



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

DISEÑO DE MICRO-REDES PARA ENCLAVES ESTRATÉGICOS EN IBEROAMÉRICA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO

ANDRÉS ANTONIO MONTOYA SOTO

PROFESOR GUÍA:
PATRICIO MENDOZA ARAYA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
PABLO GONZÁLEZ INOSTROZA
GUILLERMO JIMÉNEZ ESTÉVEZ

SANTIAGO DE CHILE
2022

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO
POR: ANDRÉS ANTONIO MONTOYA SOTO
FECHA: 2022
PROF. GUÍA: PATRICIO MENDOZA ARAYA**

DISEÑO DE MICRO-REDES PARA ENCLAVES ESTRATÉGICOS EN IBEROAMÉRICA

El aumento en la penetración de recursos distribuidos, de energías renovables, el concepto de la energía eléctrica como un bien de primera necesidad, entre muchas otras razones, han provocado un constante aumento en el interés y en la implementación de micro-redes a lo largo del mundo, ya que este tipo de redes eléctricas son consideradas como una de las mejores soluciones para los problemas antes planteados. Sin embargo, el diseño y posterior implementación de estas redes es especialmente complejo en algunas localidades aisladas de Iberoamérica (denominadas acá como enclaves estratégicos), siendo la principal causa la falta de una metodología específica que permita guiar el diseño de micro-redes en estas zonas que comparten una serie de particularidades, como lo son el difícil acceso, la lejanía a la red eléctrica principal, entre otras.

Así, una metodología de diseño básico de micro-redes para enclaves estratégicos es propuesta en el siguiente trabajo, donde se estudian además las principales metodologías existentes en la actualidad, a modo de confeccionar una metodología completa que recoja los puntos fuertes de las metodologías actuales en cuanto al diseño básico, descartando aquellas etapas o metodologías que incluyan activamente a la comunidad en el proceso de diseño, al ser considerado esto un paso posterior al diseño básico. Con esto, se logra obtener una metodología de fácil y rápido uso, que permita estimar el dimensionamiento y la arquitectura óptima de una micro-red desde el punto de vista de la sostenibilidad, permitiendo obtener un primer análisis veloz, sin la necesidad de la interacción con la comunidad.

Posteriormente, en el trabajo se explican una por una las 13 etapas de la metodología de diseño propuesta, indicando los procesos a realizar y los resultados esperados en cada una de ellas. Estas etapas se pueden resumir en 3 grandes etapas: Levantamiento de antecedentes, elección del caso óptimo y dimensionamiento, y evaluación general.

Finalmente, se evalúa la metodología en dos casos de estudio en distintas zonas de Iberoamérica, en particular, se realiza un caso de estudio en Chile (Pachica) y uno en Argentina (Santa Victoria), los cuales, mediante el análisis de los resultados obtenidos en las distintas simulaciones y levantamientos de antecedentes, permiten exponer en práctica, validar y generalizar el uso de esta metodología para toda Iberoamérica.

*A todos los que han estado en las
buenas, las malas y las muy malas.*

Un millón de gracias

Agradecimientos

No es fácil para mí expresar en unas simples palabras el agradecimiento que he ido acumulando a través de años y años de experiencias, de cariño y de consejos, de hecho, lo más probable es que cualquier palabra quede corta para todo el aprecio que tengo por mis cercanos, pero he aquí el intento de agradecer a todos aquellos que me han permitido estar aquí, ad portas de un gran logro.

Primero que todo, a mis padres, Luis e Inés, quienes desde el inicio han llenado mi ser de amor, conocimiento, responsabilidad, perseverancia, entre otros cientos de valores que podría mencionar, los cuales han formado la persona que soy hoy en día. Ustedes son mis principales pilares desde el día uno, y sé que lo serán hasta el último. Sin embargo, dos pilares principales no son suficientes para sostener una vida, así que no puedo dejar de agradecer a mis hermanos, Fabián y Esteban, tan importantes como mis padres. Esteban como un modelo a seguir y el hermano mayor, y Fabián como mi hermano menor y probablemente uno de mis mayores apoyos en la vida, no solo un hermano, si no también el mejor amigo que una persona puede pedir. A todos ustedes les agradeceré con el alma toda la vida.

A mis amigos, que han estado en las malas y peores, a Joshef, a Diego, a Mayte y a tantos otros que han servido de soporte en momentos duros, no me queda más que agradecerles de corazón, ya que sin ustedes sé que no hubiera llegado así de lejos, son realmente personas espectaculares.

Aunque suene simple, aunque suene incluso ridículo para algunas personas, no puedo dejar de agradecer al club de mi vida Colo-Colo, causante de grandes penas y alegrías, un club que representa lo que quiero ser: valiente, fuerte y grande. De la misma manera, me es imposible no agradecer a Pablo Solari, quien volvió a darme esperanza cuando ya la había perdido, y a Gabriel Suazo, quien me demostró que por más difícil que se vea la situación, el esfuerzo y la perseverancia tienen sus frutos. Eternamente agradecidos con ustedes.

Por último, pero no menos importante, agradezco enormemente a todos los profesores que he tenido durante mi etapa escolar y universitaria, ya que han sido ellos quienes me han educado y motivado para llegar a este punto y quienes me han ayudado a trazar este camino. En específico, agradezco tanto a mi profesor guía Patricio Mendoza como a mi profesor co-guía Pablo González, quienes han pavimentado junto a mí este último e importantísimo pedazo del camino.

A todos ustedes, **Un millón de gracias.**

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivo general	1
1.3. Objetivos específicos	2
1.4. Alcances	2
1.5. Estructura del documento	2
2. Marco teórico	3
2.1. Micro-red (MG)	3
2.2. Enclaves estratégicos	4
2.3. Diseño de una MG	4
2.4. Confiabilidad de la red	4
2.5. Seguridad de la red	4
2.6. Suficiencia de la red	4
2.7. Evaluación económica de un proyecto	5
2.7.0.1. Valor Actual Neto (VAN)	5
2.7.0.2. Tasa Interna de Retorno (TIR)	5
2.8. Estudio de impacto ambiental	6
3. Revisión bibliográfica y estado del arte	7
3.1. Diseño de MG rurales a través de la elaboración de catastros	7
3.1.1. Metodología general	7
3.1.2. Plan de electrificación	8
3.2. Planeación y diseño de MG rurales	10
3.2.1. Metodología	10
3.2.2. Etapa de planeación	11
3.2.3. Etapa de diseño	11
3.3. Metodología de co-construcción	13
3.4. Estimación de demanda para el diseño de MG	14
3.5. Optimización de MG mediante el uso de MG locales o regionales	16
3.6. Evaluación de un proyecto de generación distribuida con enfoque de sostenibilidad multidimensional	17
3.7. Necesidad de una nueva metodología de diseño para enclaves estratégicos	21
4. Metodología de diseño de MG	22
4.1. Identificación de necesidades energéticas	23
4.2. Estimación de recursos renovables	23
4.3. Estimación de costos de tecnologías	23

4.4.	Evaluación del estado inicial de la red:	24
4.5.	Estimación y proyección de la demanda	24
4.6.	Estudio de configuración óptima	24
4.6.1.	Caso MG locales	25
4.6.2.	Caso MG regionales	25
4.7.	Dimensionamiento de la MG	25
4.8.	Evaluación de impacto social	26
4.9.	Evaluación de impacto ambiental	27
4.10.	Evaluación y elección de caso óptimo	28
4.11.	Evaluación general	30
5.	Metodología utilizada para la validación mediante casos de estudio	31
5.1.	Elección casos de estudio	31
5.2.	Aplicación de la metodología en al caso chileno	31
5.2.1.	Identificación de necesidades energéticas - Estimación y proyección de la demanda	32
5.2.2.	Estimación de recursos renovables	32
5.2.3.	Estimación de costos de tecnologías	32
5.2.4.	Evaluación estado inicial de la red	33
5.2.5.	Estudio de configuración óptima	33
5.2.6.	Dimensionamiento de la MG	33
5.2.7.	Evaluación de impacto social	33
5.2.8.	Evaluación de impacto ambiental	33
5.2.9.	Evaluación general	34
5.3.	Aplicación de la metodología al caso argentino	34
5.3.1.	Identificación de necesidades energéticas - Estimación y proyección de la demanda	34
5.3.2.	Estimación de recursos renovables	34
5.3.3.	Estimación de costos de tecnologías	35
5.3.4.	Evaluación estado inicial de la red	35
5.3.5.	Estudio de configuración óptima	35
5.3.6.	Caso MG locales	35
5.3.6.1.	Dimensionamiento de la MG	35
5.3.6.2.	Evaluación de impacto social	36
5.3.6.3.	Evaluación de impacto ambiental	36
5.3.7.	Caso MG regional	36
5.3.7.1.	Dimensionamiento de la MG	36
5.3.7.2.	Evaluación de impacto social	37
5.3.7.3.	Evaluación de impacto ambiental	37
5.3.8.	Evaluación y elección del caso óptimo	37
5.3.9.	Evaluación general	37
6.	Resultados	38
6.1.	Elección casos de estudio	38
6.2.	Caso chileno	40
6.2.1.	Identificación de necesidades energéticas y estimación y proyección de la demanda	40

6.2.2.	Estimación de recursos renovables	41
6.2.3.	Estimación de costos de tecnologías	42
6.2.4.	Evaluación estado inicial de la red	43
6.2.5.	Estudio de configuración óptima	43
6.2.6.	Dimensionamiento de la MG	43
6.2.7.	Evaluación de impacto social	44
6.2.8.	Evaluación de impacto ambiental	45
6.2.9.	Evaluación general	45
6.3.	Caso argentino	46
6.3.1.	Identificación de necesidades energéticas y estimación y proyección de la demanda	46
6.3.2.	Estimación de recursos renovables	48
6.3.3.	Estimación de costos de tecnologías	51
6.3.4.	Evaluación del estado inicial de la red	51
6.3.5.	Estudio de configuración óptima	52
6.3.6.	Caso MG locales	52
6.3.6.1.	Dimensionamiento de la MG	52
6.3.6.2.	Evaluación de impacto social	54
6.3.6.3.	Evaluación de impacto ambiental	55
6.3.7.	Caso MG regional	55
6.3.7.1.	Dimensionamiento de la MG	55
6.3.7.2.	Evaluación de impacto social	57
6.3.7.3.	Evaluación de impacto ambiental	57
6.3.8.	Evaluación y elección del caso óptimo	57
6.3.9.	Evaluación general	58
6.4.	Análisis y discusión	60
7.	Conclusiones	63
	Bibliografía	64

Índice de Tablas

4.1.	Cantidad de empleos generados por cada tecnología de generación.	27
4.2.	Superficie utilizada por cada tecnología de generación.	28
5.1.	Consumos promedio en Argentina.	34
6.1.	Resultados CENSO 2017 para Huatacondo y Pachica.	40
6.2.	Empleabilidad, superficie y costo de la energía en la zona.	41
6.3.	Costos de tecnologías de generación en Chile.	42
6.4.	Costos máximos de tecnologías de generación en Chile.	43
6.5.	Resultados económicos de la MG diseñada en Pachica, Chile.	43
6.6.	Dimensionamiento de MG para la localidad de Pachica.	44
6.7.	Viviendas y habitantes en las localidades de estudio de Argentina.	46
6.8.	Empleabilidad, superficie y precio de la energía en casos de estudio de Argentina.	48
6.9.	Costos de tecnologías de generación en Argentina.	51
6.10.	Costos máximos de tecnologías de generación en Argentina.	51
6.11.	Resultados económicos de la MG local en San Felipe.	52
6.12.	Dimensionamiento de la MG local en San Felipe.	52
6.13.	Resultados económicos de la MG local en Acoyte.	53
6.14.	Dimensionamiento de la MG local en Acoyte.	53
6.15.	Resultados económicos de la MG local en Chorro.	53
6.16.	Dimensionamiento de la MG local en Chorro.	53
6.17.	Resultados económicos de las MG locales en conjunto.	54
6.18.	Dimensionamiento de las MG locales en conjunto.	54
6.19.	Costos de transformadores y líneas a considerar.	56
6.20.	Resultados económicos de la MG regional en Argentina.	56
6.21.	Dimensionamiento de la MG regional en Argentina.	56

Índice de Ilustraciones

2.1.	Esquema general de una MG aislada.	3
2.2.	Modelo general de un estudio de impacto ambiental [3].	6
3.1.	Etapas para el desarrollo de una MG [4].	7
3.2.	Plan para electrificar zona rural mediante MG [5].	8
3.3.	Metodología de diseño conceptual de una MG [4].	9
3.4.	Etapas para el desarrollo de una MG aislada [6].	10
3.5.	Etapas para la planeación de una MG aislada [6].	11
3.6.	Etapas para el diseño de una MG aislada [6].	12
3.7.	Metodología de co-construcción [7].	13
3.8.	Método de estimación de demanda basado en SOM [10].	15
3.9.	Arquitectura de matriz jerárquica utilizada para la evaluación de sostenibilidad [12].	17
3.10.	Matriz de indicadores de sostenibilidad para la dimensión económica [12].	18
3.11.	Matriz de indicadores de sostenibilidad para la dimensión ambiental [12].	18
3.12.	Matriz de indicadores de sostenibilidad para la dimensión social [12].	19
3.13.	Matriz de indicadores de sostenibilidad para la dimensión técnica [12].	19
3.14.	Resultados obtenidos de la evaluación de Ciudad Verde [12].	20
4.1.	Metodología propuesta para el diseño de MG.	22
4.2.	Rangos para la evaluación de índices obtenidos.	29
5.1.	Demanda eléctrica en Huatacondo.	32
6.1.	Comuna de Huara, Chile.	38
6.2.	Provincia de Salta, Argentina.	39
6.3.	Localidades escogidas para el caso Argentino.	40
6.4.	Demanda estimada para Pachica.	41
6.5.	Perfiles de radiación para Pachica.	41
6.6.	Perfiles de viento para Pachica.	42
6.7.	Flujo de caja para proyecto de MG en Pachica.	46
6.8.	Demanda estimada para San Felipe	47
6.9.	Demanda estimada para Acoyte.	47
6.10.	Demanda estimada para Chorro.	47
6.11.	Demanda estimada para toda la región en estudio.	48
6.12.	Perfiles de radiación para San Felipe.	49
6.13.	Perfiles de viento para San Felipe.	49
6.14.	Perfiles de radiación para Acoyte.	49
6.15.	Perfiles de viento para Acoyte.	50
6.16.	Perfiles de radiación para Chorro.	50
6.17.	Perfiles de viento para Chorro.	50
6.18.	Flujo de caja para proyecto de MG en San Felipe.	58

6.19.	Flujo de caja para proyecto de MG en Acoyte.	59
6.20.	Flujo de caja para proyecto de MG en Chorro.	59

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

A lo largo de la historia, los sistemas eléctricos de potencia han estado en constante cambio y crecimiento, evolucionando siempre hacia una operación más económica, segura, confiable y más limpia. Ha sido tanto el crecimiento de estos sistemas y del sector eléctrico que, a día de hoy, la energía eléctrica es considerada casi un bien de primera necesidad, manifestándose esto en el enorme porcentaje de electrificación existente en Chile y en países más desarrollados.

Las micro-redes (MG) corresponden a redes eléctricas con cargas y recursos distribuidos actuando de forma conjunta, y nacen justamente como solución a los problemas antes mencionados, permitiendo una mejor adopción de energías renovables y posibilitando, en muchos casos, la electrificación en zonas rurales de difícil acceso o zonas en donde el alto costo de la construcción de líneas de transmisión imposibilita el acceso a energía eléctrica total. Actualmente, de acuerdo al Mapa de Vulnerabilidad Energética del Ministerio de Energía [1], cerca del 0.4% de la población chilena no tiene acceso a energía eléctrica y, aproximadamente, otro 0.5% tiene suministro parcial. Adicionalmente, existen zonas del país con problemas en la calidad de suministro, donde la instalación de una micro-red posibilitaría una mejora en la energía entregada, lo cual exhibe la necesidad de estudiar el desarrollo de este tipo de redes en estas localidades como posible solución.

Así, este trabajo se enfoca en el diseño de micro-redes en localidades aisladas eléctricamente con características específicas, denominados enclaves estratégicos, esto es, determinar la ingeniería básica necesaria para implementar una de estas redes en las mencionadas ubicaciones, determinando así: tipos de tecnología a utilizar; capacidades; arquitecturas, entre otros puntos, con la idea de generar una guía de diseño básico y rápido de micro-redes en Iberoamérica, la cual finalmente impulse el desarrollo de las mismas en esta región del mundo.

1.2. Objetivo general

En el presente trabajo de título se propone una metodología de diseño de micro-redes para enclaves estratégicos en Iberoamérica, con el principal objetivo de impulsar el desarrollo de este tipo de redes como solución energética base para localidades de similares características en los distintos países de Iberoamérica.

1.3. Objetivos específicos

Junto con lo anterior, se distinguen también tres objetivos específicos para el desarrollo del trabajo:

- Estudiar las principales metodologías de diseño y de estimación de demanda y de recursos existentes actualmente, y analizar el por qué éstos no cumplen con los objetivos de este trabajo.
- Establecer una metodología paso a paso que permita realizar rápidamente un diseño básico de una micro-red en enclaves estratégicos, obteniendo para cada caso la solución óptima desde el punto de vista de la sostenibilidad.
- Simular dos micro-redes de carácter piloto en Chile y Argentina que permitan evaluar la metodología propuesta, permitiendo la generalización y validación de la metodología para Iberoamérica.

1.4. Alcances

Este trabajo tiene como finalidad principal servir como guía para el diseño de micro-redes en enclaves estratégicos, definidos como localidad con características específicas, en Iberoamérica, tomando como base la experiencia internacional y las metodologías existentes al momento. Dicho esto, no se espera que la metodología aquí presentada sea válida para localidades ajenas a las definidas como enclaves estratégicos, ni para localidades que no pertenezcan a Iberoamérica.

1.5. Estructura del documento

El presente trabajo de título se compone de 7 capítulos, incluido el presente capítulo, más bibliografía, los cuales se explican a continuación.

El Capítulo 1 corresponde a la introducción del trabajo, donde se expuso la motivación del mismo, además de los objetivos y alcances esperados. En cuanto al Capítulo 2, este presenta el marco teórico necesario para la realización y el entendimiento básico del trabajo de título. Por su parte, el Capítulo 3 presenta la revisión bibliográfica y el estado del arte de la memoria, en donde se estudia el estado actual del diseño de micro-redes y los principales trabajos en los que se basa la metodología propuesta. El Capítulo 4 establece la metodología de diseño de micro-redes propuesta de esta memoria. Luego, el Capítulo 5 explica la metodología que se utiliza en este trabajo para realizar los casos de estudio. Por otro lado, el Capítulo 6 presenta los resultados obtenidos al aplicar la metodología propuesta en los dos casos de estudio, con su correspondiente análisis. Finalmente, el Capítulo 7 presenta las principales conclusiones del trabajo realizado.

Adicionalmente, se expone finalmente la bibliografía revisada para el desarrollo y justificación de este trabajo de título.

Capítulo 2

Marco teórico

La presente sección exhibe los principales fundamentos teóricos necesarios para la comprensión y para el desarrollo del trabajo de título.

2.1. Micro-red (MG)

Una micro-red (o MG de *micro-grid*) corresponde a una red eléctrica de distribución que contiene cargas y recursos distribuidos actuando de forma conjunta, sin embargo, se debe mencionar que no existe al día de hoy una definición transversalmente aceptada. La Figura 1 corresponde a un esquema general de una MG.

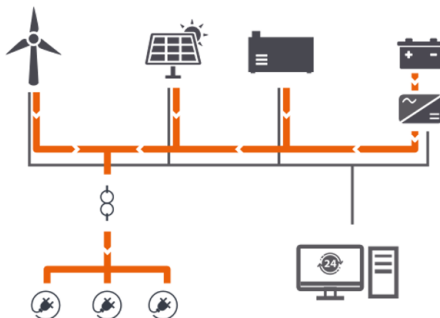


Figura 2.1: Esquema general de una MG aislada.

Estas redes se caracterizan por ser redes inteligentes, con gran cantidad de recursos renovables y almacenamiento, en donde tanto los recursos de generación como las cargas son controlables. Una MG tiene dos modos principales de operación: conectado a la red (*on-grid*), o desconectado de la misma (*off-grid* u operación en isla), en donde ciertas MG tienen la características de pasar del modo *on-grid* al modo *off-grid* y viceversa.

A pesar de que la operación de una MG tiene un mayor nivel de complejidad que las redes convencionales, estas pueden aportar un importante número de beneficios a los usuarios y al sistema, como lo pueden ser, por ejemplo, la posibilidad de adoptar energías renovables (principalmente solar y eólica), el apoyo a grandes redes, la reducción en pérdidas de transmisión, mejora en la confiabilidad del sistema, entre muchas otras, que traen tanto beneficios económicos como beneficios sociales a los involucrados con la MG [2].

2.2. Enclaves estratégicos

A pesar de no tener una definición totalmente aceptada, para motivos de este trabajo se definen los enclaves estratégicos como emplazamientos geográficos con pobreza energética y con potencial productivo y energético, en donde estos dos últimos términos hacen referencia a la capacidad potencial que tiene el emplazamiento para realizar labores productivas y de producir energía (radiación incidente, velocidad de los vientos, etc).

Como se dijo anteriormente, no existe aún un criterio que considere índices sociales, productivos y económicos en Iberoamérica que permitan establecer con claridad los emplazamientos más adecuados, con lo cual otras definiciones de enclaves estratégicos pueden también ser consideradas válidas a futuro, y se espera que el presente trabajo concuerde de igual manera con estas nuevas definiciones.

2.3. Diseño de una MG

Corresponde a la realización de un plan detallado para la MG, el cual incluye todos los aspectos importantes para que esta tenga una operación segura y confiable. Dentro de esto se incluye desde la arquitectura de la red, la cantidad y tipo de generadores, de almacenamiento, el sistema de monitoreo, hasta detalles como lo pueden ser el tipo de cables a utilizar, mantenimiento, etc.

2.4. Confiabilidad de la red

Se puede definir como la cantidad de horas en la que un sistema eléctrico se encuentra operativo a lo largo del año, o bien la cantidad de horas que el mismo sistema se encuentra inoperativo (con fallas), esto dependiendo del índice de confiabilidad considerado. Se puede subdividir en seguridad y suficiencia de la red.

2.5. Seguridad de la red

Capacidad del sistema para responder a perturbaciones dinámicas, es decir, de mantenerse estable ante cierto rango de perturbaciones rápidas, o bien, de operar los dispositivos de seguridad para grandes perturbaciones, que protejan a la totalidad del sistema eléctrico.

2.6. Suficiencia de la red

Capacidad del sistema de satisfacer la demanda en estado estacionario, considerando las restricciones operacionales del sistema.

2.7. Evaluación económica de un proyecto

La evaluación de proyectos corresponde a una serie de técnicas que permiten la toma de decisiones en torno a uno o más posibles proyectos. En este caso, para evaluar los proyectos y casos, se realizará tanto una evaluación económica como una técnica.

En lo que refiere a la evaluación económica, en esta se identifica, mide y valoriza beneficios y costos para las personas relevantes, logrando obtener una conveniencia relativa entre varias alternativas. A continuación se presentan los indicadores económicos más utilizados.

2.7.0.1. Valor Actual Neto (VAN)

Este indicador es el más utilizado para evaluar económicamente un proyecto, dado que permite evaluar la conveniencia o no del mismo, además de posibilitar la comparación entre diferentes proyectos.

El VAN mide el aporte económico de un proyecto a sus inversionistas, reflejando el aumento o disminución de la riqueza de éstos, en otras palabras, es el excedente que queda para el (los) inversionistas, después de haber recuperado la inversión y el costo de oportunidad de los recursos utilizados. El VAN se define de acuerdo a la siguiente expresión:

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{\prod_{i=1}^t (1 + r_{i-1,i})} \quad (2.1)$$

Donde F_t son los flujos de caja, y r es la tasa de descuento para cada periodo. Con esto, se define que un proyecto es conveniente de realizar si $VAN > 0$. Por otro lado, se pueden comparar proyectos, en donde el proyecto con el VAN mayor es el más conveniente.

