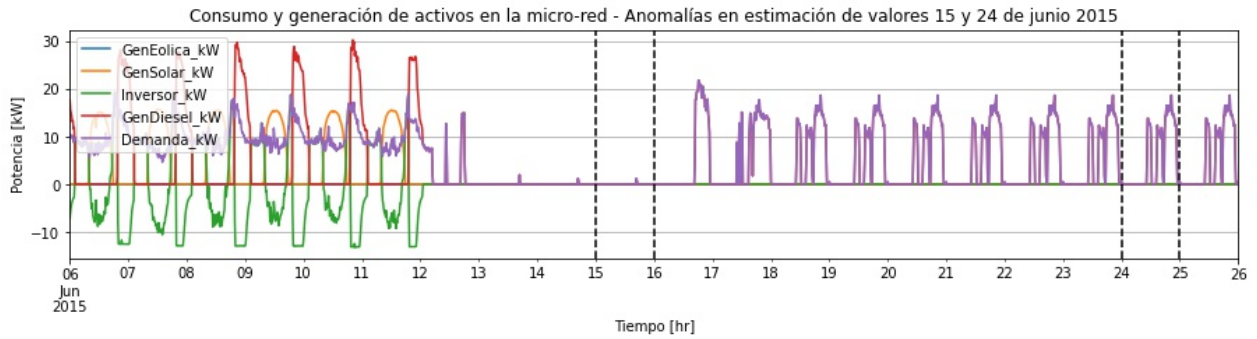


Figura B.3: Estimación de datos mediante replica del día anterior en junio 2015.

En la Figura B.3 se observa como después del 12 de junio 2015 la micro-red esta sometida a una operación que prescinde del banco de baterías y generación de renovables. Por lo que su demanda es abastecida exclusivamente por el generador diesel.

## B.2. Ubicación de los datos medidos

Los datos medidos en la operación de la micro-red de ESUSCON son obtenidos a través de el sistema SCADA de la red, estas mediciones corresponden a los datos presentados en la Tabla A.8. Los datos son medidos por los dispositivos existentes en la micro-red presentados en la Tabla B.4, de igual manera se presenta la numeración de los postes dentro de la red de distribución presentada en la Figura B.4 a la que pertenece cada uno de los dispositivos.

Los información utilizada para la ubicación de los datos es la realizada en [46], donde se explican los alcances y especificaciones de los equipos utilizados en el desarrollo del sistema SCADA.

Tabla B.4: Ubicación de centrales de medida en sistema SCADA de Huatacondo.

Central de medida	Poste
PM750-InversorGeVi	P24
PM810-P19	P19
PM750-P19	P19
PM750-PV1	P40
PM750-Eolico	P40
PM810-P15	P15
PM750-P15	P15
PM810-Agua	P1
PM750-PV2	P1

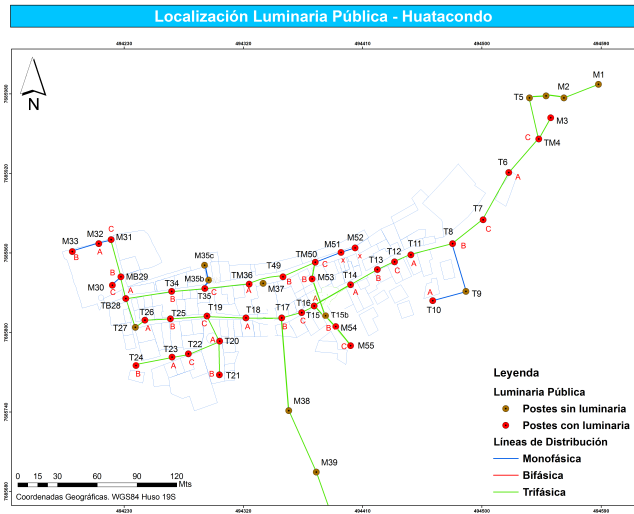


Figura B.4: Red de distribución de Huatacoondo con la numeración de los postes de distribución.

Finalmente, se realiza el alcance de que este trabajo de título no toma en consideración la variabilidad en la medición de los distintos dispositivos, la que es discutida en el trabajo [46]. Esto se debe a que para generar un *benchmark* con consistencia en los datos generados estos debe tener únicos valores por tupla, de optar por una consideración en las variabilidades de las mediciones se tendría que generar un conjunto de datos más extenso, considerando las variaciones propias para cada dispositivo de medición.