2.7.0.2. Tasa Interna de Retorno (TIR)

Por otro lado, la TIR trata de medir la rentabilidad del proyecto, representando una medida de la rentabilidad media intrínseca, y se define como la la tasa de descuento tal que $VAN=0$.

$$VAN = -I + \sum_{i=1}^n \frac{F_t}{(1 + TIR)^t} = 0 \quad (2.2)$$

En este caso, se considera que un proyecto es conveniente si es que la TIR es mayor que la tasa de descuento (costo de oportunidad del capital).

Generalmente, se suelen utilizar estos dos indicadores en conjuntos para la evaluación económica de un proyecto, sin embargo, existen otros indicadores a utilizar, como lo son el periodo de recuperación de capital (PRC), el índice de rentabilidad (IR), entre otros.

2.8. Estudio de impacto ambiental

Un estudio de impacto ambiental (EIA) corresponde a un instrumento de gestión ambiental destinado a la evaluación y predicción de los impactos ambientales que pueda generar un proyecto, es decir, corresponde a un estudio que determina los perjuicios que un proyecto específico tendrá sobre el medio ambiente y, en Chile, es obligación realizar este tipo de estudios en proyectos energéticos que generen al menos uno de los siguientes efectos en el medio ambiente:

- Riesgo para la salud de la población, debido a la cantidad y calidad de efluentes, emisiones o residuos.
- Efectos adversos significativos sobre la cantidad y calidad de los recursos naturales renovables, incluidos el suelo, agua y aire.
- Reasentamiento de comunidades humanas, o alteración significativa de los sistemas de vida y costumbres de grupos humanos.
- Alteración significativa, en términos de magnitud o duración, del valor paisajístico o turístico de una zona.

Entre otros efectos a considerar. La Figura 3.11 presenta un modelo general para el desarrollo de un estudio de impacto ambiental

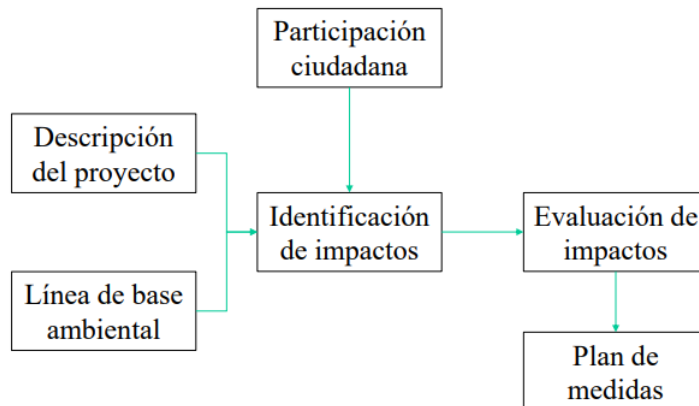


Figura 2.2: Modelo general de un estudio de impacto ambiental [3].

Por último, es importante considerar que, en caso de que el proyecto no produzca ninguno de los efectos antes mencionados, de todas maneras se realiza un estudio, de menor extensión, llamado Declaración de Impacto Ambiental.

Capítulo 3

Revisión bibliográfica y estado del arte

La presente sección expone los principales conceptos y metodologías estudiadas a través de la revisión bibliográfica, así como también se presenta el estado del arte del proyecto, identificando sus virtudes, pero destacando también las razones por las cuales las metodologías estudiadas no resuelven el problema propuesto.

3.1. Diseño de MG rurales a través de la elaboración de catastros

Los trabajos presentados en [4] y [5] proponen una primera metodología para el diseño de MG rurales como solución a los problemas de electrificación en zonas donde los costos de interconexión con el SEN son mayores que los costos de construcción de una MG. Se presentan a continuación los resultados más relevantes de estos dos trabajos.

3.1.1. Metodología general

El trabajo propone en primer lugar una metodología general de cinco pasos para el correcto desarrollo de una MG, apuntando al desarrollo sostenible de la misma mediante la inclusión de la comunidad en cada paso. Estas etapas se presentan en la Figura 3.1.



Figura 3.1: Etapas para el desarrollo de una MG [4].

1. **Prefactibilidad:** Cuantifica la factibilidad técnica, económica y social del proyecto, integrando a los habitantes al proyecto, caracterizándolos de la forma más completa posible. Luego se diseñan posibles MG para distintos escenarios, considerando LMS, para, finalmente, encontrar la mejor solución en cada caso.
2. **Diseño:** Dimensiona las tecnologías a utilizar y el nivel de involucramiento de la población, definiendo como y quienes operarán la MG.
3. **Ingeniería de detalles:** Se especifican detalles de las tecnologías, cables, almacenamiento, sistemas de control, monitoreo y comunicaciones en general y otros detalles.
4. **Implementación:** Se construyen las obras necesarias, se implementan y entrenan los controles y software a utilizar y se capacita a las personas encargadas de la operación.
5. **Operación y Mantenimiento (O&M):** Es la etapa en que se opera la MG y no tiene fecha de fin establecida. Algunas de las características de la comunidad que se proponen para una correcta operación son: Suficientes recursos como para cubrir la demanda, unión de la comunidad, baja dispersión de casas, impactos ambientales bajos y considerar la electricidad como un bien para la comunidad.

3.1.2. Plan de electrificación

Posteriormente se propone un plan de electrificación específico mediante MG para zonas rurales, junto con una metodología para una de estas etapas en específico: La etapa de elaboración de catastros. Los diagramas generales de ambos planes se presentan en la Figura 3.2.

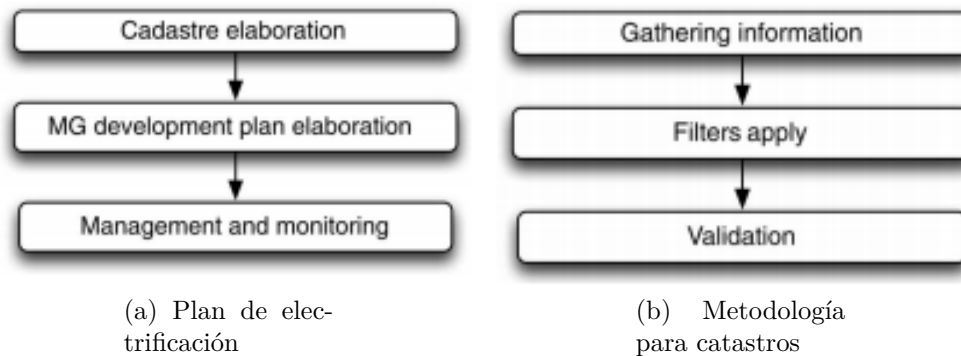


Figura 3.2: Plan para electrificar zona rural mediante MG [5].

Así, a partir de la Figura 3.2, se identifica que el proceso de diseño de MG relevante para el desarrollo del presente trabajo es la etapa "MG development plan elaboration" del plan de electrificación. Con esto, se detallan a continuación los pasos del plan de electrificación visto en la Figura 3.2.a.

1. **Catastro:** Se identifican locaciones con potencial para instalar MG como solución energética, consiguiendo, en primer lugar, información de estos lugares. Luego se aplican filtros, como lo son el potencial renovable, la factibilidad geográfica de instalar una MG, entre otros, y, finalmente se valida esta información en terreno.

2. **Plan de desarrollo de la MG:** Se realiza en primer lugar una priorización de los proyectos y comunidades detectados en el catastro, utilizando la técnica del Frente de Pareto, considerando los siguientes factores:

- Social: Se identifican las comunidades con mayores necesidades según el IDH (Índice de Desarrollo Humano).
- Productivo: Se consideran las comunidades con mayor potencial productivo.
- Económico: Según el costo del proyecto, de acuerdo al Valor Actual de los Costos (VAC).

Para el VAC, se modela la MG con 4 fuentes de energía: Solar, eólico, diésel y almacenamiento, en donde se realiza un problema de optimización para minimizar la suma del VAC individual de cada tecnología, sujeto a las siguientes restricciones:

- Límites técnicos de las máquinas y almacenamiento.
- La carga y descarga del almacenamiento.
- Se debe cumplir la demanda.
- Restricciones de generación de potencia solar y eólica.
- Que la energía de las baterías sea 0 al final e inicio del día.

Junto con esto, se presenta una metodología específica para el diseño de MG, la cual se observa en la Figura 3.3.

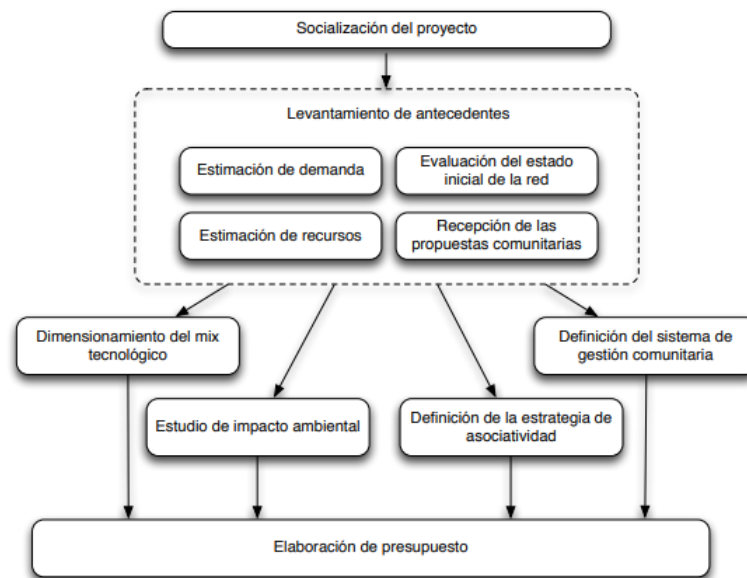


Figura 3.3: Metodología de diseño conceptual de una MG [4].

3. **Manejo y monitoreo de la MG:** Se distinguen 3 puntos importantes: Gestión de fondos, verificación de estados y soporte técnico durante el periodo de operación y mantenimiento. Se establece la importancia de la Unidad de Manejo y Monitoreo de la MG (3MU por las siglas en inglés), el cual es una unidad centralizada o descentralizada que se encarga de varias tareas importantes durante el desarrollo del proyecto, como:

- Crear mecanismos para financiar el proyecto en la etapa inicial, coordinar a los diferentes actores que participen, asignando responsabilidades de forma objetiva.
- Seguimiento del avance y estado de obras civiles y la ingeniería.
- Durante la operación realiza seguimiento y soporte técnico si es necesario, y mantiene coordinación entre los actores en todo momento.

Destaca también la importancia de los modelos de mercado y del LMS (Sistema de Gestión Local, de la sigla en inglés), donde este último coordina a los actores de forma local, mientras que los modelos de mercado permiten tener una MG sostenible en el tiempo en lo que refiere al ámbito económico. Dentro de lo último, se distinguen dos modelos, el de cooperativas y el de un modelo mixto.

Es importante destacar que dentro de los puntos estudiados, la etapa de catastro no tiene especial relevancia dado que el enfoque del presente trabajo es el diseño, considerando la etapa de realización de catastros como una etapa ya realizada.

Esta metodología corresponde a un gran aporte para el desarrollo de este trabajo de título, sin embargo, la etapa de diseño presentada es muy general, y dado que el trabajo en desarrollo apunta específicamente al diseño de MG, esta metodología es insuficiente, aunque se puede utilizar como base para la metodología a proponer, detallando, agregando, y eliminando etapas de la misma, donde se deben eliminar las etapas referentes a la participación de la comunidad, dado que la metodología a realizar tiene por objetivo obtener un primer diseño, para posteriormente ser adaptado por la comunidad en caso de ser necesario.

3.2. Planeación y diseño de MG rurales

En el trabajo realizado en [6], se presenta una segunda metodología para el desarrollo de una MG rurales, priorizando una mejora en la calidad de vida de los habitantes de las comunidades rurales. A continuación se estudian los principales aspectos de esta metodología.

3.2.1. Metodología

La metodología en estudio se compone de cuatro etapas: Planeación, diseño, implementación y la etapa de operación y mantenimiento (O&M). Estas etapas se ven representadas en la Figura 3.4.

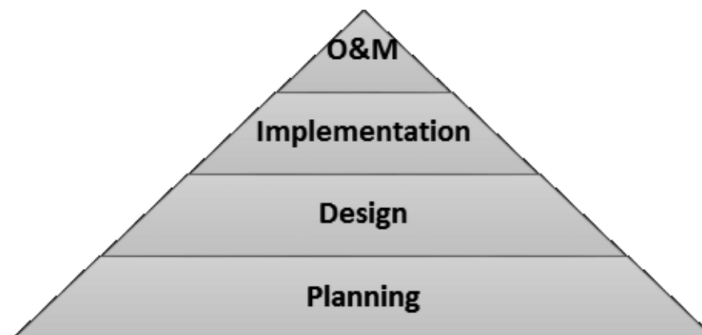


Figura 3.4: Etapas para el desarrollo de una MG aislada [6].

En la figura se aprecia la importancia de cada etapa, donde la etapa de planeación es la base de todo el desarrollo, y la O&M el punto final. A grandes rasgos, la etapa de planeación se encarga de estudiar la factibilidad del proyecto en todo aspecto, la etapa de diseño del dimensionamiento de todo tipo de equipos, la etapa de implementación corresponde a la materialización física de la etapa de diseño, y finalmente la etapa de O&M permite la operación de la MG diseñada.

3.2.2. Etapa de planeación

En lo que refiere a la etapa de planeación, encargada de considerar la factibilidad social, de recursos y económica del proyecto, cuantificando todos estos aspectos, se tienen las etapas presentes en la Figura 3.5.



Figura 3.5: Etapas para la planeación de una MG aislada [6].

1. **Definir universo:** Se definen localidades con más necesidades en donde no existan proyectos de electrificación.
2. **Recolectar información:** Se recolecta la información necesaria: Densidad de población, crecimiento, actividades productivas, consumo, etc.
3. **Análisis:** Se analiza el comportamiento principalmente de la demanda y los posibles cambios que esta pueda tener.
4. **Priorización de comunidades:** Se escoge un orden para las comunidades, de acuerdo a criterios económicos y sociales.

3.2.3. Etapa de diseño

Luego, en lo que respecta a la etapa de diseño, que se encarga de dimensionar el equipamiento necesario, el nivel de participación de la comunidad, la forma de gestión de energía, entre otros, se distinguen 8 etapas, las cuales se observan en la Figura 3.6.

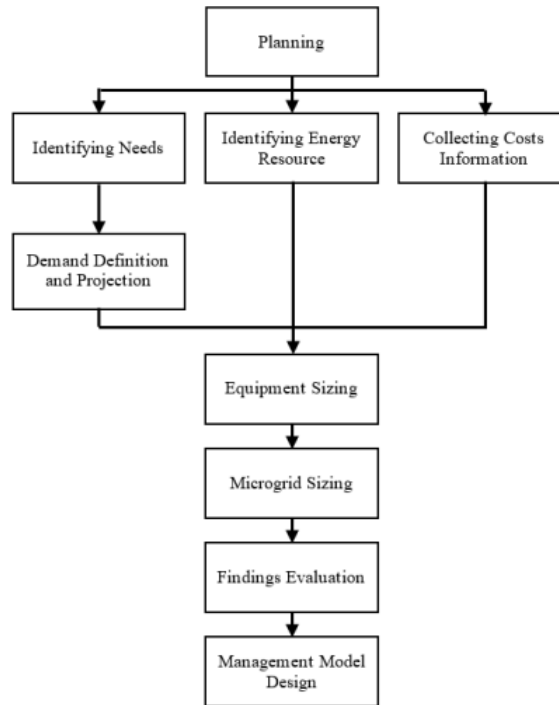


Figura 3.6: Etapas para el diseño de una MG aislada [6].

1. **Identificación de necesidades:** Se identifican las principales variables para solucionar el problema, con base de datos y entrevistas. Busca definir puntos clave como el financiamiento, necesidades energéticas, disposición a pagar, etc.
2. **Definición de la demanda y proyección:** Se define la demanda mediante una estimación hecha a base del comportamiento actual y el esperado en el futuro por la demanda.
3. **Identificación de recursos renovables:** Se utilizan base de datos para ver la magnitud de recursos renovables, principalmente, radiación solar y viento.
4. **Recolección de datos de costos:** Se recolecta información acerca de precios, como lo son el precio del diésel y de las construcciones.
5. **Dimensionamiento de equipamiento:** Se dimensiona el equipamiento de acuerdo a las necesidades previamente establecidas (paneles, turbinas, almacenamiento, etc).
6. **Dimensionamiento de MG:** Se diseña la MG con el software HOMER, determinando la MG óptima para cada caso.
7. **Evaluación del proceso:** Se comunican los avances con los inversores, la comunidad y las autoridades regionales.
8. **Diseño del modelo de gestión:** Se define la forma de manejo y se integra a la comunidad a lo mismo, en ciertos casos combinando el modelo de gestión con las organizaciones (vecinales, por ejemplo), ya existentes. Aquí la gestión se encarga de mantenimiento y de todo tipo de coordinación necesaria entre los participantes, de manera de asegurar una operación continua.

En donde se observa que, al contrario de otras metodologías, en esta metodología existen procesos que se pueden realizar de forma paralela, como lo son la etapa 1, 3 y 4.

Dentro de lo estudiado en esta metodología, lo importante para el desarrollo del trabajo de título es la etapa de diseño presentada, donde se observan etapas distintas a las observadas en la Sección 4.1.2 estudiada anteriormente, donde por ejemplo se presenta una etapa de recolección de datos de costos, de proyección de la demanda, entre otras. Sin embargo, esta metodología sigue siendo muy general y debe ser más detallada y adaptada al caso de Iberoamérica para que sea funcional. A pesar de esto, sigue siendo una metodología que aporta mucho a la metodología a desarrollar.

3.3. Metodología de co-construcción

Los trabajos estudiados en [7], [8] y [9] presentan una tercera metodología para proyectos de electrificación relacionados con MG. En este caso, se utiliza una metodología de co-construcción. Esto se define como el proceso de diseño y construcción que involucra activamente a la comunidad, esto es, que la comunidad tiene tanto peso como la empresa o asociación que hace el proyecto, no consistiendo únicamente en la validación de resultados. Las 4 etapas de esta metodología se observan en la Figura 3.7.

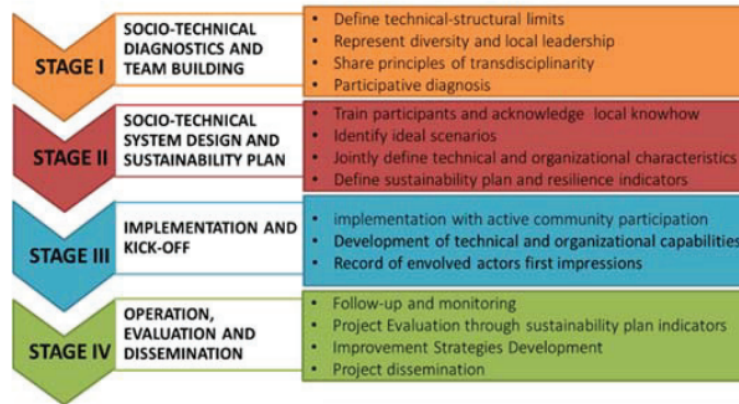


Figura 3.7: Metodología de co-construcción [7].

1. **Diagnóstico socio-técnico y formación de equipos:** En esta etapa se definen los límites técnicos, económicos y sociales del proyecto, se estudia la diversidad y el liderazgo local y se establecen principios entre los expertos y la comunidad.
2. **Diseño socio-técnico del sistema y plan de sostenibilidad:** En esta etapa, en primer lugar, se entrena a la comunidad para poder entablar una buena discusión con respecto al proyecto. Junto con esto se definen escenarios y se definen en conjunto las principales características técnicas y organizacionales del proyecto, se definen también indicadores de sostenibilidad, entre otros.
3. **Implementación y primera impresión:** En esta etapa se implementa lo antes diseñado, siempre con la posibilidad de realizar cambios en el diseño, de acuerdo a lo

que indique la comunidad. Además, se registran las primeras impresiones y los primeros *feedbacks*.

4. **Operación, evaluación y término:** En esta etapa se realiza el seguimiento y monitoreo de la MG, se evalúa el proyecto en general y se identifican posibles mejoras.

Esta metodología se propone principalmente para mejorar la relación entre los proyectos y la comunidad, de manera de desarrollar una pertenencia, lo cual provoque finalmente un mejor uso de la MG, y por lo tanto, una mejor y más larga operación. Esta metodología ha sido aplicada a un considerable número de proyectos en la actualidad, sobretodo en el norte de Chile, donde se ha aplicado por ejemplo para mejorar el procesamiento de alpaca, el procesamiento de productos industriales, el cultivo de camarones, entre otro tipo de actividades propias de las zonas rurales del norte del país.

En lo que refiere al aporte de esta metodología al desarrollo del presente trabajo de título, esta metodología no se puede incorporar de manera directa a la metodología a proponer, esto porque la metodología a proponer tiene por objetivo presentar un primer diseño para las MG, considerado ingeniería básica. Las etapas presentes en la metodología estudiada en [7], [8] y [9] se pueden considerar como una etapa posterior en el desarrollo del proyecto mismo, y no parte del diseño inicial. A pesar de esto, la metodología a desarrollar debe ser lo suficientemente flexible como para que posterior a su ejecución, los resultados se puedan aplicar a la metodología de co-construcción, de manera de tener un proyecto sostenible en el tiempo.

3.4. Estimación de demanda para el diseño de MG

La estimación de la demanda es clave para el diseño de una MG, dado que una correcta estimación permite realizar un dimensionamiento óptimo de todo tipo de equipos. Sin embargo, para localidades rurales es difícil estimar, dado la falta de datos y de caracterización. Dado esto, el trabajo realizado en [10] presenta una metodología para estimar la demanda en zonas rurales.

La metodología en cuestión se basa en *self-organizing map's* (SOM), cuya traducción sería mapas auto organizados. Este modelo permite principalmente estimar la demanda de localidades aisladas sin electrificación o con electrificación parcial, basándose en encuestas y en datos obtenidos de localidades similares, con el fin de utilizar esta predicción en el diseño óptimo de micro-redes, y, en específico, para el dimensionamiento de sus unidades de generación.

Los SOM son algoritmos computacionales que permiten reconocer ciertos patrones y categorizar una serie de datos en *clusters* (agrupamientos), teniendo como entrada los datos a agrupar más una serie de parámetros. Con esto, la Figura 3.8 presenta el método utilizado para estimar la demanda.

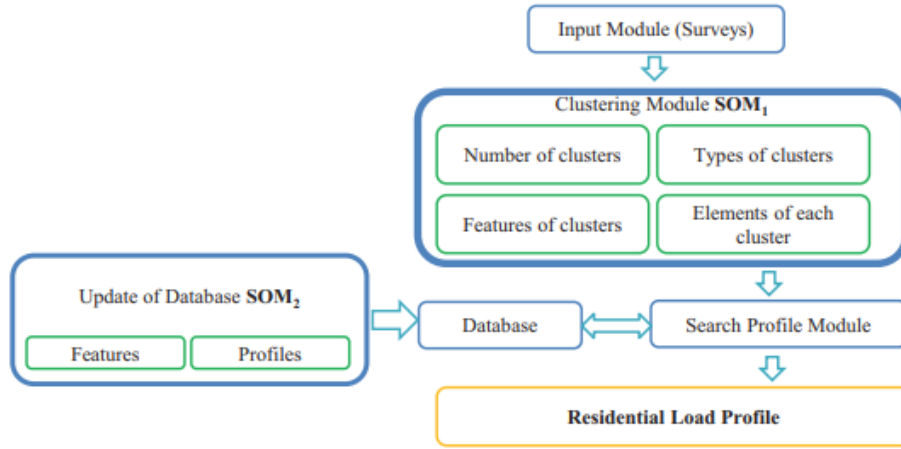


Figura 3.8: Método de estimación de demanda basado en SOM [10].

Donde Data 1 corresponde a información de entrada proveniente de la comunidad en estudio, principalmente de encuestas y mediciones realizadas en el lugar y Data 2 corresponde a información de entrada que proviene de alguna comunidad con características similares, pero que si tenga acceso total a electricidad. Se detallan a continuación las principales etapas del método.

1. **Módulo de agrupamiento (*Clustering Module SOM1*):** El objetivo de este módulo es agrupar a las diferentes viviendas de la comunidad en agrupaciones que compartan ciertas características, teniendo como resultado las diferentes agrupaciones y las familias que componen cada una de estas.
2. **Actualización de base de datos (*Update of the database SOM2*):** Este módulo se encarga de generar perfiles de carga típicos, basada en datos de otra comunidad con acceso total a la electricidad, con lo cual, se generan estos perfiles para las agrupaciones de esta segunda comunidad.
3. **Base de datos (*Database*):** En este módulo se encuentran todos los perfiles que puedan ser necesarios para el paso siguiente, generando en ciertos casos perfiles adicionales y generales con tal de cubrir todas las posibles agrupaciones de la comunidad.
4. **Módulo de búsqueda de perfil (*Search profile module*):** Se realiza un proceso de búsqueda en el cual se asocian las agrupaciones del módulo de agrupamiento y del módulo de actualización de datos, de acuerdo a la similitud de sus características. Una vez se asocian, se asigna el perfil de carga generado mediante el SOM2 a la agrupación correspondiente de la comunidad.
5. **Perfil de carga residencial (*Residential load profile*):** Finalmente, se obtiene el perfil de carga residencial de la comunidad, mediante la suma de los perfiles individuales de cada vivienda. Para obtener el perfil de carga de toda la comunidad, se utiliza:

$$d_c = d_r \cdot inc_f + d_s + d_{cs} \quad (3.1)$$

Donde d_r corresponde al perfil de carga residencial, inc_f es un ponderador que representa el crecimiento de la población en épocas de verano o de festividades, d_s es el perfil de carga de las escuelas, y d_{cs} es el perfil de carga de servicios públicos como los hospitales.

Por último, a pesar de que existen otros algoritmos además del SOM utilizado en esta metodología, el trabajo presentado en [10] indica que este algoritmo es óptimo para comunidades rurales, ya que además, permite obtener resultados analizables de forma visual.

3.5. Optimización de MG mediante el uso de MG locales o regionales

El trabajo realizado en [11] presenta una nueva metodología para el diseño óptimo de una MG, considerando en este caso la posibilidad de una MG regional, esto es, una red que una eléctricamente a varias localidades cercanas en una región determinada.

Así, esta metodología se compone de dos etapas: Una etapa local y una etapa regional, donde ambas se ejecutan por separado mediante la implementación de modelos MILP (*Mixed Integer Linear Programming*), los cuales entreguen como resultado el dimensionamiento de los equipos de generación y almacenamiento, minimizando los costos del proyecto y optimizando la calidad de suministro. A continuación se detallan ambas etapas.

- **Aplicación de modelo de optimización local:** Se aplica en primer lugar el modelo de optimización local, el cual tiene por objetivo diseñar de forma óptima una MG para cada una de las localidades en estudio, dando la posibilidad de tener generación en cada vivienda (distribuida), o una generación centralizada en zonas donde el recurso sea mayor. Para este tipo de MG solo se consideran líneas de transmisión de baja tensión. Para obtener el costo final simplemente se suman los costos de cada MG individual.
- **Aplicación de modelo de optimización regional:** En este caso se aplica el modelo de optimización regional, el cual tiene por objetivo diseñar una única MG óptima para todas las localidades en estudio, considerando generación centralizada en algún punto de la región (notar que en este caso la cantidad de zonas a elegir para la generación es mayor), y considerando también el uso de líneas de media tensión y de transformadores de tensión.

Posteriormente se realiza una comparación directa entre los costos de proyecto en ambos casos, y se analiza además la calidad de suministro para ambas MG diseñadas.

De acuerdo al caso de estudio presentado en [11], existen casos en que efectivamente, tanto el costo del proyecto, como la calidad de suministro, mejoran con la instalación de una MG regional, en donde las principales variables que determinan cual de los casos es más favorable son la distancia y la variación de los recursos renovables, con lo cual, para localidades cercanas (en el caso de estudio se consideran localidades a menos de 5 [km] de distancia) probablemente convenga una MG regional.

En lo que refiere al presente trabajo de título, esta metodología aporta una nueva posibilidad, pero para nada constituye una metodología de diseño de MG en sí, y se podría considerar principalmente como una posible etapa de la metodología a desarrollar.

3.6. Evaluación de un proyecto de generación distribuida con enfoque de sostenibilidad multidimensional

El trabajo realizado en [12] presenta una metodología para la evaluación de proyectos de generación distribuida desde un enfoque de sostenibilidad multidimensional mediante el uso de la evaluación comprensiva difusa ¹, la cual permite obtener un índice de sostenibilidad para estos proyectos en base a indicadores económicos, sociales y medioambientales.

Así, esta metodología utiliza indicadores y subindicadores, los cuales componen una matriz de categorías la cual es utilizada para obtener evaluaciones desagregadas de cada categoría, así como también una evaluación global del proyecto desde el punto de vista de la sostenibilidad, permitiendo dar un peso específico a cada indicador y subindicador de acuerdo a lo que se estime conveniente, introduciendo así una componente cualitativa al problema. La Figura 3.9 presenta la arquitectura utilizada para la construcción de la matriz utilizada para evaluar la sostenibilidad de un proyecto.

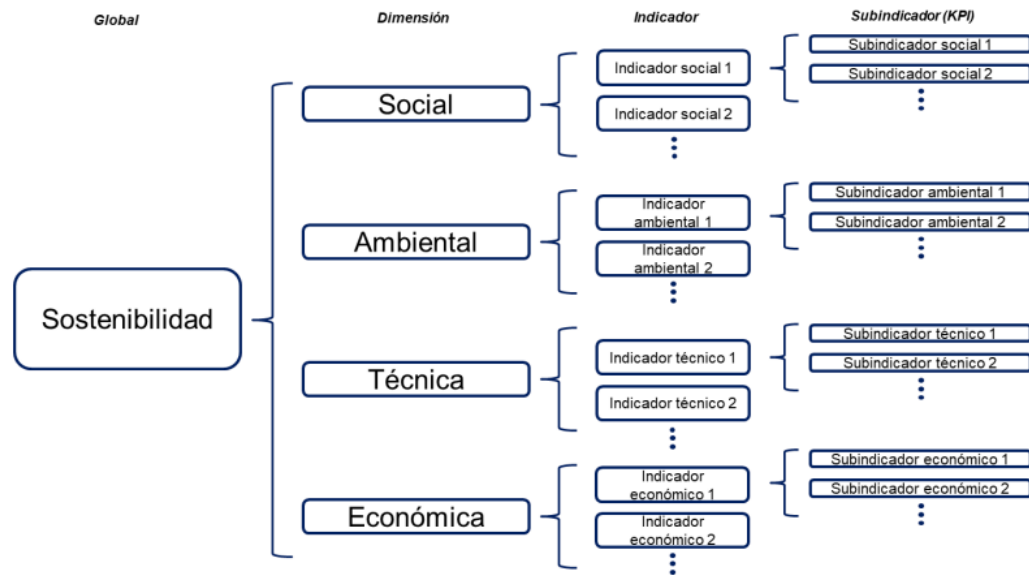


Figura 3.9: Arquitectura de matriz jerárquica utilizada para la evaluación de sostenibilidad [12].

Una vez configurada esta matriz se establecen pesos o grados de participación de los subindicadores con respecto a los indicadores, y de los indicadores con respecto a cada categoría a utilizar, esto se puede realizar mediante métodos subjetivos o cualitativos. Para el caso específico de la evaluación de proyectos de generación distribuida, la metodología propone el uso de 5 etiquetas cualitativas, desde "Muy Malo.^a "Muy Bueno", además de proponer los siguientes indicadores y subindicadores para cada una de las dimensiones consideradas.

¹ Método que permite manipular información cualitativa como cuantitativa, para realizar una evaluación numérica.

Así, las Figuras 3.10, 3.11, 3.12 y 3.13 presentan los indicadores y subindicadores utilizados en este trabajo para las áreas económica, ambiental, social y técnica respectivamente.

DIMENSION ECONOMICA			
Dimensión (D)	Indicador (I)	Subindicador (S)	Unidad de Medida
ECONÓMICA	1. Transformaciones socioeconómicas	1. Variación del salario devengado en los empleos generados por el proyecto	%
		2. Emplendimientos estructurados y viabilizados/Hogares totales	%
	2. Costos en el proyecto	1. Costos de inversión por capacidad instalada	US\$/kW instalado
		2. Costo nivelado de la energía	US\$/MWh
		3. Costo de puesta en servicio por usuario	US\$/usuario
	3. Inversión	1. Participación de los créditos en el financiamiento	%
		2. Periodo de repago	Años
		3. Periodo de apropiación de la infraestructura	Años
		4. Costos fijos de O&M anual US\$/kW	US\$/Kw
	4. Impactos inherentes al servicio	1. Variación de los ingresos recibidos por hogar	%
		2. Tiempo productivo ganado tras la implementación del proyecto	Horas
		3. Hogares en condiciones de pagar el costo de la energía	%
	5. Desempeño financiero	1. Tasa interna de Retorno (TIR)	%
		2. Rendimiento de capital (ROE)	%
3. Proporción del reconocimiento de excedentes frente al precio comercial de la energía del OR		\$	

Figura 3.10: Matriz de indicadores de sostenibilidad para la dimensión económica [12].

DIMENSION AMBIENTAL			
Dimensión (D)	Indicador (I)	Subindicador (S)	Unidad de Medida
AMBIENTAL	1. Impacto ambiental abiótico	1. Participación de emisiones en la generación de energía	Kg CO2 eq./kWh
		2. Emisión GEI per cápita	Tons CO2 eq. Per capita
		3. Grado de degradación del suelo	%
	2. Desempeño ambiental	1. Grado de Cumplimiento de la legislación ambiental y los términos de referencia específicos	%
		2. Proporción del área del territorio alterada permanentemente	%
	3. Acceso y calidad de recursos hídricos	1. Acceso y suministro del agua	Escala likert
		2. Nivel de tratamiento y gestión de aguas negras y grises	Escala Likert
		3. Proporción de agua utilizada contaminada o no recuperable para el uso humano	%
	4. Contaminación percibida	1. Percepción de alteración del paisaje	Escala de likert
		2. Niveles de ruido y contaminación auditiva	dB
		3. Nivel de tratamiento y gestión de residuos	Escala de Likert
	5. Biodiversidad impactada	1. Variación negativa de límites geográficos de especies a raíz del proyecto	% [Absoluto]
		2. Variación negativa en la densidad de especies de fauna a raíz del proyecto	% [Absoluto]
		3. Variación negativa de superficie de vegetación nativa a raíz del proyecto	% [Absoluto]
4. Relación de la capacidad de carga de los ecosistemas asociados al territorio [población actual/capacidad de carga]		%	

Figura 3.11: Matriz de indicadores de sostenibilidad para la dimensión ambiental [12].

DIMENSIÓN SOCIAL				
Dimensión (D)	Indicador (I)	Subindicador (S)	Unidad de Medida	
SOCIAL	1. Estabilidad y gobernanza	1. Autosuficiencia	Proporción de casos posibles en los que la comunidad podría realizar operación y mantenimiento [%]	
		2. Autogobernanza y gerencia del proyecto	Escala de Likert (nivel de apropiación del proyecto)	
		3. Desplazamiento y perturbación de núcleos familiares y productivos	Proporción de núcleos familiares, emprendimientos o iniciativas desplazadas contra su voluntad inicial [%]	
	2. Bienestar fundamental	1. Seguridad del usuario frente a la infraestructura	1. Seguridad del usuario frente a la infraestructura	Población con percepción de riesgo considerable del proyecto a la salud [%]
			2. Acceso a la salud	Escala de likert
			3. Inversión anual en salud	USD\$ per capita
		4. Presencia de docentes	4. Presencia de docentes	Número de docentes por cada 100 estudiantes
			5. Calidad educativa	Índice sintético de calidad educativa promedio para los 3 niveles
			6. Empleabilidad postfacto tras habilidades adquiridas gracias al proyecto	Proporción de personas en condición de empleabilidad tras el proyecto [%]
	3. Libertades y equidad	1. Seguridad y convivencia	1. Seguridad y convivencia	N° de delitos violentos por 100.000 habitantes
			2. Acceso a un sistema judicial y del derecho	Escala de likert respecto a las libertades y acceso judicial
		3. Nivel de liderazgo y representación	3. Nivel de liderazgo y representación	Tasa de líderes sociales o comunitarios sobre el número de habitantes [%]
			4. Equidad participativa	Proporción de habitantes con percepción de exclusión participativa y social tras el proyecto [%]
	4. Cohesión social	1. Apoyo e incentivo a la asociatividad y cooperativismo en la comunidad tras el proyecto	1. Apoyo e incentivo a la asociatividad y cooperativismo en la comunidad tras el proyecto	Proporción de asociaciones creadas o fortalecidas respecto a un año base [%]
			2. Nivel de co-construcción durante la formulación, construcción y operación del proyecto	Escala de Likert
	5. Impacto percibido	1. Alineación con las prioridades de la comunidad	1. Alineación con las prioridades de la comunidad	Porcentaje de alineación con las prioridades de la sociedad civil [%]
			2. Satisfacción frente al precio	Escala de likert

Figura 3.12: Matriz de indicadores de sostenibilidad para la dimensión social [12].

DIMENSIÓN TÉCNICA				
Dimensión (D)	Indicador (I)	Subindicador (S)	Unidad de Medida	
TÉCNICA	1. Resiliencia	1. Tolerancia de falla	Probabilidad de ocurrencia de eventos que afecten la operación de todo el sistema [Pr]	
		2. Reconexión del servicio	Tiempo promedio de restauración del servicio ante eventos de alto impacto y baja probabilidad [hrs]	
		3. Autosuficiencia ante corte	Proporción de la demanda total que el sistema podría abastecer en 24 horas sin servicio de la red [%]	
	2. Confiabilidad	1. SAIFI	1. SAIFI	Frecuencia promedio de interrupciones de energía por usuario por año [interrupciones]
			2. SAIDI	Duración acumulada promedio de las interrupciones de energía por usuario por año [horas]
		3. Desbalance trifásico máximo	3. Desbalance trifásico máximo	Máxima diferencia porcentual de tensión entre fases [%]
	3. Suficiencia	1. Vida útil efectiva de la solución	1. Vida útil efectiva de la solución	Proporción de la vida del proyecto operando sin más que mantenimiento [%]
			2. Calidad y uniformidad del programa de mantenimiento	Escala de likert
			3. Participación en la capacidad de atención del sistema	Proporción entre la generación del proyecto frente a la Hosting Capacity del sistema [%]
	4. Desempeño energético	1. Degradación del sistema BESS	1. Degradación del sistema BESS	Tasa de deterioro del BESS por año/ciclo [%]
			2. Distorsión armónica máxima en el sistema	THD [%]
			3. Pérdidas eléctricas (técnicas y no técnicas)	Proporción respecto a la energía anual generada [%]
	5. Adaptabilidad y congruencia	1. Nivel de automatización y gestión de la energía del sistema	1. Nivel de automatización y gestión de la energía del sistema	Escala de likert
			2. Facilidad de Interconectividad y escalabilidad de la microrred	Escala de Likert
			3. Conformidad y eficiencia frente a estándares técnicos, regulatorios y de mercado regionales	Escala de likert

Figura 3.13: Matriz de indicadores de sostenibilidad para la dimensión técnica [12].

Posterior a esto se evalúa la metodología mediante la realización de un caso de estudio para un proyecto energético en Ciudad Verde, Colombia, entregando como resultados índices de sostenibilidad desagregados y uno final que informa que el proyecto es sostenible, calificándolo bajo la etiqueta de "Bueno". La Figura 3.14 presenta un diagrama resumen de los resultados obtenidos en el citado trabajo.

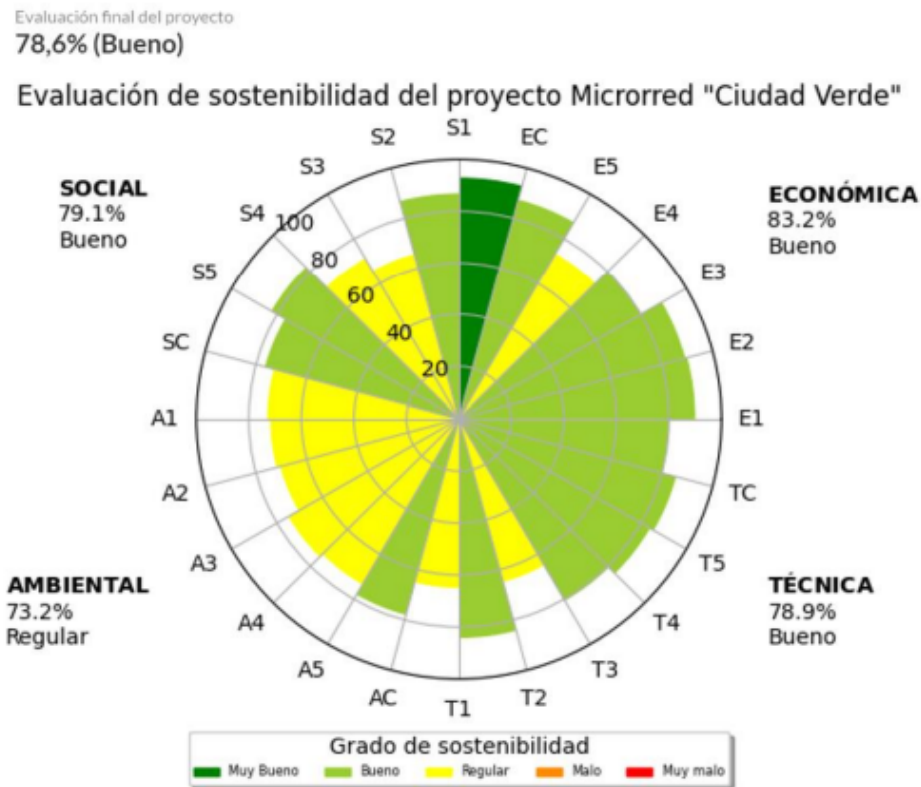


Figura 3.14: Resultados obtenidos de la evaluación de Ciudad Verde [12].

Esta metodología aporta una manera clara de evaluar un proyecto de generación distribuida como lo es un proyecto de diseño de micro-redes, logrando obtener la conveniencia y/o conveniencia relativa del diseño de una MG con respecto a otra, además de ser una metodología apta para modificaciones, dado que tanto los índices como pesos se pueden modificar de acuerdo a las prioridades deseadas.

El trabajo estudiado en la presente sección se basa a su vez en el Dow Jones Sustainability Index (SJSI World o Índice de Sostenibilidad Dow Jones en español) presente en [13], en el cual se profundiza más el proceso recién descrito para la sostenibilidad de proyectos, diferenciándose por distintos sectores de interés, distinguiéndose así, por ejemplo, 4 dimensiones en el sector eléctrico con sus respectivos pesos, las cuales son: Dimensión económica (27.27%), dimensión social (23.93%), dimensión ambiental (27.27%) y dimensión técnica (21.53%). Se establece también el proceso de asignación de pesos de cada indicador y dimensión, teniendo como principio el hecho de que una línea de mayor peso pueda igualmente ser contrarrestada por la suma de las líneas de menor peso, pudiendo así obtener un indicador de sostenibilidad exitoso aún si la línea base no es óptima.

3.7. Necesidad de una nueva metodología de diseño para enclaves estratégicos

A pesar de que el presente capítulo exhibió distintos métodos de diseño de micro-redes existentes en la actualidad, al contrastar estas metodologías con los objetivos específicos del presente trabajo, se observa que ninguno cumple a cabalidad con los mismos, con lo cual nace la necesidad de una nueva metodología que permita un diseño específico en los enclaves estratégicos de Iberoamérica.

En específico, al observar lo estudiado en la Sección 3.1, se obtiene una metodología de diseño de micro-redes que apunta a la sostenibilidad del proyecto mediante la inclusión de la comunidad en las etapas de proceso y de operación. Esto último establece una primera diferencia entre este trabajo y los objetivos del presente, dado que el diseño básico buscado no involucra activamente a la comunidad si no que, por el contrario, se busca una metodología que permita realizar el diseño en ausencia de la comunidad en estudio, esto es, sin la realización de encuestas, mediciones en terreno, entre otras actividades similares. Junto con esto, otra diferencia importante que se presenta es que el trabajo revisado se enfoca en zonas sin acceso a electricidad, mientras que el objetivo a alcanzar por el presente trabajo es el diseño en enclaves los estratégicos antes definidos. Así la metodología de diseño de la Sección 3.1 no es necesariamente válida para los enclaves deseados.

De manera similar, la metodología presentada en la Sección 3.2 se enfoca en mejorar la calidad de vida de los sectores rurales mediante el uso de micro-redes, nuevamente con una importante participación comunitaria, con lo cual, nuevamente este trabajo no cumple ni con la condición de poder ser desarrollada en ausencia de la comunidad, ni con ser una metodología específica para enclaves estratégicos si no que se enfoca en todo el sector rural, siendo así no válida para todos los casos posibles.

Sin perjuicio de lo anterior, estas dos primeras metodologías nombradas poseen varias etapas sumamente útiles para el diseño de micro-redes en general, las cuales pueden ser aprovechadas en una nueva metodología, añadiendo un mayor nivel de especificidad en ellas.

Por su parte, la Sección 3.3 presenta una metodología de co-construcción, la cual no es propiamente una metodología de diseño, si no que corresponde a una etapa posterior al mismo, siendo lógicamente una metodología que no satisface los objetivos del presente proyecto. Por último (dado que el resto de trabajos estudiados en este capítulo no son metodologías) , la Sección 3.5 presenta únicamente una distinción entre el diseño local y regional de una micro-red, siendo una etapa a considerar dentro del diseño pero tampoco una metodología de diseño en sí misma, llegando así a la conclusión de que ninguna de las metodologías estudiadas satisface los objetivos del presente trabajo, debido principalmente a la especificidad que incorpora al trabajo el hecho de considerar los enclaves estratégicos, así como también por el hecho de considerar etapas posteriores al diseño básico. Con esto, se puede justificar la creación de una nueva metodología de diseño para los antes nombrados enclaves estratégicos, la cual permita diseñar paso a paso una micro-red en estas zonas en específico.

Capítulo 4

Metodología de diseño de MG

La Figura 4.1 expone la metodología de diseño de micro-redes en enclaves estratégicos propuesta en este trabajo, la cual es resultante principalmente del conocimiento obtenido mediante la revisión bibliográfica de la Sección 3.

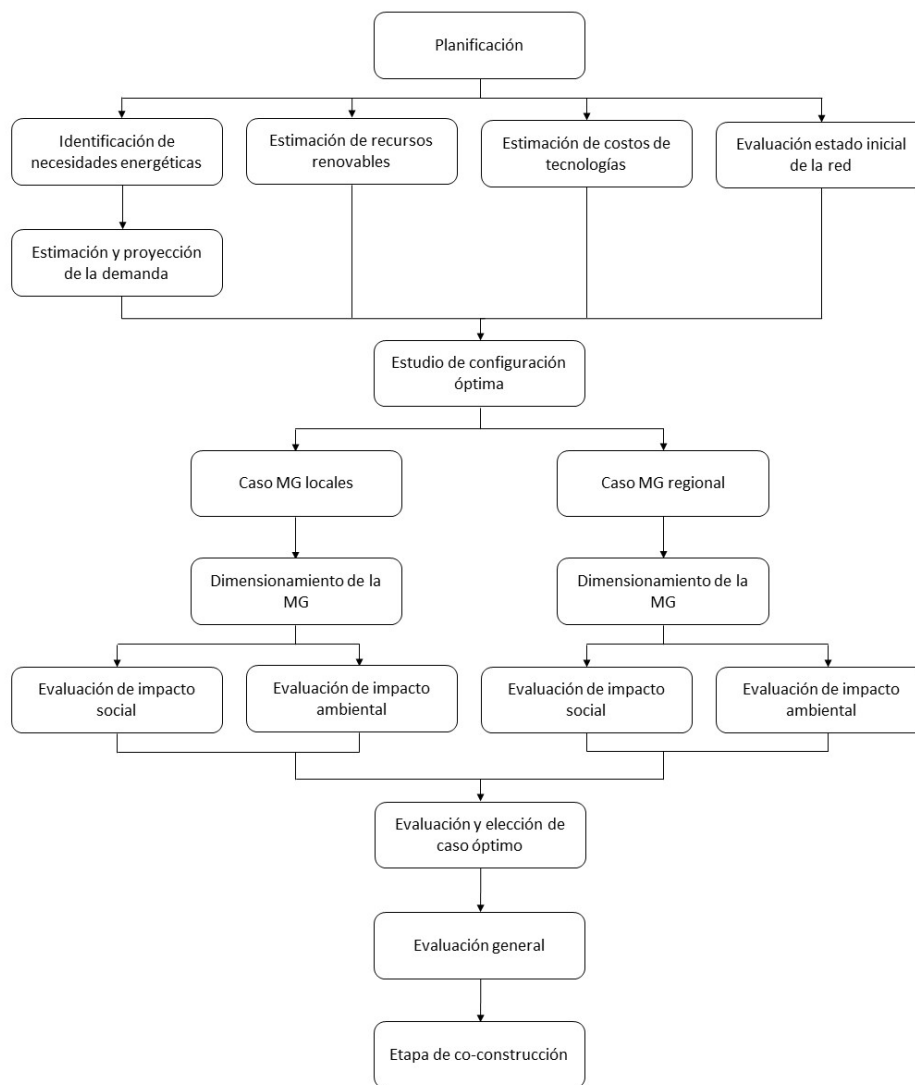


Figura 4.1: Metodología propuesta para el diseño de MG.