### B.3. Distribución de cargas en la micro-red *benchmark* ESUSCON

La distribución de cargas en la red eléctrica de Huatacacondo, tal como se discute en el Capítulo 4.2.4 corresponde a la aglomeración de puntos de carga en distintas áreas de la red, estas áreas son presentadas en la Figura B.5.



Figura B.5: Distribución de casas en Huatacacondo con 7 áreas de consumo establecidos.

Estos datos son extraídos del trabajo realizado en [47], donde se especifica que si bien existen más casas que las presentadas en la Figura B.5, estas están desocupadas la mayor parte del año, por lo que la población fija corresponde a aproximadamente 25 hogares distribuidos en las 7 áreas mencionadas.

El método que se utiliza para la distribución de la demanda consiste en considerar la cantidad de casas en un área y dividirlos por el total de viviendas en Huatacacondo, así se obtiene un porcentaje de participación en la demanda de dicha área. La Ecuación B.2 permite realizar esta distribución.

$$\%P_i = \frac{C_i}{C_T} \quad (\text{B.2})$$

Donde:

- $\%P_i$ : Porcentaje de participación en la demanda de área  $i$ .
- $C_i$ : Número de casas ubicadas en área  $i$ .
- $C_T$ : Número de casas totales en la red de distribución.

La población fija se aproxima a 25 hogares, pero esta crece notablemente para algunas festividades, como por ejemplo: Asunción de la Virgen (ver Tabla 4.8). La completitud de las cargas se exhibe en la Figura B.6.

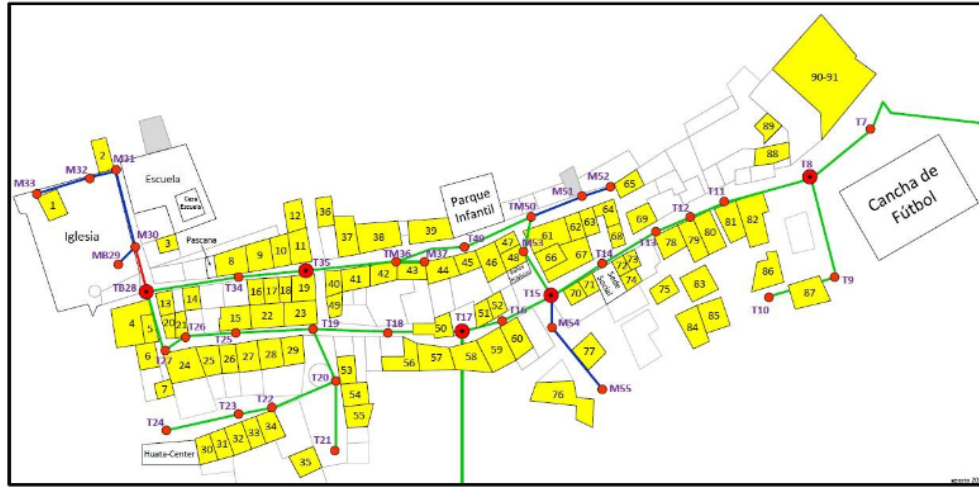


Figura 8. Plano de casas en Huatacondo

Figura B.6: Distribución de casas en Huatacondo.

Finalmente, los resultados para la distribución de cargas en Huatacondo se presenta en el Capítulo 4.2.4 en la Tabla 4.3.



# Anexo C

## Resultados complementarios al caso de estudio

En este Anexo, se comparten resultados complementarios al caso de estudio, estos corresponden a:

- Comparativa de resultados bajo distintas tasas de refresco para iteraciones de EMS.
- Fechas validadas donde opera el EMS en la micro-red ESUSCON

### C.1. Comparativa de resultados bajo distintas tasas de refresco para iteraciones de EMS

Con el fin de comparar los resultados en el corto plazo para las distintas tasas de refresco con las que se configura el EMS de ESUSCON, en la Figura C.1 se presentan los resultados del *SoC* del BESS para la operación de 24 horas de la micro-red. Se hace mención de que la operación real tiene una tasa de refresco en el EMS de 15 [min].