El primer bloque de la metodología corresponde a la etapa de 'Planificación', correspondiente a la etapa previa de la etapa de diseño de acuerdo a lo presentado en la Figura 3.4 de la revisión bibliográfica pero, a pesar de ser una etapa de alta relevancia, no es la etapa de interés de este trabajo. Sin perjuicio de lo anterior, la etapa previa al diseño no es necesariamente la etapa de planificación, también lo puede ser una etapa de 'Pre-factibilidad' como fue visto en [4] y [5], entre otras posibles etapas que sirvan como base del proyecto.

Dicho esto, a continuación se explican con detalle las distintas etapas de diseño propuestas en la Figura 4.1 expuesta con anterioridad.

4.1. Identificación de necesidades energéticas

En esta etapa se identifican las principales variables de interés del problema, ya sea mediante mediciones, bases de datos (como el Censo) e interacciones con la comunidad (entrevistas). Junto con esto se propone que, en caso de que la comunidad no cuente con ningún grado de suministro ni información de base, se utilice, a modo de referencia, una comunidad con suministro eléctrico completo que posea características (geográficas y sociales) similares a la comunidad en estudio, de manera de establecer una aproximación.

Así, las principales variables de interés corresponden a las necesidades energéticas de la comunidad, esto es, principalmente sus tipos de demanda (domiciliario, comercial, industrial, público, entre otras demandas específicas que se puedan considerar en la localidad), además del costo de la energía en la zona, cantidad de habitantes, empleabilidad, superficie utilizable, entre otras variables que se puedan considerar dependiendo del caso. Se distingue como la etapa más importante del diseño, dado que la mayoría de decisiones posteriores se llevarán a cabo de acuerdo a los resultados de ésta.

4.2. Estimación de recursos renovables

En esta etapa, mediante las herramientas disponibles (por ejemplo, en Chile son los Exploradores Solar y Eólico), se estima la disponibilidad de recursos renovables en la zona, más en específico, se estima principalmente la radiación solar y la velocidad del viento, pero en ciertas ubicaciones y proyectos se pueden estimar también la disponibilidad de otros recursos, como los hídricos y geotermales.

Idealmente la información aquí obtenida debe ser validada con datos reales medidos en terreno, con el fin de aumentar la precisión de los resultados posteriores, pero, dado la dificultad que pueden conllevar estas mediciones, se considera como suficiente la información entregadas por las herramientas locales o globales (como los datos de la NASA).

4.3. Estimación de costos de tecnologías

En esta etapa se investigan los costos de inversión, operación y mantenimiento (O&M) de las principales tecnologías a utilizar, como lo son los generadores diésel, paneles solares, aerogeneradores, almacenamiento, pero también líneas de transmisión y transformadores en caso

de ser necesario, entre otros elementos de costos significativos para el proyecto en específico, como podrían ser generadores hidráulicos o a gas.

4.4. Evaluación del estado inicial de la red:

En esta etapa se evalúa el estado que tiene la red de distribución antes del comienzo del proyecto, con tal de contemplar posibles reparaciones o re-acondicionamientos (por ejemplo, de un generador diésel que sirva de respaldo, de las líneas de transmisión existentes en la localidad, entre otros) que permitan disminuir la inversión inicial necesaria.

4.5. Estimación y proyección de la demanda

A partir de las necesidades energéticas obtenidas en la etapa de identificación de necesidades, se debe estimar la demanda de la localidad, así como también una proyección de esta, la cual permita realizar el dimensionamiento óptimo de los equipos para el presente y futuro de la comunidad.

Esta estimación puede realizarse mediante distintos métodos, siendo uno destacado la metodología estudiada en la Sección 4.4, la cual utiliza como entrada los datos obtenidos de las etapas anteriormente nombradas, además de datos obtenidos de una segunda comunidad similar, pero con acceso total a la electricidad, datos que se ingresan a un módulo basado en self-organized maps (SOM), con tal de obtener la estimación energética deseada. Sin embargo, esta metodología no es posible de aplicar sin antes tener encuestas en la zona, con lo cual se puede estimar también la demanda en base a la cantidad de viviendas y edificaciones en la zona, considerando sus demandas tipo, obteniendo un resultado suficiente pero no óptimo, lo cual lleva a resultados estimados con un menor nivel de exactitud.

Si se considerara el estudio de un caso regional, a la demanda obtenida se debe agregar además una demanda adicional que modele las pérdidas por las líneas de transmisión de mayor tensión, en caso de que el software ocupado para la simulación no las considere. Junto con esto, para proyectar la demanda se deben incorporar a los datos de entrada índices de crecimientos de la población, tanto de crecimiento natural como de crecimiento adicional producido por la propia instalación de la micro-red, permitiendo proyectar un suministro seguro para la comunidad en el futuro.

4.6. Estudio de configuración óptima

En esta etapa se contemplan dos posibles configuraciones para la MG: Las micro-redes locales, o una sola micro-red regional que dé solución al o los problemas considerados. Esto con el fin de encontrar la configuración que optimiza económica, social y medioambientalmente la micro-red, optimizando así la sostenibilidad de la misma.

4.6.1. Caso MG locales

Se analiza el caso de utilizar MG locales, las cuales utilicen generación cercana o dentro de cada localidad, y únicamente líneas de baja tensión. En caso de que en la región de estudio solo exista una localidad, se debe seguir únicamente la metodología para este caso.

4.6.2. Caso MG regionales

Se analiza el caso de utilizar una sola MG regional, esto en caso de que existan varias localidades aisladas a pocos kilómetros de distancia (de acuerdo a lo estudiado en [11], este caso se debe considerar para tres o más localidades separadas por aproximadamente 5 [km] o menos). Para este caso se puede considerar una generación centralizada, en zonas en donde exista una mayor disponibilidad de recursos, además del uso de líneas de media tensión y transformadores.

4.7. Dimensionamiento de la MG

Para los dos casos antes mencionados, y a través de la información obtenida de las etapas anteriores, se debe dimensionar de manera óptima las unidades necesarias para satisfacer las necesidades energéticas antes obtenidas. Para este paso se recomienda el uso del software Homer, Rescreen, o alguno de características similares.

En específico, el dimensionamiento óptimo incluye determinar el o los tipos de tecnología a usar (solar, eólico, diésel, una combinación entre estos, etc), el número y capacidad de los equipos a utilizar, sus costos totales, entre otras características adicionales de menor importancia. Junto con esto, se debe determinar también si se ocupará una red DC con convertidores, una red puramente AC o una combinación entre estos, determinando también la dimensión de los convertidores en caso de ser necesario. Una vez dimensionada la MG, se debe determinar el índice económico de la misma, considerando los subíndices (obtenibles en la etapa de diseño) estudiados en [12]. Así, el índice se calcula de acuerdo a la siguiente expresión:

$$I_e = 0.6 \cdot \frac{C_I}{\max(C_I, C_I^*)} + 0.3 \cdot \frac{C_{OM}}{\max(C_{OM}, C_{OM}^*)} + 0.1 \cdot \left(1 - \frac{C_E}{\max(C_E, C_E^*)}\right) \quad (4.1)$$

Donde I_e es el índice económico relativo al proyecto, C_I corresponde al costo de inversión del proyecto en \$, C_{OM} al costo de operación y mantenimiento de la micro red en \$, C_E al costo resultante de la energía en USD/kWh, y las variables C_I^* , C_{OM}^* y C_E^* corresponden al costo de inversión, de operación y mantenimiento más caros del país de realización del proyecto, y al costo de la energía presente en el mismo respectivamente.

A pesar de que el costo de la energía de un determinado país o zona es un dato de fácil acceso en los distintos países de Iberoamérica, la obtención de los costos máximos antes nombrados puede ser una tarea difícil, por lo cual, se propone las siguientes fórmulas de cálculo para estos valores:

$$C_I^* = 2.86 \cdot \sum_{j=1}^n P_j \cdot C'_{Ij} \quad (4.2)$$

$$C_{OM}^* = 2.86 \cdot \sum_{j=1}^n P_j \cdot C'_{OMj} \quad (4.3)$$

Donde C'_I y C'_{OM} son los costos de inversión, de operación y de mantenimiento promedios de el país de realización del proyecto para las distintas tecnologías a usar, y P_j corresponde a la potencia obtenida mediante el dimensionamiento para cada tipo de generación a utilizar. Así, cada uno de los valores es calculado de manera tal que, si los costos reales utilizados son iguales al promedio del país, los cocientes de la expresión (4.1) entreguen como resultado 0.35, siendo el centro del rango 'Regular' que se define posteriormente en la Figura 4.2.

De esta manera, en ausencia de los datos necesarios, se pueden estimar de igual manera costos máximos para cada país, de forma de lograr el cálculo del índice económico. Sin embargo, en caso de obtenerse los máximos costos antes mencionados, se sugiere utilizar estos datos, de manera de tener un índice más exacto.

4.8. Evaluación de impacto social

En esta etapa, y a partir de los resultados obtenidos en la etapa de dimensionamiento y de recopilación de antecedentes, se debe establecer un primer acercamiento social al proyecto, estableciendo los primeros beneficios que la red traería a la comunidad y determinando si el proyecto es apto de ser otorgado a un privado, a la comunidad, o si bien la administración debe ser mixta. En todo caso, siempre se debe considerar fuertemente a la comunidad en este diseño, dado que se espera que ellos sean quienes operen el principalmente la red. Dado esto, se recomienda fuertemente considerar la administración actual de la localidad, y ajustarla de manera de formar un primer modelo de gestión comunitario, sin embargo, el diseño de modelos de gestión escapa a los propósitos del trabajo, siendo un trabajo importante en etapas futuras al diseño básico propuesto en este documento.

Una vez realizado este acercamiento social, se debe calcular el índice correspondiente al ámbito social, el cual se calcula considerando los subíndices (obtenibles en la etapa de diseño) estudiados en [12]. Con esto, el índice se define mediante la siguiente expresión:

$$I_s = 0.7 \cdot \frac{C_E}{\max(C_E, C_E^*)} + 0.3 \cdot \left(1 - \left(\frac{E_p}{\max(E_p, h)} - \frac{E}{h}\right)\right) \quad (4.4)$$

Donde I_s es el índice de desarrollo social, C_E y C_E^* corresponden, al igual que en el punto anterior, al costo nivelado de la energía obtenido y el costo nivelado de la energía de la región donde se desarrolla el proyecto en \$, E_p corresponde a la cantidad de empleos en la localidad después de realizado el proyecto, E a la cantidad de empleos anterior a la realización del mismo y h a la cantidad de habitantes de la localidad en estudio.

Con el fin de facilitar el cálculo de este índice, la Tabla 4.1 presenta una recopilación de empleos generados por cada uno de los principales tipos de tecnologías de generación, obtenida a partir de datos de la Oficina Internacional del Trabajo [14]-[15] y de la Unión Europea [16].

Tabla 4.1: Cantidad de empleos generados por cada tecnología de generación.

Tipo de tecnología	Puestos de trabajo generado por MW
Solar PV	8.85
Eólica	1.74
Biomasa	1.81
Gas Natural	0.95
Diésel	0.045
Hidroeléctrica pequeña escala	0.12
Baterías	0.01

Así, con esta información es posible calcular la cantidad de empleos adicionales que se generarían en la comunidad, utilizando para esto los resultados de potencia instalada obtenida en la etapa de dimensionamiento, logrando así calcular el índice social antes mencionado. Por último, es importante mencionar que esta es una etapa clave para observar la posible relación con la comunidad, y para estimar el trabajo social a realizarse en etapas futuras.

4.9. Evaluación de impacto ambiental

En esta etapa, y dado lo obtenido del dimensionamiento y etapas previas, se realiza una evaluación del impacto ambiental del proyecto sobre la zona y la comunidad, con el fin de definir las medidas de prevención o mitigación según corresponda. Los costos asociados a este tipo de medidas, deben considerarse como costos del proyecto en etapas posteriores al diseño aquí propuesto. Para esta etapa, el índice a utilizar se calcula (nuevamente de acuerdo a los subíndices presentes en [12]) mediante la siguiente expresión:

$$I_a = 0.6 \cdot \frac{P_c}{P_T} + 0.1 \cdot \frac{S_u}{S_D} + 0.3 \cdot \frac{RH_u}{RH_T} \quad (4.5)$$

Donde I_a es el índice relativo al impacto ambiental, P_c corresponde a la cantidad de potencia instalada proveniente de energías contaminantes resultante del diseño, medida en kW, P_T corresponde a la potencia total instalada, S_u corresponde a la superficie a utilizar en m^2 , S_D corresponde a la superficie total disponible para la instalación de generación eléctrica, RH_u al recurso hídrico utilizado en m^3/s y RH_T al recurso hídrico total disponible en la zona de realización del proyecto.

Para este caso se facilitan en la Tabla 4.2 datos promedio acerca de la superficie utilizada por cada una de las principales tecnologías que se puedan presentar en una MG, de manera de estimar así la superficie utilizada.

Tabla 4.2: Superficie utilizada por cada tecnología de generación.

Tipo de tecnología	Superficie ocupada (m^2/kW)
Solar PV	10
Eólica	0.31
Biomasa	0.425
Gas Natural	0.1
Diésel	0.1
Hidroeléctrica pequeña escala	0.9
Baterías	0.09 (m^2/kWh)

Así, mediante la utilización de estos datos en conjunto con los obtenidos en la etapa de dimensionamiento, se puede estimar la superficie total utilizada por los elementos de generación, y finalmente obtener el índice ambiental correspondiente a esta etapa.

4.10. Evaluación y elección de caso óptimo

En esta etapa se comparan los resultados obtenidos para el caso de MG locales, y para el caso de la MG regional (en caso de ser considerada), y se escoge el caso óptimo considerando tanto los parámetros económicos, sociales y medioambientales obtenidos. Para esto, se calculan los índices de sostenibilidad para ambos casos, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$I_{sost} = 0.6 \cdot I_e + 0.3 \cdot I_a + 0.1 \cdot I_g \quad (4.6)$$

Donde I_{sost} es el índice de sostenibilidad. Los pesos tanto de los índices como de los sub-índices se justifican de acuerdo a lo mencionado en la Sección 3.6 y de lo estudiado en [13] donde se establecen pesos para la medición de sostenibilidad, los cuales pueden ser modificados dependiendo del caso de estudio, manteniendo en todo momento el principio de establecer una línea de mayor peso dentro de cada ponderación, de manera que el indicador final tenga una especial correlación con esta línea principal pero que, igualmente, esta asignación de pesos mantenga un límite tal que se obtenga una alta calificación de sostenibilidad únicamente cuando la mayoría las líneas de menor peso hayan obtenido una buena calificación, de forma de mantener un equilibrio.

A pesar de lo recién mencionado, existen también otras técnicas de asignación de pesos igualmente válidas, como lo es el trabajo estudiado en [17], donde, basándose en el mismo principio de flexibilidad ante distintos casos de estudio y objetivos, se establece cada peso de acuerdo a la priorización de objetivos secundarios con respecto a un objetivo principal, donde cada uno de estos objetivos secundarios se ordena jerárquicamente y se relaciona de alguna forma con las variables en estudio para el proyecto, las cuales a la vez se relacionan entre sí, para finalmente obtener un índice final que es usado (para los motivos del trabajo antes mencionado) para obtener una priorización de proyectos sociales. Sin embargo, al ser esta una primera etapa donde no se pueden establecer con claridad los objetivos sociales de la

comunidad, es una metodología difícil de aplicar a este nivel, con lo cual se recomienda principalmente el uso de la metodología mencionada en [13] para asignar los pesos de cada índice.

Notar que, en el caso en que se desarrollen de manera paralela los casos locales y regional, en el caso local se obtendrán tantos índices como localidades hayan en estudio. En vista de lo anterior, para poder realizar una comparación entre ambos casos, se debe obtener un índice de sostenibilidad global para el caso local, determinado por el promedio simple de los índices individuales, lo cual queda expresado de la siguiente manera:

$$I_{sg} = \frac{\sum_{j=1}^n I_{sj}}{n} \quad (4.7)$$

Donde I_{sg} corresponde al índice de sostenibilidad global y n al número de localidades en estudio. Este proceso puede repetirse de la misma manera para los índices económicos, sociales y ambientales desagregados, en caso de querer realizar un análisis por dimensión. Una vez obtenidos los indicadores recién mencionados, estos pueden ser evaluados tanto de forma integrada como separada, dependiendo nuevamente del análisis deseado, y considerando los rangos presentes en la Figura 4.2 para obtener aproximaciones de sostenibilidad y de rendimiento que sirvan como base para un primer análisis del proyecto.

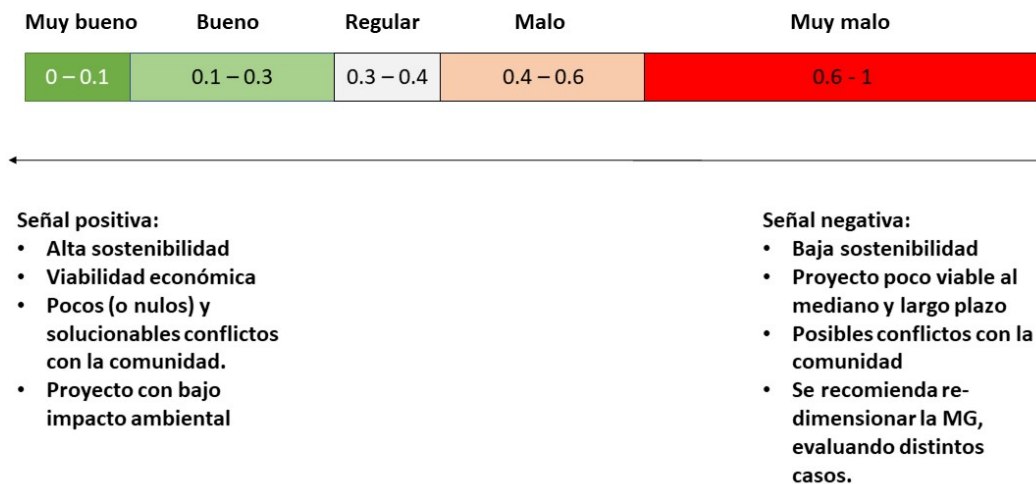


Figura 4.2: Rangos para la evaluación de índices obtenidos.

Donde, basándose en lo expuesto en [18] para evaluación de proyectos de energía mediante lógica difusa, se establecen los 5 rangos observados en la Figura 4.2, cada uno asociado a una etiqueta lingüística desde 'Muy bueno' a 'Muy malo', haciendo referencias estas etiquetas a su nivel de sostenibilidad, recomendándose replantear ciertos aspectos del proyecto mientras más negativo sea el índice de sostenibilidad final obtenido, como lo puede ser el dimensionamiento, los costos de las tecnologías ocupadas, el uso excesivo de suelo y/o agua, entre otras medidas que permitan mejorar la sostenibilidad, dado que de lo contrario el proyecto podría ser poco viable en el tiempo. Así, estos rangos son válidos para evaluar I_{sost} , I_e , I_s y I_a .

En cuanto a los límites escogidos para los rangos, estos provienen directamente de la expresión (4.6) antes mencionada, en específico, de los pesos escogidos en la mencionada expresión. El rango 'Malo' se establece considerando que un proyecto perfecto económicamente ($I_e = 0$) debe ser considerado 'Malo' si los otros dos índices son muy deficientes ($I_a = 1, I_s=1$), y, por el contrario, un proyecto perfecto social y ambientalmente ($I_a = 0, I_s=0$) pero muy deficiente económicamente ($I_e = 1$), también debe ser considerado 'Malo'. Bajo esta misma lógica se definen los rangos de 'Bueno' y 'Muy Bueno', considerándose bueno un proyecto perfecto económica y ambientalmente, y 'Muy bueno' aquel que tiene los 3 indicadores con alto rendimiento. Así, se presentan a continuación el significado general y las recomendaciones a seguir de acuerdo al rango en el que se encuentra un índice:

- **Muy Bueno:** Desde el 0 al 0.1 inclusive. Indica una muy alta sostenibilidad y asegura un buen rendimiento económico y ambiental del proyecto.
- **Bueno:** Desde el 0.1 al 0.3 inclusive. Indica alta sostenibilidad y asegura un buen rendimiento económico del proyecto.
- **Regular:** Desde el 0.3 al 0.4 inclusive. Indica una sostenibilidad media con, al menos, un rendimiento aceptable económica y ambientalmente.
- **Malo:** Desde el 0.4 al 0.6 inclusive. Indica la existencia de importantes problemas, al menos, ambientales y sociales.
- **Muy Malo:** Desde el 0.6 al 1. Indica la existencia de importantes problemas en las 3 áreas consideradas, y la necesidad de re-dimensionar.

Con esto, finalmente el caso óptimo será el que entregue el índice de sostenibilidad más bajo, indicando esto que es un proyecto más sostenible en su totalidad.

4.11. Evaluación general

En esta etapa final se evalúan los resultados obtenidos, y se verifica el cumplimiento de todas las restricciones impuestas inicialmente. Junto con esto, se analizan ciertas condiciones económicas relevantes para el futuro del proyecto, como establecer el presupuesto mínimo necesario, o analizar el precio de la energía percibido por la comunidad, el cual es considerado como un punto clave para la sostenibilidad del proyecto, dado que si este precio es elevado, los beneficios finales de la electrificación solo serán parciales, con lo cual, en esta etapa se recomiendan medidas futuras en caso de que el precio de la energía obtenido sea considerablemente menor al de la región de estudio. Por último, en caso de que la evaluación general sea positiva, se debe elaborar el flujo de caja preliminar del proyecto (típicamente, se utiliza un periodo de 25 años), el cual considere las inversiones iniciales, la operación y mantenimiento, los reemplazos y los costos residuales de los equipos a utilizar, de acuerdo a lo obtenido en la etapa de dimensionamiento de la red.

Finalmente, se observa que la última etapa observable en la metodología de la Figura 4.1 corresponde a la etapa de co-construcción. Esta etapa no corresponde a parte de la metodología de diseño, pero se recomienda realizar esta etapa como la etapa posterior a la etapa de diseño aquí presentada, dado que permite ajustar el diseño obtenido de la metodología propuesta a la comunidad en específico, generando así un proyecto más acorde con la misma, aumentando finalmente la sostenibilidad de la MG.

Capítulo 5

Metodología utilizada para la validación mediante casos de estudio

Se explica a continuación la metodología a utilizar para escoger los dos casos de estudio, y para aplicar la metodología observada en la Figura 4.1 a los mismos, con tal de validarla.

5.1. Elección casos de estudio

Como se mencionó en los objetivos específicos del presente trabajo de título, el trabajo busca realizar dos casos de estudio, uno en Chile y uno en Argentina, con el fin de poder validar la metodología en todo Iberoamérica y no únicamente en Chile.

Dicho esto, la elección de los casos de estudio se basa principalmente en el nivel de electrificación y de desarrollo de las localidades, esto debido a que el trabajo apunta a mejorar estos aspectos claves para las comunidades, con lo cual, localidades con menores índices de electrificación y/o de desarrollo se priorizan. Adicionalmente, se deben considerar localidades que calcen con la descripción de un enclave estratégico, esto es, que posean un potencial energético y productivo considerable. Por último, se debe considerar también el acceso y el nivel de información existente con respecto a la comunidad y/o localidad, dado que se necesitan datos de potencial energético, de población, de actividades económicas, entre otra información necesaria para lograr aplicar la metodología de manera efectiva.

Por último, dado que se quiere validar la metodología en su totalidad, al menos en uno de los casos a escoger se debe tener la posibilidad de realizar una MG regional.

5.2. Aplicación de la metodología en al caso chileno

Una vez escogidos los casos de estudio, se aplica la metodología, en primer lugar, al caso chileno, el cual se desarrolla en la localidad de Pachica, tal y como se muestra y justifica en la Sección 6.1. Así, a continuación se explica cómo aplicó cada una de las etapas de la metodología antes propuesta en Chile.

5.2.1. Identificación de necesidades energéticas - Estimación y proyección de la demanda

Dado que la comunidad escogida no presenta información de base, y que, la realización tanto de encuestas como de mediciones en el terreno es poco factible para este trabajo, se opta por utilizar como referencia la MG ubicada en Huatacondo, la cual posee datos continuos desde 2014 hasta el año 2019. Esto se justifica en que ambas comunidades tienen muchas similitudes tanto geográficas, como demográficas, como también sociales, siendo localidades norteñas aisladas con consumos principalmente residenciales. Así, al estudiar la demanda horaria promedio en Huatacondo, se obtiene la curva que se observa en la Figura 5.1.

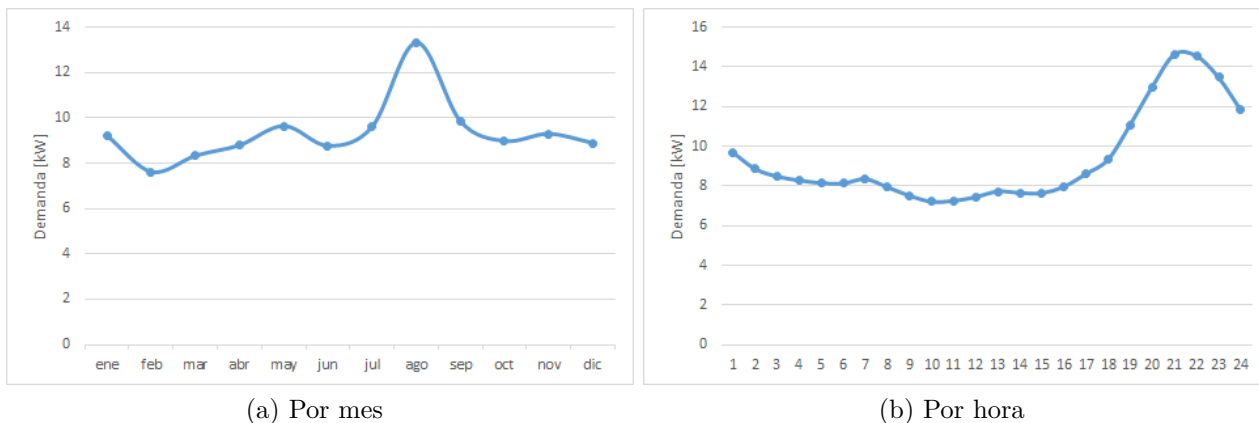


Figura 5.1: Demanda eléctrica en Huatacondo.

Donde se destaca un pico de demanda en el mes de agosto, dado una fiesta religiosa de importancia en la zona [19]. En base a los datos obtenidos, datos de población y tipo de demanda obtenidos mediante el CENSO 2017 [20], se estima una demanda promedio por vivienda para localidades similares a Huatacondo, la cual, ponderada por la cantidad de viviendas con demanda residencial, que en el caso específico de Pachica corresponde al 100 % de las viviendas, resulta finalmente en la estimación de la demanda para la localidad en estudio observada en la Figura 6.4.

5.2.2. Estimación de recursos renovables

Para la obtención la estimación de recursos renovables en la zona, se utiliza el Explorador Solar [21] y el Explorador Eólico [22] del Ministerio de Energía del Gobierno de Chile, herramientas que entregan una estimación de la radiación solar y la velocidad del viento de la zona, junto con otras características de estos recursos. Dado el escaso recurso hídrico de la zona y la no presencia de energía geotérmica, se utilizan únicamente los dos recursos renovables antes nombrados.

5.2.3. Estimación de costos de tecnologías

Para estimar los costos actuales de las principales tecnologías de generación, se acude al Informe de Costos de Tecnologías de Generación [23] realizado por la Comisión Nacional de Energía (CNE) de Chile de manera anual.

5.2.4. Evaluación estado inicial de la red

Dado lo aislado de la localidad, y la imposibilidad de reconocer personalmente el estado y/o existencia de la red eléctrica en la localidad, se acude a distintas fuentes de información, destacándose la plataforma EnergiaMaps [24] de la CNE y el Portal PMGD-Netbilling [25] de CGE.

5.2.5. Estudio de configuración óptima

Dado que Pachica, la localidad en estudio, no posee localidades suficientemente cercanas a su alrededor como para diseñar una MG regional, solo se debe considerar el caso de una MG local.

5.2.6. Dimensionamiento de la MG

Para realizar el óptimo dimensionamiento de la MG local se utiliza el software HOMER Pro, utilizando como entrada los datos obtenidos de las etapas anteriores.

De esta manera, se crea un proyecto desde cero y se ingresa la carga eléctrica en resolución horaria y tecnologías de generación a utilizar que, en este caso, corresponden a generación solar, eólica y diésel, debido a ser estos los únicos recursos disponibles en la zona, los cuales también deben ser ingresados como datos a el software en resolución horaria. Adicionalmente, se agregan también baterías a modo de almacenamiento energético, las cuales permitan menores costos de operación y una mayor estabilidad para la red.

Finalmente, mediante los resultados del dimensionamiento y utilizando las fórmulas (4.2) y (4.3) presentadas en la Sección 4.1 en los casos necesarios, se calcula el índice económico de esta etapa, el cual es analizado de acuerdo a lo indicado en la Figura 4.2.

5.2.7. Evaluación de impacto social

Considerando los datos obtenidos en la etapa de identificación de necesidades y los resultados del dimensionamiento se analiza, en primer lugar, los beneficios de la red para la comunidad, en cuanto a las posibles mejoras en la calidad de vida de los habitantes y en cuanto al precio de la energía resultante. Posterior a esto, y dado por los resultados puramente económicos de la etapa previa, se determina la administración de la futura red.

Finalmente, mediante los datos ya obtenidos, y utilizando los datos presentes en la Tabla 4.1, se determina el índice social de esta etapa, el cual luego es analizado de acuerdo a lo señalado en la Figura 4.2.

5.2.8. Evaluación de impacto ambiental

Dado lo obtenido principalmente en la etapa de dimensionamiento y lo expuesto en la Tabla 4.2, se calcula directamente el índice ambiental y se analiza de acuerdo a lo señalado en la Figura 4.2, definiendo posibles medidas de mitigación a futuro de acuerdo al índice obtenido.

5.2.9. Evaluación general

Con los índices antes obtenidos, se calcula el índice de sostenibilidad de acuerdo a lo expresado en (4.6) y se analiza el resultado de acuerdo a lo señalado en la Figura 4.2, lo cual permite obtener las primeras conclusiones referentes al proyecto. Posterior a esto y, mediante los resultados obtenidos en Homer Pro, se analiza el presupuesto mínimo que requiere el proyecto y si el costo de la energía obtenido en la zona es factible para la comunidad. Por último, se desarrolla un flujo de caja del proyecto con todos los costos considerados.

5.3. Aplicación de la metodología al caso argentino

Se aplica a continuación cada etapa de la metodología propuesta a un caso argentino, correspondiente al caso de las localidades de San Felipe, Acoyte y Chorro, tal y como se observa en la Sección 6.1.

5.3.1. Identificación de necesidades energéticas - Estimación y proyección de la demanda

Dado que las comunidades escogidas no presentan información de base, y que, la realización tanto de encuestas como de mediciones en el terreno son poco factibles para este trabajo, se decide estimar la demanda de cada localidad en base a la estimación de la energía promedio consumida por hogar en Argentina. Esto se debe, entre otros motivos, a que tampoco existen otras micro-redes en Argentina que sirvan como una referencia para modelar la demanda horaria, como el caso de Huatacondo en Chile utilizado en la Sección 5.2.1.

Así, mediante lo señalado por el Gobierno Argentino y en base a aproximaciones de consumo, se utilizarán como consumos mensuales los datos observados en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1: Consumos promedio en Argentina.

Consumo promedio vivienda	150 kWh
Consumo promedio comercio	250 kWh

Con estos datos se calcula el consumo anual para cada una de las viviendas de las localidades en estudio, tanto para las viviendas como los comercios y, luego, mediante la herramienta de Reopt Lite [26] (separando las viviendas de los comercios), se transforman el consumo anual en perfiles horarios de demanda para todo el año los cuales son sumados de acuerdo a la cantidad de viviendas y comercios de cada localidad, obteniendo así los perfiles horarios de cada localidad para todo un año, los cuales se observan en la Figura 6.8, la Figura 6.9 y la Figura 6.10.

5.3.2. Estimación de recursos renovables

Para la obtención la estimación de recursos renovables en la zona, se utiliza el POWER Data Access Viewer [27] de la NASA, herramienta que entrega, entre otras mediciones, la radiación solar y la velocidad del viento de una determinada coordenada, obteniendo los perfiles de radiación y viento para las 3 localidades. A pesar de que la zona cuenta con

recursos hídricos, su uso en estos tiempos puede conllevar una serie de dificultades extras a la hora de la realización del proyecto, con lo cual, este recurso no será considerado para el diseño.

5.3.3. Estimación de costos de tecnologías

No existe para Argentina un informe que recolecte todos los costos de inversión y de OM de las tecnologías de generación, con lo cual, estos son recolectados de diversas fuentes, como lo son el Banco Interamericano de Desarrollo [28] o BNamericas [29], mientras que para los valores no encontrados, se establecen como válidos los costos obtenidos para el caso chileno, sobre todo en lo que respecta a costos de operación y mantenimiento.

5.3.4. Evaluación estado inicial de la red

Dado lo aislado de las localidades en estudio, y de la imposibilidad de reconocer en terreno el estado y/o la existencia de la red eléctrica en las comunidades, se acude a otras fuentes de información. Así, de acuerdo a lo indicado por el Ministerio de Energía y Minería de Argentina [30], al año 2018 no existían redes eléctricas en estas zonas.

5.3.5. Estudio de configuración óptima

En este caso de estudio se evalúan ambas posibilidades, tanto el caso de realizar un proyecto con 3 MG locales y aisladas entre sí, o una sola MG regional interconectada para las 3 localidades en evaluación.

5.3.6. Caso MG locales

Se evalúa en primer lugar el caso de las MG locales, donde se diseña y se calculan los índices para cada localidad por separado para finalmente sumar costos, promediar índices, entre otros.

5.3.6.1. Dimensionamiento de la MG

Para realizar el óptimo dimensionamiento de las MG locales se utiliza el software HOMER Pro, utilizando como entrada los datos obtenidos de las etapas anteriores.

Así, se crean 3 proyectos desde cero por separado y se ingresa en cada caso la carga eléctrica en resolución horaria y tecnologías de generación a utilizar que, en estos casos, corresponden a generación solar, eólica y diésel. Adicionalmente, se agregan también baterías a modo de almacenamiento energético, las cuales permitan menores costos y una mayor estabilidad para la red.

Finalmente, mediante los resultados del dimensionamiento y utilizando las fórmulas (4.2) y (4.3) presentadas en la Sección 4.1 en los casos necesarios, se calcula el índice económico individual de cada proyecto, los cuales son analizados de acuerdo a lo indicado en la Figura 4.2.

5.3.6.2. Evaluación de impacto social

Considerando los datos obtenidos en la etapa de identificación de necesidades y los resultados del dimensionamiento se analiza, en primer lugar, los beneficios de las redes para las distintas comunidades, en cuanto a las posibles mejoras en la calidad de vida de los habitantes y en cuanto al precio de la energía resultante. Posterior a esto, y dado por los resultados puramente económicos de la etapa previa, se determina la administración de las futuras redes.

Finalmente, mediante los datos obtenidos, y utilizando los datos presentes en la Tabla 4.1, se determina el índice social para cada MG local, los cuales son analizados de acuerdo a lo señalado en la Figura 4.2.

5.3.6.3. Evaluación de impacto ambiental

Dado lo obtenido principalmente en la etapa de dimensionamiento y lo expuesto en la Tabla 4.2, se calcula en esta etapa los índices económicos de cada MG local, los que se analizan de acuerdo a lo señalado en la Figura 4.2, definiendo medidas de mitigación de acuerdo a los índices obtenidos.

5.3.7. Caso MG regional

En contra parte al caso de las MG locales, se estudia el caso de una sola MG regional que pueda aprovechar de mejor manera las características solares y eólicas de las 3 localidades en evaluación, incluyendo el uso de transformadores y líneas de media tensión.

5.3.7.1. Dimensionamiento de la MG

Para realizar el óptimo dimensionamiento de la MG regional también se utiliza el software HOMER Pro, utilizando como entrada los datos obtenidos de las etapas de recopilación de antecedentes.

Así, se crea un proyecto desde cero y se ingresa la carga eléctrica total de las localidades en resolución horaria y las tecnologías de generación a utilizar que, en este caso, corresponden a generación solar, eólica y diésel. También se agregan también baterías a modo de almacenamiento energético, las cuales permitan menores costos y una mayor estabilidad para la red.

Adicionalmente, en este caso se deben tener en consideración condiciones especiales que permitan modelar el caso regional como un sistema uninodal. Para esto, en primer lugar se escogen las localidades con mayor promedio de radiación solar y de velocidad de viento y se supone que en estas localidades se concentrará la generación. Junto con esto, se deben añadir también al proyecto los costos de inversión y de operación de los transformadores y líneas de transmisión a utilizar. Por último, y a modo de modelar las pérdidas térmicas por las líneas de transmisión, se agrega a la demanda regional una demanda extra dependiente del voltaje (23 kV) y la resistencia (75Ω) a utilizar, siendo estas pérdidas térmicas, las principales a los niveles de tensión utilizados [31], omitiendo, a el nivel diseño básico considerado en este trabajo, otros efectos que traen consigo las longitudes y tensiones superiores de estas líneas de transmisión.

Finalmente, mediante los resultados del dimensionamiento y utilizando las fórmulas (4.2) y (4.3) presentadas en la Sección 4.1 en los casos necesarios, se calcula el índice económico del caso regional, el cual es analizado de acuerdo a lo indicado en la Figura 4.2.

5.3.7.2. Evaluación de impacto social

Considerando los datos obtenidos en la etapa de identificación de necesidades y los resultados del dimensionamiento se analiza, en primer lugar, los beneficios de la red para la comunidad, en cuanto a las posibles mejoras en la calidad de vida de los habitantes y en cuanto al precio de la energía resultante. Posterior a esto, y dado por los resultados puramente económicos de la etapa previa, se determina la administración de la futura red.

Finalmente, mediante los datos obtenidos, y utilizando los datos presentes en la Tabla 4.1, se determina el índice social para la MG regional, el cual luego es analizado de acuerdo a lo señalado en la Figura 4.2.

5.3.7.3. Evaluación de impacto ambiental

Dado lo obtenido principalmente en la etapa de dimensionamiento y lo expuesto en la Tabla 4.2, se calcula en esta etapa el índice ambiental de la MG regional y se analiza de acuerdo a lo señalado en la Figura 4.2, definiendo medidas de mitigación de acuerdo al índice obtenido.

5.3.8. Evaluación y elección del caso óptimo

En esta etapa, con los resultados de ambos casos ya calculados, se procede a calcular el índice de sostenibilidad de ambos casos de acuerdo a lo expresado en (4.6), calculando los índices de sostenibilidad de las 3 MG locales y la MG regional, para posteriormente utilizar la expresión (4.7) para obtener un índice de sostenibilidad global del caso local.

Una vez obtenido este último índice, se compara con el índice de sostenibilidad del caso regional, escogiéndose el caso con el menor índice, lo cual indica mayor sostenibilidad. Al mismo tiempo, se evalúa el caso escogido de acuerdo a lo indicado en la Figura 4.2 y se realiza un primer análisis tanto de los índices desagregados como de los índices finales y del caso escogido.

5.3.9. Evaluación general

Por último, en esta etapa se desarrolla y se evalúa más en detalle el caso escogido, estableciendo, mediante el uso de Homer Pro, el presupuesto mínimo que requiere el proyecto y si el costo de la energía obtenido es efectivamente factible para la comunidad en primera instancia. Finalmente, se desarrolla un flujo de caja del proyecto con todos los costos considerados.

Capítulo 6

Resultados

La presente sección tiene por objetivo exponer los principales resultados obtenidos de la realización de los casos de estudio, así como también el análisis de los mencionados resultados.

6.1. Elección casos de estudio

En primer lugar, para el caso chileno se escoge la comuna de Huara, Provincia del Tamarugal, Región de Tarapacá y parte del Norte Grande de Chile. La Figura 6.1 muestra un mapa general de la comuna.



Figura 6.1: Comuna de Huara, Chile.

En específico, se escoge la localidad de Pachica y sus alrededores para realizar el caso de estudio en Chile. Esto se debe, en primer lugar, a que la comuna de Huara es una de las comunas con menor nivel de electrificación en el Norte Grande, con un porcentaje de electrificación del 82,23 % de acuerdo a lo señalado por el Mapa de Vulnerabilidad Energética del Ministerio de Energía [1].

Por otro lado, conocido es el potencial energético del norte de Chile, sobretodo en lo que respecta a potencial solar y eólico, con lo cual, la localidad de Pachica cuenta con el potencial suficiente. Junto con esto, la localidad de Pachica contaba al año 2019 con 168 habitantes, cantidad muy similar a la población de Huatacondo, otra comunidad aislada de la Región de Tarapacá. Esta comunidad cuenta con una micro-red aislada, de la cual se pueden extraer datos para estimar y proyectar la demanda en Pachica, dado las similitudes en cantidad y características de la población de ambas localidades, siendo ambas localidades basadas principalmente en la agricultura y con potencial de turismo arqueológico.

Luego, para el caso argentino, la localidad escogida es la Provincia de Salta, en específico, el Departamento de Santa Victoria, ubicado al norte de la provincia. La Figura 6.2 muestra un mapa general de la provincia recién nombrada.



Figura 6.2: Provincia de Salta, Argentina.

Se escoge esta provincia y departamento debido, en primer lugar, a que este posee un alto índice de pobreza multidimensional, de acuerdo con el mapa de pobreza multidimensional del gobierno argentino [32]², además de ser el departamento con la menor electrificación de Argentina al año 2010 [33]. Adicional a esto, y de acuerdo a los datos de la NASA, estas localidades cuentan con un considerable potencial solar y eólico, lo cual vuelve a la zona apta para la evaluación y para la implementación de la metodología.

Con esto, dentro del Departamento de Santa Victoria, se escogen 3 pequeñas localidades cercanas entre si, las cuales son San Felipe, Acoyte y Chorro, localidad cercanas tanto a la capital del departamento (Santa Victoria) como al límite con Bolivia. La Figura 6.3 muestra un mapa general de la zona, junto con las localidades a estudiar.

² El índice de pobreza multidimensional argentina considera las dimensiones de vivienda, servicios básicos, educación, empleo y salud.



Figura 6.3: Localidades escogidas para el caso Argentino.

Donde las localidades de Acoyte y San Felipe tiene una separación de 5.2 [km], las de San Felipe y Chorro de 4.88 [km] y las localidades de Acoyte y Chorro una separación de aproximadamente 9.21 [km].

6.2. Caso chileno

6.2.1. Identificación de necesidades energéticas y estimación y proyección de la demanda

Para la obtención de un perfil de demanda anual en resolución horaria, se pondera directamente los datos obtenidos de Huatacondo, de acuerdo a lo señalado en la Sección 5.2.1, con los datos de viviendas y habitantes de en Pachica [20]. La Tabla 6.1 presenta el total de habitantes y el total de viviendas de cada una de las dos localidades.

Tabla 6.1: Resultados CENSO 2017 para Huatacondo y Pachica.

Localidad	Total	Viviendas
Huatacondo	55	102
Pachica	168	138

Con esto, el perfil de demanda anual obtenido se puede observar en la Figura 6.4, donde se distingue una máxima demanda en el mes de noviembre, dado una que en este mes se realiza la Fiesta de San Andrés [34], fiesta de características similares a la Fiesta de la Virgen de la Asunción que se realiza en Huatacondo en el mes de agosto [19], y un consumo menor en las otras épocas del año.

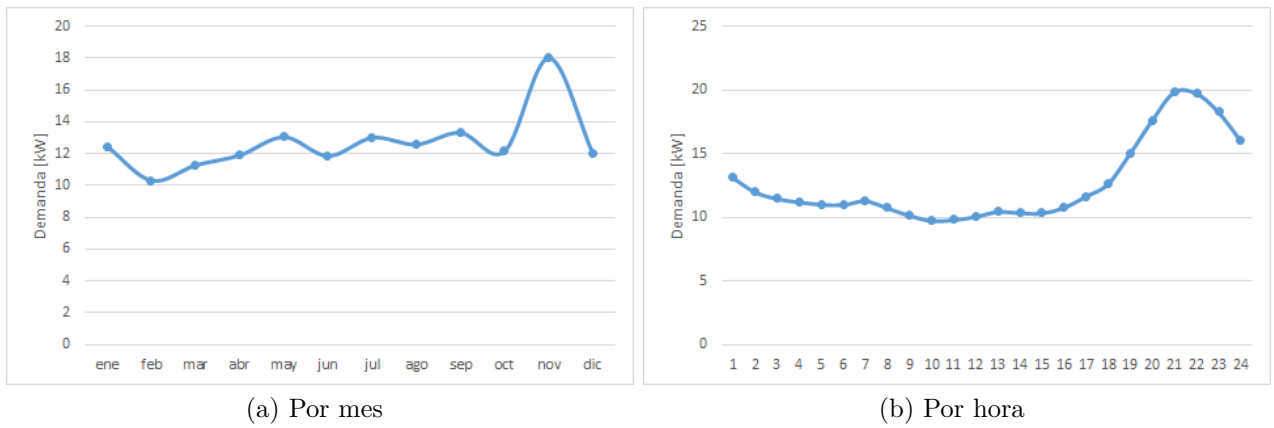


Figura 6.4: Demanda estimada para Pachica.

Adicionalmente, se estiman desde distintas fuentes la empleabilidad [35], la superficie de la localidad y el precio de la energía promedio del país [36]. Los resultados se observan en la Tabla 6.2.

Tabla 6.2: Empleabilidad, superficie y costo de la energía en la zona.

Empleabilidad estimada	55.3%
Superficie estimada	0.488 [km ²]
Precio de la energía	0.183 [USD/kWh]

6.2.2. Estimación de recursos renovables

Como se mencionó en la Sección 5.2.2, para este caso se considerarán como recursos renovables únicamente el recurso solar y eólico, dado la ausencia de otros recursos de esta categoría. Con esto, el perfil de radiación horario por mes y por hora obtenido a partir de [21] se observa en la Figura 6.5 y el perfil de viento horario por mes y por hora obtenido a partir de [22] en la Figura 6.6.