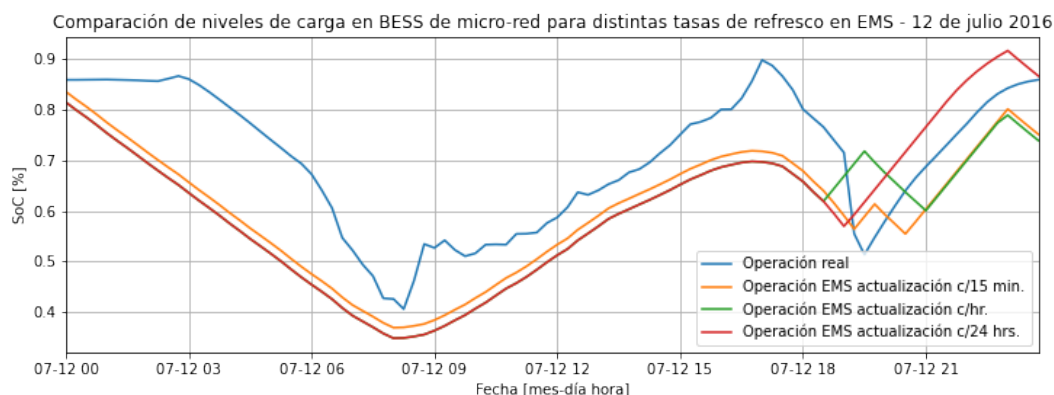


Figura C.1: Comparación de tasas de refresco para operación de BESS para ventana temporal del 12 de julio 2016.

La Figura C.1 muestra que las diferencias ocasionadas por las distintas tasas de refresco son leves, por lo que para el corto plazo se utiliza una tasa de refresco de 1 [hr] y para la simulación de largo plazo una de 24 [hr]. Esta decisión se toma en base a la disminución en

uso de recursos computacionales que significa usar una tasa de refresco más extensa, además de no significar importantes diferencias en los resultados de simulación.

## C.2. Fechas validadas donde opera el EMS en la micro-red ESUSCON

Para la realización de las simulaciones a corto y largo, se consideran las fechas donde se verifica la operación bajo EMS en la operación real. La Figura C.2 presenta las fechas donde se verifica la operación del EMS.

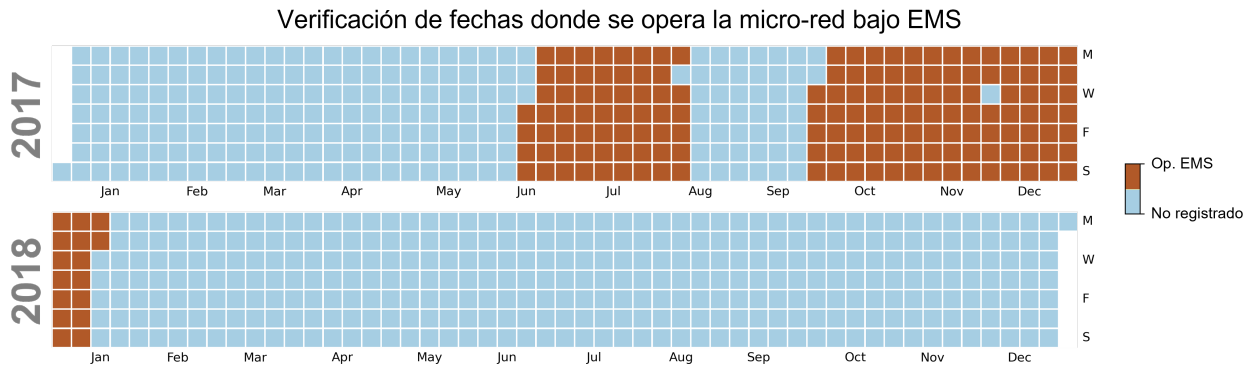


Figura C.2: Fechas verificadas en las que la micro-red ESUSCON opera bajo EMS.

Se puede apreciar en la Figura C.2 la existencia de múltiples ventanas temporales donde no existe una verificación de operación bajo EMS, se muestra que la ventana temporal de verificación, únicamente contempla a los años 2017 y 2018, razón por la que la operación de largo plazo contempla un semestre del año 2017. La operación a corto plazo cuenta con variadas ventanas temporales donde se verifica la operación del EMS en la micro-red, por lo que se escogen datos de julio 2017.

Los datos que permiten la verificación de operación bajo EMS son obtenidos a partir del registro del EMS operado en Huatacondo, donde se encuentran archivos con consignas de 192 iteraciones que entrega el EMS para la operación de los 2 días subsiguientes para cada fecha donde el sistema opera bajo EMS, se encuentran los archivos con una frecuencia de 15 minutos de actualización, por lo que para cada día existen 96 archivos.