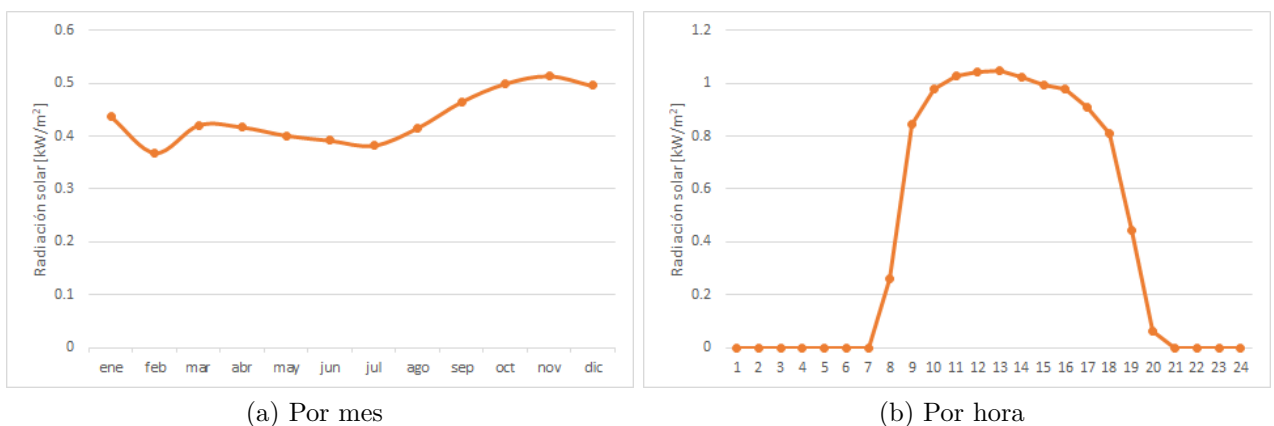


Figura 6.5: Perfiles de radiación para Pachica.

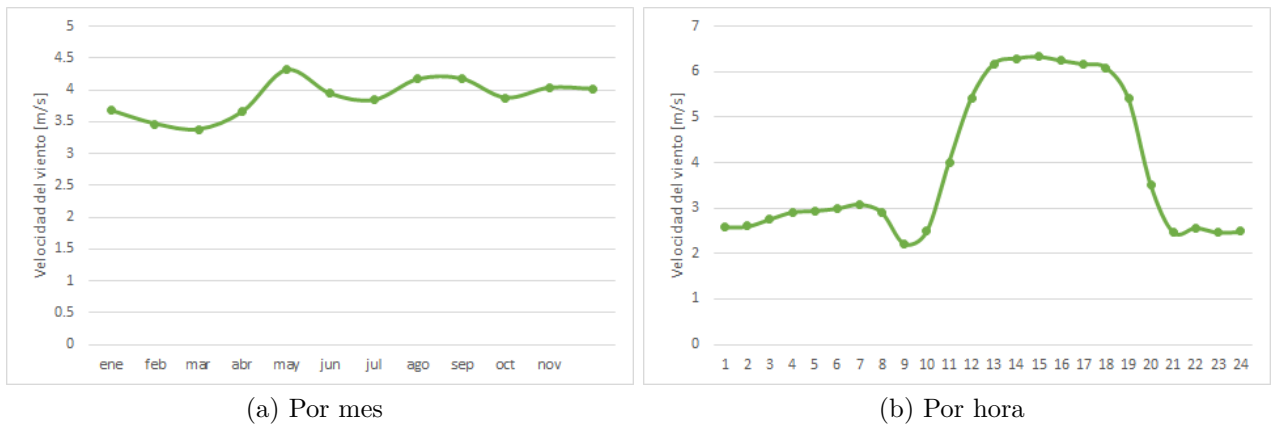


Figura 6.6: Perfiles de viento para Pachica.

6.2.3. Estimación de costos de tecnologías

Al estimar el costo de las principales tecnologías relevantes para el desarrollo del proyecto, se obtienen, a partir de los documentos presentados en [23] y [37], los resultados presentes en la Tabla 6.3.

Tabla 6.3: Costos de tecnologías de generación en Chile.

Tipo de tecnología	Costo de inversión (USD/kW)	Costo de O&M (USD/kW/año)
Solar PV	871	8.71
Eólica	1266	12.66
Biomasa	3170	31.71
Gas Natural	898	17.93
Diésel	448	4.48
Hidroeléctrica pequeña escala	3263	32.63
Baterías	100 (USD/kWh)	1 (USD/kWh/año)

Junto con esto, la Tabla 6.4 presenta los costos máximos a utilizarse en la etapa de dimensionamiento posterior y, en donde los valores de costos de inversión máximo de energía solar [38] y eólica [39] se adquieren de los datos existentes para Chile, y el resto de valores son estimados mediante las expresiones (4.2) y (4.3).

Tabla 6.4: Costos máximos de tecnologías de generación en Chile.

Tipo de tecnología	Costo máximo de inversión (USD/kW)	Costo máximo de O&M (USD/kW)
Solar PV	2668	24.91
Eólica	1500	36.21
Diésel	1281	12.82
Baterías	286 (USD/kWh)	2.86 (USD/kWh)

6.2.4. Evaluación estado inicial de la red

Como se menciona en la Sección 5.2.4, no existe información acerca de la existencia de una red eléctrica en Pachica, con lo cual se asume que esta no existe y se establece una red desde cero.

6.2.5. Estudio de configuración óptima

Como se mencionó también en la Sección 5.2.5, en este caso, dado que no existen localidades cercanas a Pachica, solo se considera el caso local, con la cual la MG a diseñar será puramente local con líneas de baja tensión y sin transformadores.

6.2.6. Dimensionamiento de la MG

Al ingresar los datos recolectados en Homer Pro, se obtienen como principales resultados económicos los indicados en la Tabla 6.5.

Tabla 6.5: Resultados económicos de la MG diseñada en Pachica, Chile.

Costo Presente Neto	175.829 (USD)
Costo de inversión	118.177 (USD)
Costo de O&M	1.504 (USD/año)
Costo de la energía	0.122 (USD/kWh)

Junto con esto, la Tabla 6.6 presenta los resultados del dimensionamiento, es decir, la cantidad de potencia instalada resultante para cada una de las tecnologías de generación consideradas para el proyecto en Pachica.

Tabla 6.6: Dimensionamiento de MG para la localidad de Pachica.

Tipo de tecnología	Potencia resultante (kW)
Solar PV	62.7
Eólica	0
Diésel	64
Baterías	349 (kWh)

Para finalizar esta etapa, se calcula el índice económico del proyecto, dado por la expresión (4.1), lo cual resulta en que:

$$I_e = 0.37$$

Lo cual, de acuerdo a los rangos definidos en la Figura 4.2, indica que el índice económico para el proyecto es 'Regular', indicando que desde el punto de vista económico, la realización de una MG en Pachica trae consigo riesgos a considerar y enfocarse, pero que estos riesgos pueden ser solventados sin mayores dificultades si son tratados con anticipación. Sin embargo, los riesgos son absolutamente esperables en proyectos a realizarse en localidades aisladas, siendo sumamente complicado la ausencia de los mismos.

6.2.7. Evaluación de impacto social

Al evaluar el impacto social que tendrá el proyecto sobre la comunidad, rápidamente se puede observar que el precio de la energía obtenido de la MG es menor al precio de la energía promedio del país, significando que la localidad tendrá acceso a la energía a un costo más económico que el promedio de habitantes del Chile, significando esto un primer beneficio a considerar.

Por otro lado, dado los resultados obtenidos en la Sección 6.2.6 se observa que, en un primer análisis, el proyecto no es totalmente conveniente para un privado pero que, sin embargo, estableciendo tarifas adecuadas en conjunto con la comunidad, esto puede cambiar a futuro, esto basado en el bajo valor del costo presente neto observado en la Tabla 6.5. Dado esto, se recomienda en primera instancia considerar una administración mixta de la MG.

Luego, al calcular el índice social, dado por la expresión (4.5) se obtiene el siguiente resultado:

$$I_s = 0.76$$

Lo cual, de acuerdo a los rangos definidos en la Figura 4.2, indica que el índice social para el proyecto es 'Muy malo', lo cual es resultado principalmente del poco empleo que se espera crear con la potencia instalada, aumentando aproximadamente en 1.18% la empleabilidad de la localidad. Así, el indicador estima que existirán problemáticas sociales en el futuro del proyecto, dado que el aporte de la MG puede no ser suficiente para los habitantes de Pachica, lo cual implica tomar medidas al respecto, ya sea, impulsando otras áreas o estableciendo una tarifa favorable para la comunidad.

6.2.8. Evaluación de impacto ambiental

Al calcular el índice ambiental, dado por la expresión (4.6) se obtiene el siguiente resultado:

$$I_a = 0.32$$

Lo cual, de acuerdo a los rangos definidos en la Figura 4.2, indica que el índice ambiental del proyecto es 'Regular', siendo el mejor índice obtenido. Los puntos positivos son el uso de poca superficie y el no uso de los recursos hídricos de la zona, sin embargo, el alto porcentaje de potencia instalada de diésel (51 % aproximadamente) provoca que el índice se considere no alcance a estar en el rango 'Bueno'. En esta etapa del proyecto, una de las pocas medidas de mitigación que se pueden tomar es la utilización de generadores con una mayor eficiencia de los promedios, que necesiten menor cantidad de diésel y que, por lo tanto, se consideren menos contaminantes del promedio.

6.2.9. Evaluación general

En primer lugar, al calcular el índice de sostenibilidad inicial del proyecto, dado por la expresión (4.7), se obtiene el siguiente resultado:

$$I_{sost} = 0.39$$

Lo cual, de acuerdo a los rangos definidos en la Figura 4.2, indica que el índice de sostenibilidad inicial del proyecto es 'Regular', bastante cerca del límite del rango 'Malo', lo cual se sostiene principalmente en el negativo resultado del índice social, el cual, a pesar de poseer un menor peso, influyó notablemente en la evaluación final realizada. Ante esto, las principales medidas a tomar en caso de querer mejorar de forma inmediata el índice es el descenso del costo de la energía en la zona, lo cual puede lograrse de todas maneras en etapas posteriores (co-construcción) que permita establecer una mejor tarifa en conjunto con la comunidad. Junto con esto, es evidente que el proyecto trae consigo un bajo aumento de la empleabilidad, con lo cual enfocar el proyecto en la generación de nuevos empleos distintos de la operación de la MG aumentaría aún más la sostenibilidad de la micro-red a instalar.

Por último, el presupuesto mínimo del proyecto corresponderá a la inversión inicial a realizar, correspondiente a 118.176 (USD). Este costo inicial, al igual que los demás costos del proyecto durante los 25 años de vida considerado se pueden observar en la Figura 6.7, donde se distinguen también los costos de reemplazo y el costo residual de los equipos al final del periodo.

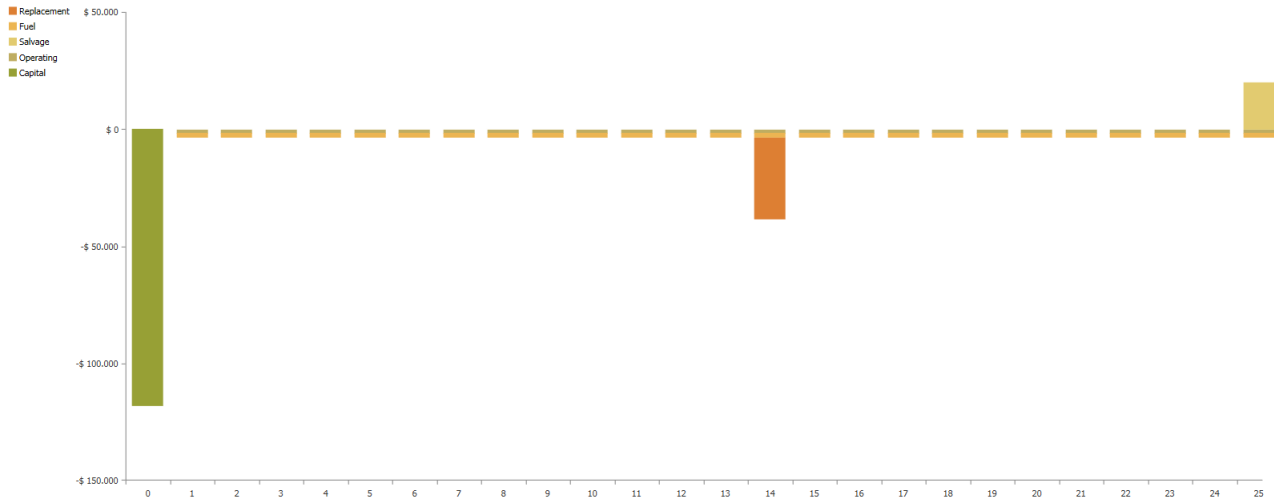


Figura 6.7: Flujo de caja para proyecto de MG en Pachica.

6.3. Caso argentino

6.3.1. Identificación de necesidades energéticas y estimación y proyección de la demanda

Para la obtención de la demanda de cada localidad se utiliza el dato de la cantidad de habitantes de Acoyte, con lo cual se aproximan viviendas y habitantes en el resto de localidades. La Tabla 6.7 presenta la cantidad aproximada de viviendas y habitantes en las 3 localidades de estudio, donde los datos son obtenidos en base al Censo 2001 [40] y aproximaciones.

Tabla 6.7: Viviendas y habitantes en las localidades de estudio de Argentina.

Localidad	Viviendas	Habitantes
San Felipe	6	26
Acoyte	26	111
Chorro	12	51

Así, se observa en primer lugar el perfil de demanda anual obtenido para la localidad de San Felipe, el cual se observa en la Figura 6.8, distinguiéndose un aumento de la demanda en época de invierno.

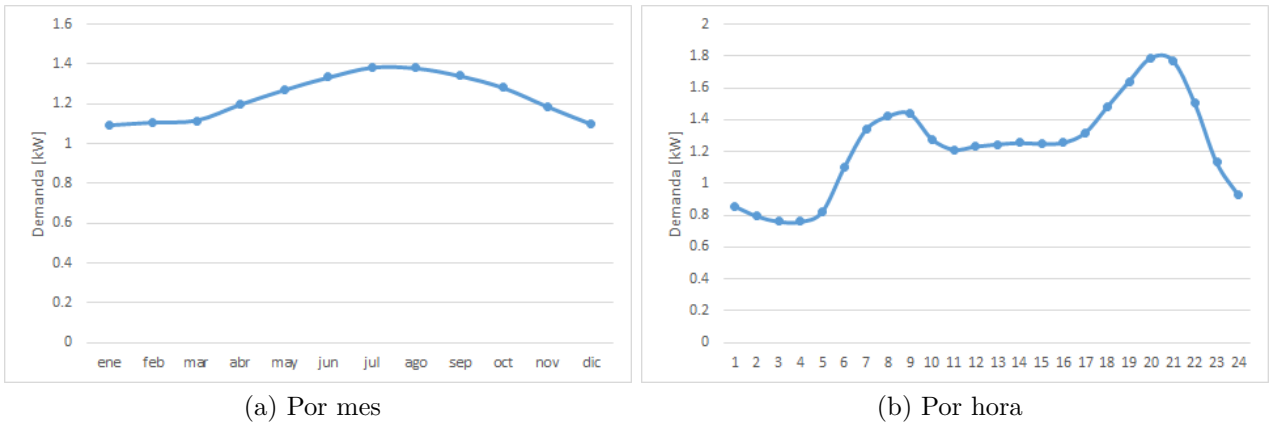


Figura 6.8: Demanda estimada para San Felipe

De la misma forma, la Figura 6.9 y la Figura 6.10 presentan los perfiles de demanda anual para las localidades de Acoyte y Chorro, respectivamente, donde se presenta un comportamiento similar, y siendo Acoyte la que presenta mayor demanda, presentando esta última perfiles de demanda comercial.

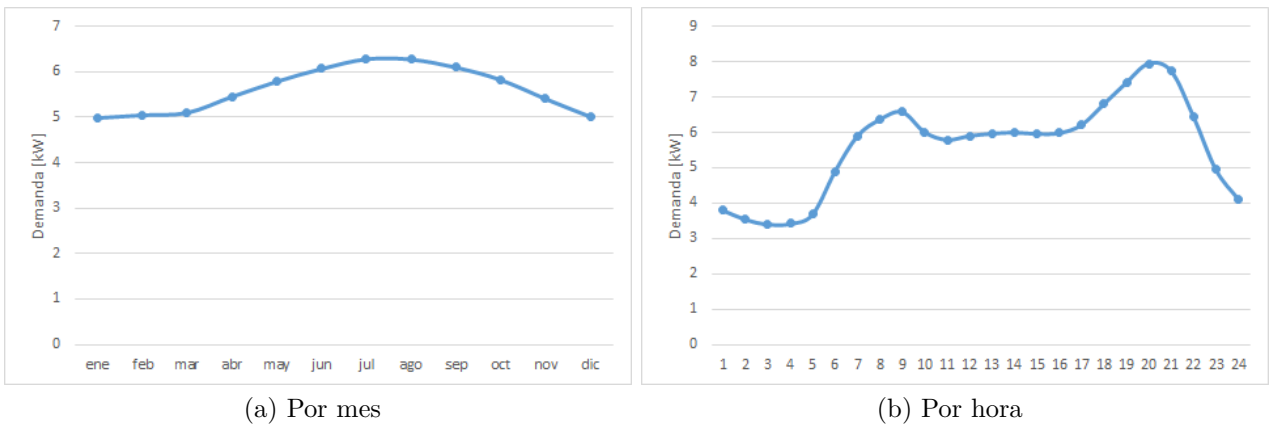


Figura 6.9: Demanda estimada para Acoyte.

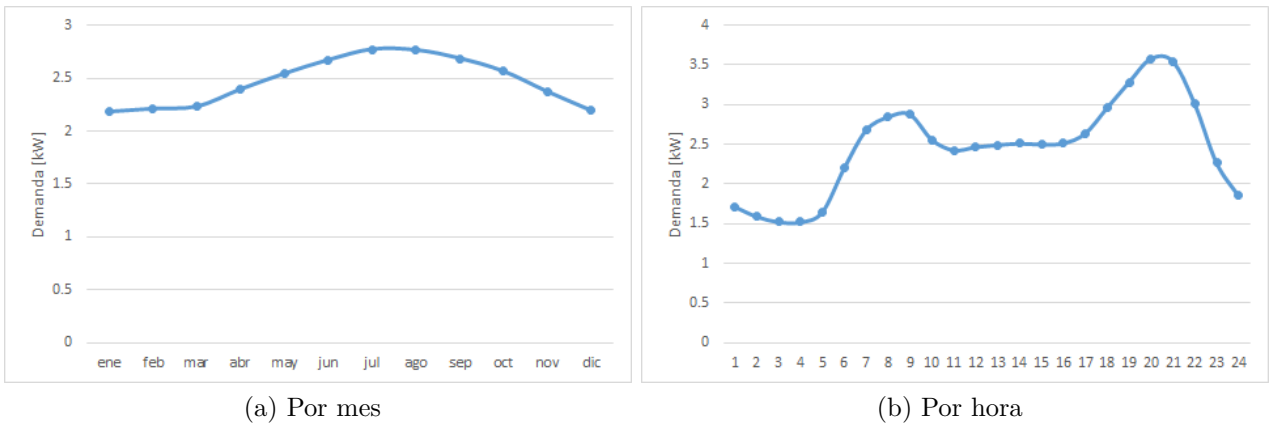


Figura 6.10: Demanda estimada para Chorro.

Por último, la Figura 6.11 presenta el perfil horario de toda la región en estudio, esto es, la suma de los tres perfiles antes vistos.

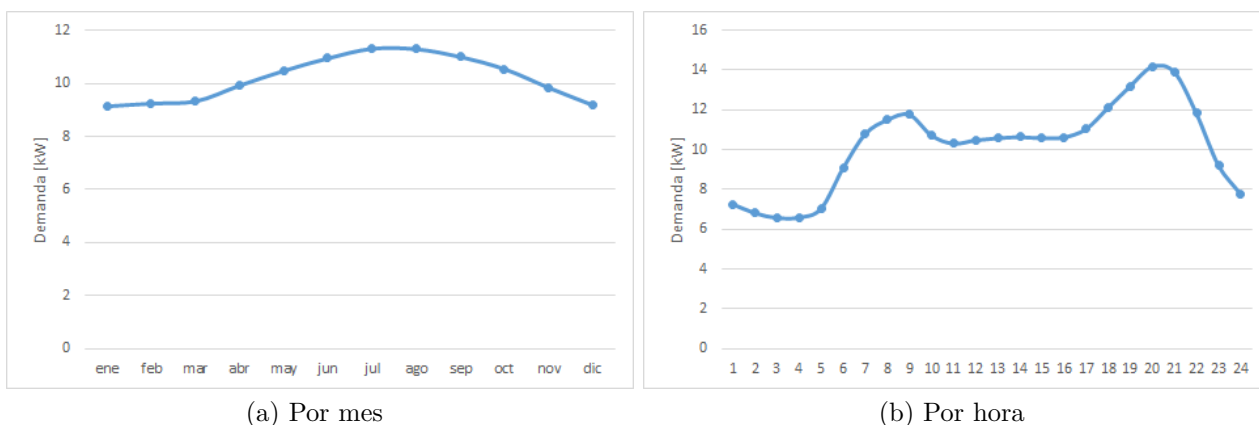


Figura 6.11: Demanda estimada para toda la región en estudio.

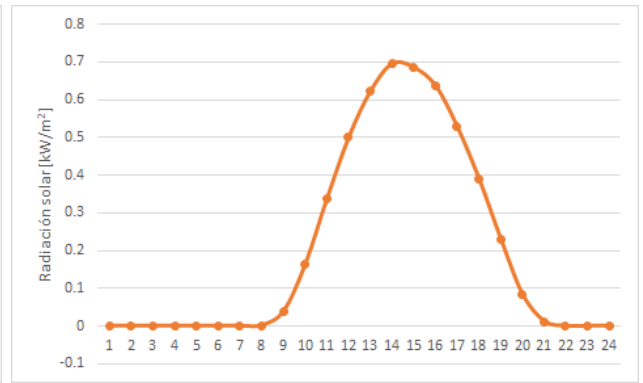
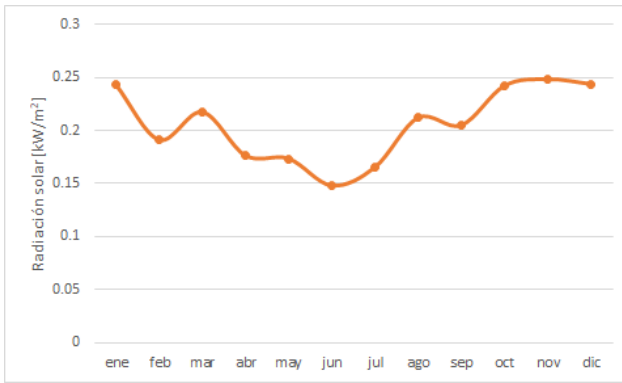
Junto con esto, se estiman desde distintas fuentes la empleabilidad [41] (para Salta), la superficie utilizable y el precio de la energía del país [42]. Los resultados se observan en la Tabla 6.8.

Tabla 6.8: Empleabilidad, superficie y precio de la energía en casos de estudio de Argentina.

Localidad	Empleabilidad estimada (%)	Superficie estimada (km^2)	Precio de la energía (USD/kWh)
San Felipe	41.9	0.11	0.052
Acoyte	41.9	0.15	0.052
Chorro	41.9	0.32	0.052
Total	41.9	0.58	0.052

6.3.2. Estimación de recursos renovables

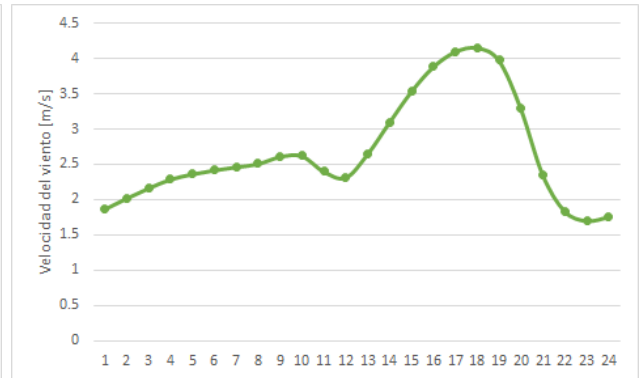
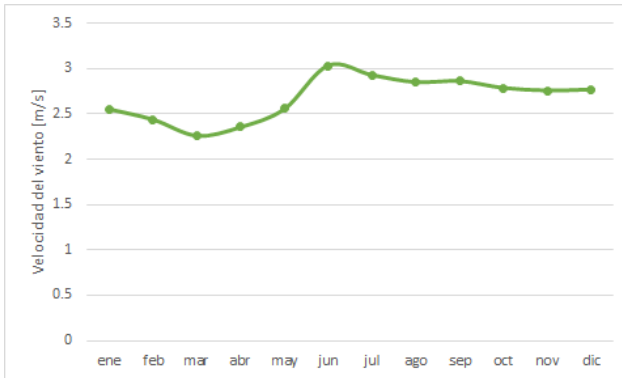
Tal y como se mencionó en la Sección 5.3.2, para este caso se considerarán como recursos renovables únicamente el recurso solar y eólico, dado la dificultad adicional de considerar el recurso hídrico en las condiciones de sequía actuales. Así, los resultados de radiación y viento para San Felipe se observan en la Figura 6.12 y la Figura 6.13 respectivamente, los resultados para Acoyte en la Figura 6.14 y la Figura 6.15 y los resultados para Chorro en la Figura 6.16 y la Figura 6.17.



(a) Por mes

(b) Por hora

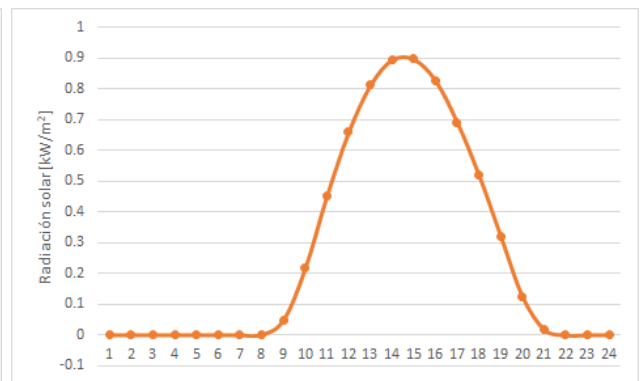
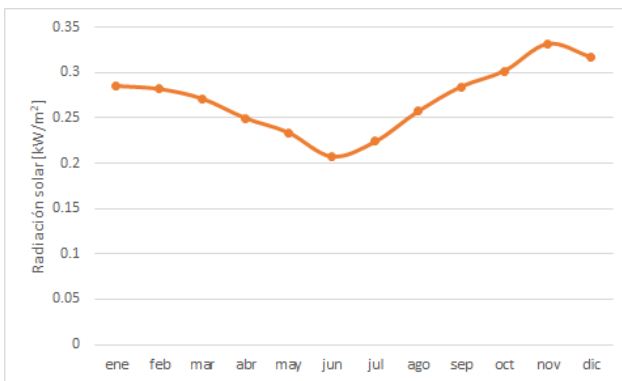
Figura 6.12: Perfiles de radiación para San Felipe.



(a) Por mes

(b) Por hora

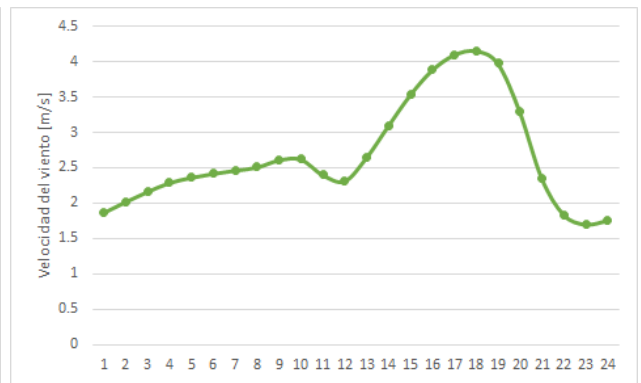
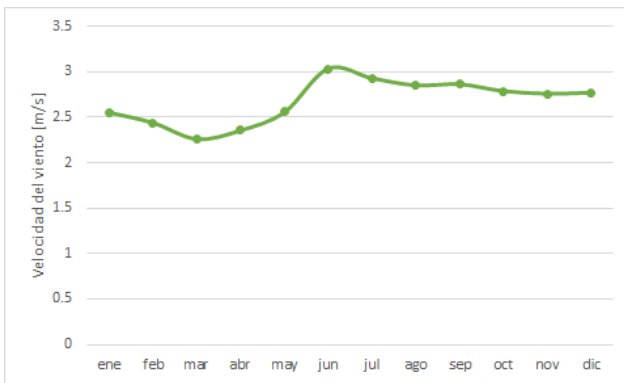
Figura 6.13: Perfiles de viento para San Felipe.



(a) Por mes

(b) Por hora

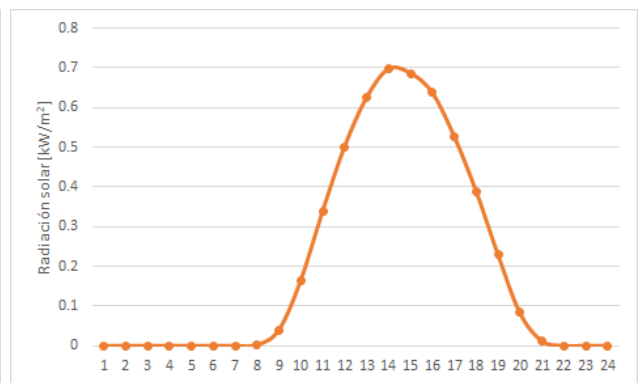
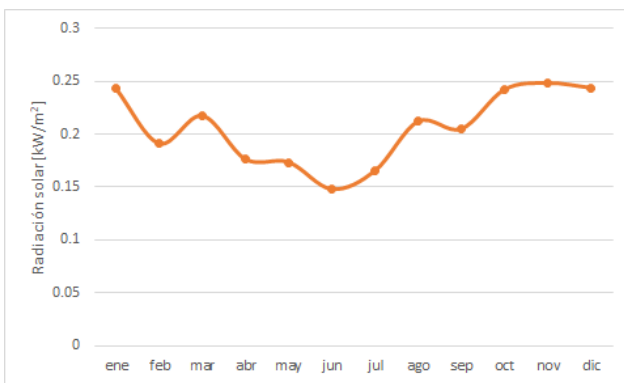
Figura 6.14: Perfiles de radiación para Acoyte.



(a) Por mes

(b) Por hora

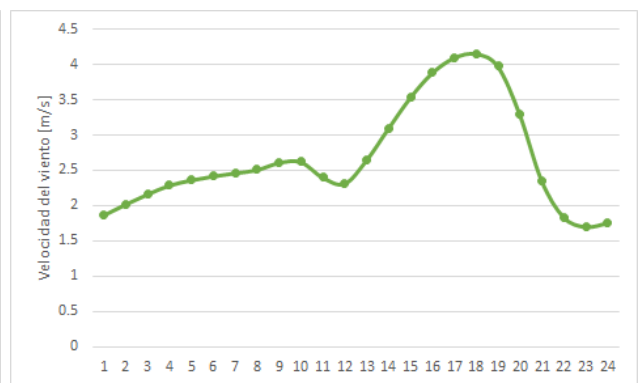
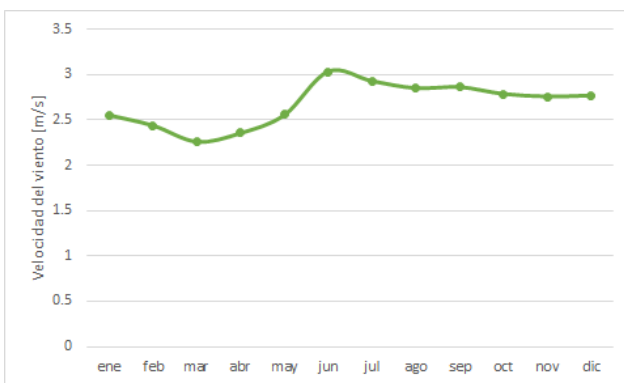
Figura 6.15: Perfiles de viento para Acoyte.



(a) Por mes

(b) Por hora

Figura 6.16: Perfiles de radiación para Chorro.



(a) Por mes

(b) Por hora

Figura 6.17: Perfiles de viento para Chorro.

6.3.3. Estimación de costos de tecnologías

Tal y como se menciona en la Sección 5.3.3, se recolectan desde distintas fuentes los costos de las posibles tecnologías a utilizar en el proyecto, utilizando los valores del caso chileno para los datos no obtenidos. Los resultados obtenidos se observan en la Tabla 6.9.

Junto con lo anterior, se presentan en la Tabla 6.10 los costos máximos de tecnologías para Argentina, donde los datos no obtenidos directamente desde la bibliografía se estiman de acuerdo a las expresiones (4.2) y (4.3).

Tabla 6.9: Costos de tecnologías de generación en Argentina.

Tipo de tecnología	Costo de inversión (USD/kW)	Costo de O&M (USD/kW/año)
Solar PV	950	9.5
Eólica	1100	11
Biomasa	3170	31.7
Gas Natural	1200	24
Diésel	500	5
Hidroeléctrica pequeña escala	3263	32.63
Baterías	150 (USD/kWh)	1.5

Tabla 6.10: Costos máximos de tecnologías de generación en Argentina.

Tipo de tecnología	Costo máximo de inversión (USD/kW)	Costo máximo de O&M (USD/kW)
Solar PV	2668	27.17
Eólica	1400	31.46
Diésel	1430	14.3
Baterías	429	4.29

6.3.4. Evaluación del estado inicial de la red

Como se menciona en la Sección 5.3.4, no existían al año 2018 redes eléctricas en las localidades en estudio, con lo cual, se asume la no existencia de las mismas y se establece una red desde cero.

6.3.5. Estudio de configuración óptima

Se presentan a continuación de forma separada los resultados obtenidos para el caso de las 3 localidades con MG diseñadas individualmente y el caso con una sola MG regional que cubra la zona.

6.3.6. Caso MG locales

6.3.6.1. Dimensionamiento de la MG

Al ingresar los datos para la localidad aislada de San Felipe en Homer Pro, se obtienen como principales resultados económicos los observables en la Tabla 6.11. Por otro lado, la Tabla 6.12 muestra el dimensionamiento obtenido para la localidad antes nombrada, estableciendo la potencia de cada tipo de tecnología.

Tabla 6.11: Resultados económicos de la MG local en San Felipe.

Costo Presente Neto	33.704 (USD)
Costo de inversión	24.626 (USD)
Costo de O&M	273 (USD/año)
Costo de la energía	0.241 (USD/kWh)

Tabla 6.12: Dimensionamiento de la MG local en San Felipe.

Tipo de tecnología	Potencia resultante (kW)
Solar PV	17.9
Eólica	0
Diésel	2.4
Baterías	38 (kWh)

Así, con estos datos se calcula el índice económico del proyecto de la localidad de San Felipe, dado por la expresión (4.1), lo cual resulta en que:

$$I_{eSF} = 0.34$$

Lo cual, de acuerdo a los rangos definidos en la Figura 4.2, indica que el índice económico para el proyecto es 'Regular', bastante cercano a la etiqueta de 'Bueno', lo cual indica que el proyecto trae consigo una cantidad considerable de riesgos, pero que es un proyecto factible, con riesgos que se pueden solventar si son tratados con anticipación. Así, en general no se podría considerar el ámbito económico como un problema para este proyecto.

Posterior a esto, al repetir el proceso de ingreso de datos para la localidad de Acoyte, se obtienen los resultados económicos que se presentan en la Tabla 6.13 y el dimensionamiento observable en la Tabla 6.14.

Tabla 6.13: Resultados económicos de la MG local en Acoyte.

Costo Presente Neto	130.683 (USD)
Costo de inversión	94.436 (USD)
Costo de O&M	1.038 (USD/año)
Costo de la energía	0.205 (USD/kWh)

Tabla 6.14: Dimensionamiento de la MG local en Acoyte.

Tipo de tecnología	Potencia resultante (kW)
Solar PV	66.7
Eólica	0
Diésel	11
Baterías	150 (kWh)

Luego, con estos datos se calcula el índice económico del proyecto de la localidad de Acoyte, dado por la expresión (4.1), lo cual resulta en que:

$$I_{eA} = 0.34$$

Lo cual, de acuerdo a los rangos definidos en la Figura 4.2, indica que nuevamente el índice económico para el proyecto es 'Regular', indicando que el proyecto trae consigo una cantidad considerable de riesgos a resolver, pero que es un proyecto factible desde el punto de vista económico.

Por último, se repite una vez más el proceso con la última localidad en estudio, Chorro. Los principales resultados económicos obtenidos se observan en la Tabla 6.15, y el dimensionamiento obtenido para la comunidad en la Tabla 6.16.

Tabla 6.15: Resultados económicos de la MG local en Chorro.

Costo Presente Neto	67.181 (USD)
Costo de inversión	49.056 (USD)
Costo de O&M	546 (USD/año)
Costo de la energía	0.241 (USD/kWh)

Tabla 6.16: Dimensionamiento de la MG local en Chorro.

Tipo de tecnología	Potencia resultante (kW)
Solar PV	35.7
Eólica	0
Diésel	4.8
Baterías	76 (kWh)

Luego, con estos datos se calcula el índice económico del proyecto de la localidad de Chorro, dado por la expresión (4.1), lo cual resulta en que:

$$I_{eC} = 0.34$$

Lo cual, de acuerdo a los rangos definidos en la Figura 4.2, indica que una vez más el índice económico para el proyecto es 'Regular', siendo este un proyecto trae consigo una cantidad considerable de riesgos a resolver, pero que es un proyecto factible desde el punto de vista económico. Así, las 3 MG locales son económicamente viables.

Una vez obtenidas las 3 MG locales aisladas, se suman los costos y potencias, además de promediar el costo de la energía para obtener resultados finales que sirvan también como punto de comparación con el caso regional más adelante. Los resultados obtenidos se observan en la Tabla 6.17 y la Tabla 6.18.

Tabla 6.17: Resultados económicos de las MG locales en conjunto.

Costo Presente Neto	231.568 (USD)
Costo de inversión	168.118 (USD)
Costo de O&M	1.857 (USD/año)
Costo de la energía	0.229 (USD/kWh)

Tabla 6.18: Dimensionamiento de las MG locales en conjunto.

Tipo de tecnología	Potencia resultante (kW)
Solar PV	120.3
Eólica	0
Diésel	18.2
Baterías	264 (kWh)

6.3.6.2. Evaluación de impacto social

Al evaluar los primeros impactos del proyecto sobre la comunidad, se puede ver que el precio de la energía obtenido por las distintas MG locales es bastante superior al precio de la energía promedio de Argentina, lo cual constituye un problema para los habitantes de las localidades en caso de realizarse el proyecto.

Por otro lado, de acuerdo a lo obtenido en la Sección 6.3.6.1, se observan bajos costos presentes netos para las 3 MG individuales, lo cual indica que es un proyecto atribuible a un privado. De todas formas, se recomienda incluir a las comunidades en la administración de las MG, para aumentar su sostenibilidad en el futuro.

Luego, mediante los resultados obtenidos principalmente del dimensionamiento, se pueden calcular los índices sociales para las 3 micro-redes en estudio:

$$I_{sSF} = 1$$

$$I_{sA} = 0.99$$

$$I_{sC} = 1$$

Donde los 3 índices, de acuerdo a los rangos definidos en la Figura 4.2 caen en la etiqueta de 'Muy Malo', dos de ellos con la peor calificación posible, indicando que estos proyectos traen consigo grandes problemáticas sociales que deben ser consideradas en etapas futuras (co-construcción). Este mal índice se debe al bajo costo promedio de la energía de Argentina (0.052 USD/kWh), además de la poca cantidad de empleos generados por los proyectos. Esto indica que en un futuro se debe tomar muy en cuenta la tarificación de la zona y probablemente el impulso de otras actividades que generen empleo.

6.3.6.3. Evaluación de impacto ambiental

Con los datos obtenidos principalmente del dimensionamiento, se calcula directamente el índice ambiental para cada uno de los casos en estudio:

$$I_{aSF} = 0.07$$

$$I_{aA} = 0.09$$

$$I_{aC} = 0.07$$

Lo cual, de acuerdo a los rangos definidos en la Figura 4.2, indica que los índices ambientales para los 3 proyectos son 'Muy Buenos', indicando que son proyectos sumamente verdes que no necesitarían mayores cambios para ser aprobados medioambientalmente, esto debido a que no se usa el recurso hídrico, a que se ocupa poca superficie y el porcentaje de diésel ocupado con respecto a la potencia total instalada es bajo tanto para San Felipe, como para Acoyte, como para Chorro (12 %, 14 % y 12 % respectivamente).

6.3.7. Caso MG regional

6.3.7.1. Dimensionamiento de la MG

Para el caso regional se deben tener en cuenta también los datos observados en la Tabla 6.19, dado que este caso debe considerar la adición de líneas de transmisión de media tensión [43] (66 kV en este caso) y transformadores [44] para aquellas líneas.

Tabla 6.19: Costos de transformadores y líneas a considerar.

Costo de inversión transformador	8361 (USD)
Costo de O&M transformador	227 (USD/año)
Costo de inversión línea de transmisión	5223 (USD/km)
Costo de O&M línea de transmisión	157 (USD/km/año)

Estos datos, junto con los obtenidos anteriormente para las 3 comunidades, son ingresados en Homer Pro de acuerdo a lo indicado en la Sección 5.3.7.1, obteniendo los resultados económicos que se presentan en la Tabla 6.20 y el dimensionamiento presente en la Tabla 6.21.

Tabla 6.20: Resultados económicos de la MG regional en Argentina.

Costo Presente Neto	380.804 (USD)
Costo de inversión	294.559 (USD)
Costo de O&M	3.529 (USD/año)
Costo de la energía	0.330

Tabla 6.21: Dimensionamiento de la MG regional en Argentina.

Tipo de tecnología	Potencia resultante (kW)
Solar PV	121
Eólica	0
Diésel	19
Baterías	268 (kWh)

Con estos resultados, se calcula el índice económico del caso regional de acuerdo a lo señalado en la expresión (4.1), dando como resultado:

$$I_{eR} = 0.60$$

Lo cual, de acuerdo a los rangos definidos en la Figura 4.2, indica que el índice económico regional está justo en el límite entre 'Malo' y 'Muy Malo', indicando que el proyecto trae consigo serios riesgos económicos en caso de ser realizado, lo cual se debe a que los 3 cocientes de la expresión (4.1) dan un número superior a 0.6, siendo de suma importancia el cociente obtenido para el caso de la OM de la red, el cual da como resultado 0.75. Este cambio se debe principalmente a la inclusión de los transformadores y líneas de transmisión de media tensión en la red, componentes que tienen un precio elevado y que traen como consecuencia la obtención de este índice deficiente.

6.3.7.2. Evaluación de impacto social

Al igual que en caso de la MG locales, se observa que, dado el bajo costo promedio de la energía en Argentina, el costo de la energía de la MG resultante es mayor a este costo promedio, lo cual puede ser un problema a la hora de tratar con las comunidades que componen la red. Por otro lado, tampoco se observa un gran aumento del empleo.

Analizando la administración de esta red, se observa de los resultados anteriores que económicamente es un proyecto que difícilmente puede ser atribuido a un privado, con lo cual la mejor opción sería optar a que sea un proyecto público manejado por la comunidad.

Luego, mediante los resultados obtenidos principalmente del dimensionamiento, se calcula el índice social de acuerdo a la expresión (4.4):

$$I_{sR} = 1$$

Lo cual, de acuerdo a los rangos definidos en la Figura 4.2, indica que el índice social regional es 'Muy Malo', lo cual era esperable dado lo mencionado anteriormente en esta sección, y dado el poco empleo generado. Esto indica que en caso de realizarse el proyecto, es altamente probable que existan conflictos sociales que deban solucionarse, ya sea, estableciendo una tarifa conveniente para la comunidad, aumentando el empleo en otras áreas, entre otras posibles soluciones.

6.3.7.3. Evaluación de impacto ambiental

Por último, con los datos obtenidos del dimensionamiento se obtiene también el índice de impacto ambiental regional de acuerdo a la expresión (4.5):

$$I_{aR} = 0.08$$

Lo cual, de acuerdo a los rangos definidos en la Figura 4.2, indica que el índice ambiental para este caso también es 'Muy Bueno', esto debido al poco diésel utilizado (14 % aproximadamente), al no uso del recurso hídrico y a la poca superficie utilizada. Dicho esto, para este caso, el aspecto ambiental no debería traer problemas en caso del desarrollo del proyecto.

6.3.8. Evaluación y elección del caso óptimo

Para evaluar el caso óptimo, se calculan los distintos índices de sostenibilidad. En primer lugar, se calculan los índices de sostenibilidad para las MG locales de acuerdo a lo indicado en la expresión (4.6), lo cual resulta en:

$$I_{sostSF} = 0.32$$

$$I_{sostA} = 0.33$$

$$I_{sostC} = 0.33$$

Con lo cual, se calcula el índice de sostenibilidad global para este caso de acuerdo a la expresión (4.7):

$$I_{sostG} = 0.33$$

Por otro lado, el índice de sostenibilidad regional da como resultado:

$$I_{sostR} = 0.49$$

Así, a partir de la comparación de estos dos índices, se determina que el caso óptimo para la región en estudio es la construcción de 3 MG locales independientes.

6.3.9. Evaluación general

A partir de la sección anterior se obtiene un índice de sostenibilidad de 0.33 para el caso escogido, correspondiente al caso con MG locales.

Lo cual, de acuerdo a los rangos definidos en la Figura 4.2, indica que un índice de sostenibilidad que cae en la etiqueta de 'Regular', donde principalmente el mal índice social es que no le permite llegar a la categoría de 'Bueno'. Aún así, el índice obtenido permite estimar una sostenibilidad media de los proyectos, tanto en conjunto como por separado, volviendo factible la construcción y operación de estas MG locales. Aún así, dado el pobre índice social obtenido, se recomienda trabajar en conjunto con la población en la etapa posterior al diseño (co-construcción) de forma de aumentar el nivel de sostenibilidad del proyecto mediante la búsqueda de soluciones en conjunto.

Finalmente, se tiene que el presupuesto mínimo para realizar los 3 proyectos es de 168.118 (USD), donde 24.626 (USD) corresponden a la MG de San Felipe, 94.436 (USD) a la MG de Acoyte y 49.056 (USD) a la MG ubicada en Chorro. La Figura 6.18, la Figura 6.19 y la Figura 6.20 presentan los flujos de caja de los proyectos de San Felipe, Acoyte y Chorro, respectivamente.

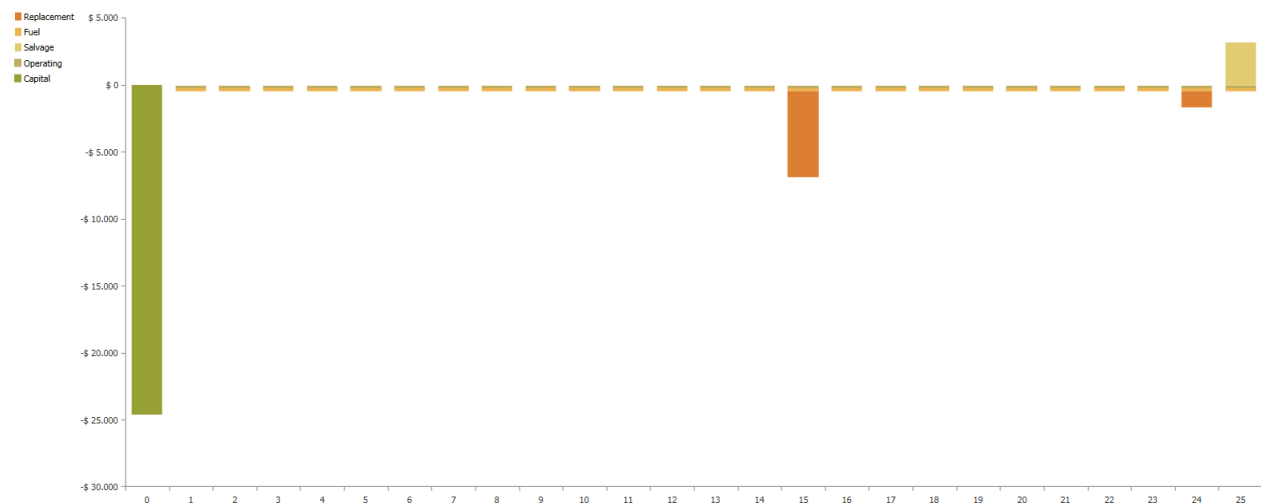


Figura 6.18: Flujo de caja para proyecto de MG en San Felipe.

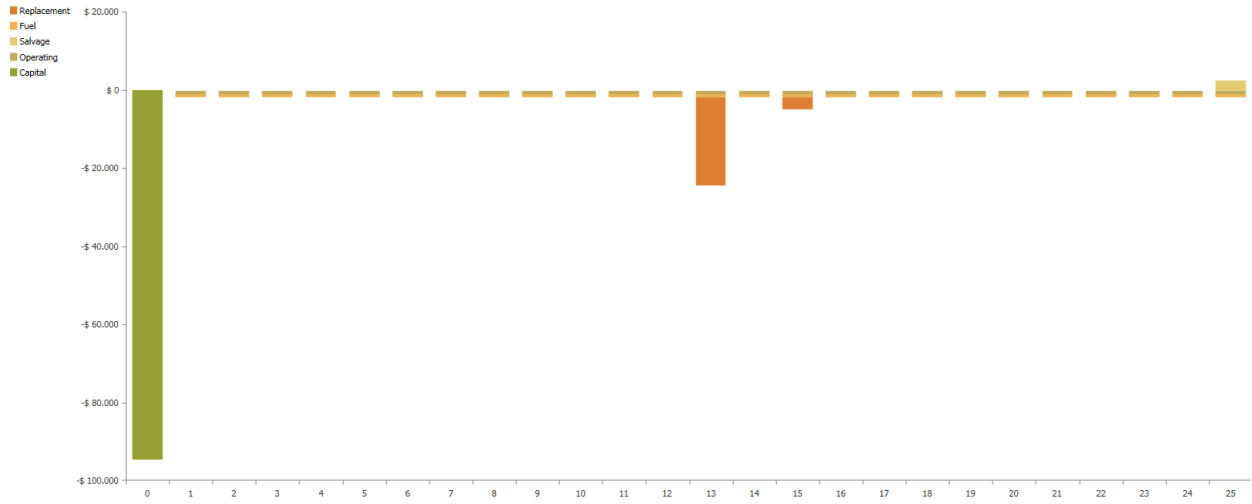


Figura 6.19: Flujo de caja para proyecto de MG en Acoyte.

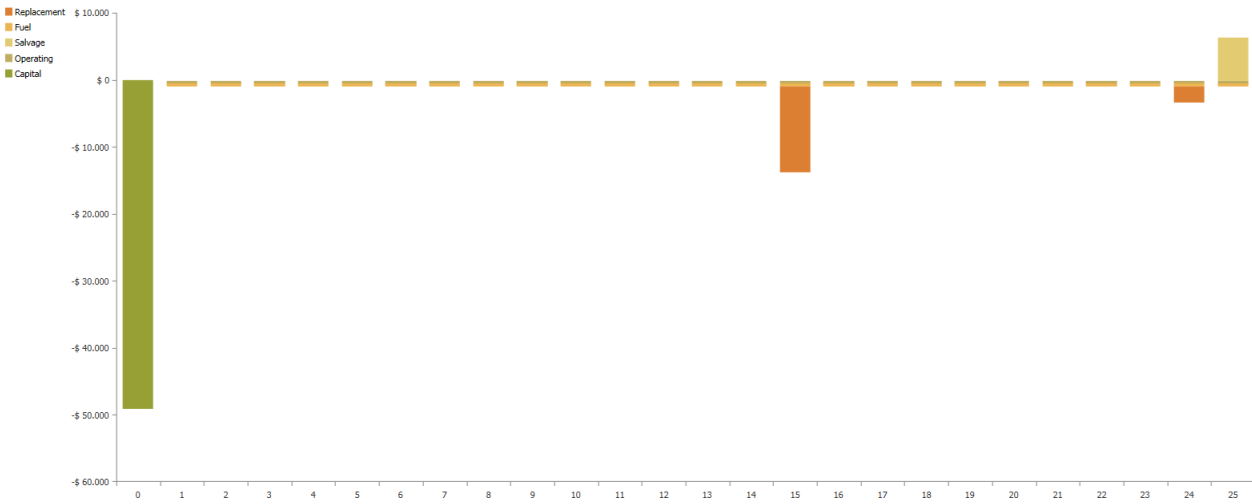


Figura 6.20: Flujo de caja para proyecto de MG en Chorro.

6.4. Análisis y discusión

A partir de los casos de estudio realizados en Chile y Argentina en la Secciones 6.2 y 6.3 respectivamente, se pueden obtener distintos análisis de interés para el presente trabajo.

En primer lugar, la realización en sí de ambos casos permite validar la metodología propuesta como una metodología de diseño de micro-redes, dado que, como resultado final de la misma, se obtuvo en ambos casos los componentes básicos de la micro-red, como lo son las tecnologías a utilizar, las capacidades de las mismas, distintos tipos de costos, y distintas variables que constituyen en sí la ingeniería básica del proyecto, el cual puede ser desarrollado en detalle en etapas posteriores al diseño aquí estudiado. Así, como resultado más importante de los casos, se obtuvo el dimensionamiento de la red y sus costos asociados.

Junto con lo anterior, se observa también mediante la realización de los casos de estudio que el resultado final se obtiene siguiendo casi exactamente los pasos a seguir, sin la necesidad de agregar etapas adicionales por cuenta propia, si no que (dejando aparte el levantamiento de antecedentes, que es una etapa que depende mucho del caso de estudio en particular) la metodología guía perfectamente el proceso de diseño hasta obtener el resultado final. Esto último, sumado al hecho de que el cálculo de índices se realiza a través de operaciones matemáticas básicas, muestra que la metodología aquí propuesta es de fácil uso y a su vez permite que la metodología pueda calificarse como una metodología de rápido uso, ya que (apartando nuevamente el levantamiento de antecedentes) no se necesitan largas simulaciones o cálculos para su aplicación, como ocurre en metodologías existentes que ocupan métodos de evaluación distintas a la evaluación con lógica difusa.

En cuanto a las 5 primeras etapas vistas en la Figura 4.1, las cuales pueden ser catalogadas como etapas de levantamiento de antecedentes, se puede ver que son etapas que dependen fuertemente del caso de estudio y de las bases de datos de las cuales se tenga acceso dado que cada país posee características únicas en términos sociales y de recursos, pero que son las etapas de mayor relevancia para el diseño de las micro-redes, esto porque los resultados obtenidos dependerán directamente de los antecedentes ingresados a los distintos software que se pueden utilizar. Así, con antecedentes más específicos, el resultado obtenido también tendrá un mayor nivel de especificidad, lo cual implica que, en el desarrollo de este trabajo, el resultado para Pachica es más específico que los obtenidos para Argentina, dado que los perfiles de demanda de estos últimos fueron estimados a partir de datos menos rigurosos que lo obtenido para Pachica con la estimación hecha en base a Huatacondo.

Por otro lado, en lo referente al dimensionamiento en sí, se observa de la Tabla 6.6, la Tabla 6.12, la Tabla 6.14, la Tabla 6.16 y la Tabla 6.21 que la energía solar fotovoltaica es la principal energía del sistema (representando en promedio aproximadamente el 80 % de la potencia instalada y un 50 % en el caso chileno en específico), seguida por la generación diésel, y finalmente la generación eólica, la cual entregó en todos los casos una potencia nula. Esta superioridad de la tecnología fotovoltaica sobre la eólica se puede explicar mediante dos principales razones: en primer lugar, se observa que el precio tanto de inversión como de OM de la tecnología eólica es superior, sin embargo, esta diferencia de costos se puede solventar dependiendo de los perfiles de radiación y de viento en la zona, con lo cual la principal explicación para el no uso de energía eólica se encuentra en sus perfiles de viento, los cuales

son bajos, considerando además que se obtiene el perfil a 10 [m] de altura debido a que era infactible la construcción de turbinas eólicas de mayor altura, como las que se observan en los grandes parques eólicos. Por el otro lado, tanto para el caso chileno como el argentino las zonas de estudio cuentan con un gran potencial solar, aumentando esta diferencia y provocando el uso de energía solar en vez de la obtenida a través del viento.

Luego, mediante el análisis de las mismas tablas antes mencionadas, se observa que el almacenamiento también juega un papel relevante en el dimensionamiento, siendo el responsable de aproximadamente el 25 % de la inversión inicial, justificándose en que estos componentes permiten mejorar la estabilidad del sistema, permitiendo, entre otras cosas, controlar de mejor manera la frecuencia de la red. Adicionalmente, tienen un beneficio económico ya que permiten almacenar energía en horas de alta producción (día) para ser utilizada en horas de menor producción de energía (noche), disminuyendo el uso de diésel y por lo tanto el costo de operación del sistema, lo cual justifica su importante presencia en el dimensionamiento. Adicionalmente, (poner porcentajes de solar y diésel).

En relación a los costos del sistema, al observar los flujos de caja de los distintos proyectos (Figura 6.7, Figura 6.18, Figura 6.19 y Figura 6.20) se observa el mismo comportamiento para cada MG, dado por un fuerte costo inicial, correspondiente a la inversión inicial, un costo a la mitad del periodo correspondiente a costos de reemplazo, un ingreso al final del periodo correspondiente al costo residual de los componentes de las redes. Adicional a esto se observan pequeños costos año a año dado por la OM de la red, los cuales son despreciables en comparación a los otros costos antes mencionados, con lo cual el gran impacto económico se produce en los 3 momentos antes señalados.

Además, mediante los casos de estudio se pudo observar la conveniencia de tener dos casos separados para cada localidad, esto es, considerar un caso local y uno regional en caso de existir varias localidades cercanas, dado que, en el caso argentino, se observa una importante diferencia en costos y en índices lo cual indica que (si bien en este caso el caso local fue ampliamente más sostenible) existen casos en que considerar una micro-red regional puede ser más sostenible. Así mismo, se pudo advertir que la conveniencia o no del caso regional tiene una relación sumamente estrecha con el costo de las líneas de transmisión y con los kilómetros que separan a las comunidades en estudio, dado que ese fue el costo clave que produjo las grandes diferencias presentes en la Sección 6.3 entre caso local y regional. Adicionalmente, se observa en la Sección 6.2 que el caso únicamente local se puede realizar sin inconvenientes.

Otro tópico a destacar dentro del caso regional es que, mediante el análisis de los perfiles de radiación y viento de las 3 localidades estudiadas en Argentina, se pueden observar pocas diferencias de comportamiento y de magnitud en los perfiles, dado la poca distancia que los separa, teniendo, por ejemplo, perfiles de velocidad de viento prácticamente iguales. Esta poca diferencia es otra de las razones por las cuales el caso con MG locales es superior al regional, ya que no existe una zona que posea una riqueza de un recurso renovable en particular.

Por último, otro punto importante a analizar son los índices obtenidos, en cuanto a su importancia y funcionamiento. Así, se observa primeramente que todos los índices se encuentran normalizados entre 0 y 1 como era de esperarse, y que todos pueden ser evaluados mediante la Figura 4.2, permitiendo un primer análisis. Es importante destacar que este modo de evaluación permitió en los distintos casos realizar análisis desagregados de los índices por dimensión, y finalmente un análisis general del índice de mayor importancia, correspondiente al índice de sostenibilidad, el que define la sostenibilidad inicial del proyecto y el caso a diseñar.

En específico, se obtuvieron índices económicos dentro de la etiqueta de 'Regular', exceptuando el caso regional argentino que dio 'Muy Malo', lo cual se debe a que los costos de inversión actuales tanto en Chile como en Argentina se parecen mucho a los costos promedios del país, tendiendo a caer en el rango 'Regular', con un promedio de índices de 0.39. Por otro lado, el índice social presentó un particular mal rendimiento, cayendo todos en la etiqueta 'Muy Malo' y con un índice promedio de 0.76 en Chile y un promedio de 1 en Argentina, debiéndose esto al mal desempeño de los ambos componentes de este índice, el aumento de los empleos y el costo de la energía, dado que, como se mencionó en los respectivos análisis de estos índices, las potencias instaladas no generaron grandes cantidades de empleo, y, en el caso particular de Argentina, el bajo costo de energía provocó que los costos de energía de la MG fueran sumamente superiores. Por último, el índice ambiental entregó resultados positivos en términos generales, siendo 'Regular' en Chile y 'Muy Bueno' para todos los casos argentinos, con un promedio menor a 0.01, lo que se debe directamente al no uso del recurso hídrico y al importante porcentaje de energías renovables utilizadas, con un promedio de 78% con respecto al total de capacidad instalada.

Todo lo anterior indica que el trabajo social junto a la comunidad será el aspecto clave en el cual enfocarse en etapas posteriores para tener un proyecto de alta sostenibilidad, lo cual no necesariamente indica una falta de sostenibilidad al nivel del primer diseño que entrega como resultado la metodología aquí propuesta. Dicho esto, y dado los componentes del índice social, es sumamente difícil obtener un buen resultado para este índice en este nivel de desarrollo, motivo por el cual también tiene un bajo peso en el índice de sostenibilidad. Con esto, el primer diseño considera de manera mucho más fuerte la parte económica, seguida por la ambiental, y es por esto que, a pesar de los malos índices sociales, Chile tiene un índice de sostenibilidad 'Regular' (0.39) al igual que Argentina (0.33).

Capítulo 7

Conclusiones

El presente trabajo propone una metodología de diseño de micro-redes eléctricas en enclaves estratégicos en Iberoamérica, los cuales son definidos como aquellas localidades aisladas, con bajo o nulo nivel de electrificación y que poseen un importante potencial energético en base al cual diseñar una red, con el objetivo de impulsar el desarrollo de las micro-redes en esta parte del mundo, facilitando su diseño. Así, se propone una metodología de 13 etapas que permita obtener el primer diseño de una micro-red en uno de estos enclaves, optimizando el diseño de la red desde el punto de vista de la sostenibilidad de la misma y del proyecto en general.

Para obtener esta metodología se estudian, en primer lugar, las principales metodologías existentes de diseño de micro-redes, lo cual se realiza en la Sección 3 mediante el estudio del estado del arte, realizando además una comparación entre estas metodologías y los objetivos del presente trabajo. La metodología propuesta se basa directamente en las metodologías ya existentes, pero son modificadas ya que ninguna por sí sola permitía cumplir con los objetivos del presente trabajo. Así, se establece una metodología de diseño básico de micro-redes con 13 etapas, las cuales se pueden agrupar en 3 grandes etapas: Levantamiento de antecedentes, elección del caso óptimo y dimensionamiento, y evaluación general.

La primera etapa corresponde a la recolección de información, la segunda aquella donde se diseña la micro-red óptima desde el punto de vista de la sostenibilidad mediante el uso de índices que evalúan el rendimiento del proyecto en distintas dimensiones, y un índice final que indica la sostenibilidad de la micro-red a diseñar, y en donde se consideran dos casos: Las MG locales, o una MG regional. Por último, en la etapa de evaluación general se evalúa el caso obtenido, obteniendo el flujo de caja del mismo, entre otras variables.

Por último, el trabajo presenta dos casos de estudio, uno en Pachica (Chile) y uno en el departamento de Santa Victoria (Argentina), donde se ejecuta la metodología paso a paso, logrando obtener el dimensionamiento y arquitectura óptima de ambas redes, los índices desagregados y el índice global de sostenibilidad del proyecto, su flujo de caja y un análisis que permite comprender los resultados obtenidos para ambos países, donde se destaca el gran uso de energía solar, de almacenamiento y el bajo uso de diésel y energía eólica, además de destacar los pobres resultados sociales obtenidos. Así, se logra validar y generalizar una metodología de diseño básico rápida y de fácil aplicación para enclaves estratégicos en la región de Iberoamérica.

Bibliografía

- [1] Ministerio de Energía, “Mapa de Vulnerabilidad Energética”, Santiago, Chile, 2019. [Online]. Available: https://energia.gob.cl/sites/default/files/documento_de_metodologia_y_resultados_0.pdf
- [2] P. Mendoza, “Clase 4: Introducción al concepto de sistemas híbridos y micro-redes”, class notes for EL7045, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Chile, Otoño 2021.
- [3] A. Di Biase, “Desarrollo Estudio Impacto Ambiental”, class notes for EL6046, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Chile, Primavera 2019.
- [4] Centro de Energía FCFM Universidad de Chile, “Micro-redes para comunidades aisladas”, Santiago, Chile, Informe Final de Ejecución, 2013.
- [5] Ubilla, K. et al, “Smart Microgrids as a Solution for Rural Electrification: Ensuring Long-Term Sustainability Through Cadastre and Business Models”, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 5, no. 4, pp. 1310-1318, 2014.
- [6] Jimenez, D. et al, “Development of a Methodology for Planning and Design of Microgrids for Rural Electrification”, 2017 CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON), pp. 1-6, 2017.
- [7] Ramirez, P. et al, “An Alpaca Fiber Processing Solution Based on Solar Energy for an Isolated Location in Chile Following a Co-construction Approach”, 2017 IEEE Mexican Humanitarian Technology Conference (MHTC), pp. 130-136, 2017.
- [8] Ramirez, P. et al, “Sustainable development through the use of solar energy for productive processes: The Ayllu Solar Project”, 2017 IEEE Global Humanitarian Technology Conference (GHTC), pp. 1-8, 2017.
- [9] Palma-Behnke, R. et al, “Lowering Electricity Access Barriers by Means of Participative Processes Applied to Microgrid Solutions: The Chilean Case”, in *Proceedings of the IEEE*, vol. 107, no. 9, pp. 1857-1871, 2019.
- [10] Llanos, J. et al, “Load estimation for microgrid planning based on a self-organizing map methodology”, *Applied Soft Computing*, vol. 53, pp. 1568-4946, 2017.
- [11] Domenech, B. et al, “Local and regional microgrid models to optimise the design of isolated electrification projects”, *Renewable Energy*, vol. 119, pp. 795-808, 2017.
- [12] J. Pulido, “Evaluación de un proyecto energético de generación distribuida desde un enfoque de sostenibilidad multidimensional, mediante la Metodología de Evaluación Comprensiva Difusa”, Universidad de los Andes, 2020.
- [13] D.J. Indices, “The Dow Jones Sustainability World Index Guide”, 2012. [Online]. Available: https://www.resolve.ngo/docs/djsi-world-guidebook_tcm1071-337244.pdf

- [14] ILO, “La inversión en energía renovables genera puestos de trabajo. La oferta de mano de obra calificada debe responder a esta necesidad”, UE, 2012. [Online]. Available: https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---ed_emp/---ifp_skills/documents/publication/wcms_180631.pdf
- [15] ILO, “Hacia el desarrollo sostenible: Oportunidades de trabajo decente e inclusión social en una economía verde”, 2012. [Online]. Available: https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---dgreports/---dcomm/---publ/documents/publication/wcms_181392.pdf
- [16] Eurostat, “Electricity and heat statistics”, UE, 2021. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Electricity_and_heat_statistics
- [17] L. Hoyos, B. Ruiz, P. Mendoza, “A multicriteria methodology for prioritisation of social projects and community participation: Nariño study case”, *International Journal of Sustainable Energy*, vol. 40, pp. 1-20, 2021.
- [18] Y. Li, Z. Sun, L. Han, and N. Mei, “Fuzzy Comprehensive Evaluation Method for Energy Management Systems Based on an Internet of Things”, in *IEEE Access*, vol. 5, pp. 21312-21322, 2017.
- [19] Fundación Desierto de Atacama, “Acerca de Huatacondo”, Santiago, Chile, 2022. [Online]. Available: <https://www.fundaciondesiertoatacama.cl/acerca-de-huatacondo/>
- [20] INE, “Resultados CENSO 2017”, Santiago, 2017. [Online]. Available: <http://www.censo2017.cl/>
- [21] Ministerio de Energía, “Explorador Solar”, Santiago, Chile, 2022. [Online]. Available: <https://solar.minenergia.cl/inicio>
- [22] Ministerio de Energía, “Explorador Eólico”, Santiago, Chile, 2022. [Online]. Available: <https://eolico.minenergia.cl/inicio>
- [23] CNE, “Informe de costos de tecnologías de generación”, Santiago, Chile, 2020. [Online]. Available: <https://www.cne.cl/wp-content/uploads/2020/03/ICTG-Marzo-2020.pdf>
- [24] CNE, “EnergiaMaps”, Santiago, Chile, 2022. [Online]. Available: <https://energiamaps.cne.cl/>
- [25] CGE, “Portal PMGD-Netbilling”, Santiago, Chile, 2022. [Online]. Available: <https://plataformagdypmgd.cge.cl/>
- [26] NREL, “REopt Lite”, USA, 2022. [Online]. Available: <https://reopt.nrel.gov/tool>
- [27] NASA, “POWER Data Access Viewer”, Washington D.C., USA, 2022. [Online]. Available: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- [28] L. García, M. Pakikh, R. Manghani, “Evolución futura de costos de las energías renovables y almacenamiento en América Latina”, BID, Washington D.C., USA, 2019.
- [29] BNamericas, “El costo de la generación de ciclo combinado en América Latina”, 2018. [Online]. Available: <https://www.bnamericas.com/es/noticias/el-coste-de-la-generacion-de-ciclo-combinado-en-america-latina>
- [30] Ministerio de Energía y Minería, “Redes de distribución eléctrica del Consejo Federal - Salta - Alta Tensión - Media Tensión Líneas”, Buenos Aires, Argentina, 2018.

- [31] J. Fernández, “Estudio de pérdidas técnicas en las redes eléctricas de distribución”, Universidad Carlos III de Madrid, 2017.
- [32] Secretaría de Energía, “Índice de pobreza multidimensional”, Buenos Aires, Argentina, 2017. [Online]. Available: <https://www.argentina.gob.ar/economia/energia/informacion-geografica-energia/indice-pobreza-multidimensional>
- [33] R. Durán, M. Condorí, “Índice multidimensional de la pobreza energético para Argentina: Su definición, evaluación y resultados al nivel de departamentos para el año 2010”, Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente, vol 4, pp. 27-38, 2010.
- [34] Identidad y Futuro, “Fiestas Religiosas Populares en Chile”, Santiago, Chile, 2022. [Online]. Available: <https://identidadyfuturo.cl/2014/05/03/fiestas-religiosas-populares-de-chile/>
- [35] INE, “Ocupación y desocupación”, Santiago, Chile, 2017. [Online]. Available: <https://www.ine.cl/estadisticas/sociales/mercado-laboral/ocupacion-y-desocupacion>
- [36] Global Petrol Prices, “Chile precios de la electricidad”, 2022. [Online]. Available: https://es.globalpetrolprices.com/Chile/electricity_prices/
- [37] F. Donoso, V. Garay, J. Cantallopts, “Mercado internacional del litio y su potencial en Chile”, Cochilco, Santiago, Chile, 2018. [Online]. Available: <https://www.cochilco.cl/Mercado%20de%20Metales/Informe%20Litio%209%2001%202019.pdf>
- [38] Ministerio de Energía, “Índice de precios de sistemas fotovoltaicos conectados a la red de distribución comercializados en Chile 2019”, Santiago, Chile, 2020.
- [39] J. Moreno, S. Mocarquer, H. Rudnick, “Generación Eólica en Chile: Análisis del Entorno y Perspectivas de Desarrollo”, Systep, Santiago, Chile, 2010.
- [40] Indec, “Censo 2001”, Buenos Aires, Argentina, 2001. [Online]. Available: <https://www.indec.gob.ar/indec/web/Nivel4-Tema-2-41-134>
- [41] Indec, “Mercado de trabajo: Principales indicadores (EPH), total urbano.Tercer trimestre 2019”, Buenos Aires, Argentina, 2019.
- [42] Global Petrol Prices, “Argentina precios de la electricidad”, 2022. [Online]. Available: https://es.globalpetrolprices.com/Argentina/electricity_prices/
- [43] S. Campos, “Metodología de cálculo de valores de inversión para sistemas de subtransmisión”, Santiago, Chile, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2011.
- [44] Generador de precios, “Transformador en baño de aceite”, Alicante, España, 2022. [Online]. Available: http://www.chile.generadordeprecios.info/espacios_urbanos/Instalaciones/Urbanas/Centros_de_transformacion/Transformador_en_bano_de_aceite_0_6.html
- [45] Madduri, P. et al, “Scalable DC Microgrids for Rural Electrification in Emerging Regions”, in IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 4, no. 4, pp. 1195-1205, 2016.
- [46] Eroshenko S.A., “Renewable Energy Sources for Perspective Industrial Clusters Development”, 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), pp. 1-5, 2016.