

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**PONTIFICIA  
UNIVERSIDAD  
CATÓLICA  
DEL PERÚ**

**OPTIMIZACIÓN DEL DIMENSIONAMIENTO DE UN SISTEMA  
HÍBRIDO DE GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD QUE USA  
FUENTES DE ENERGÍA RENOVABLES PARA ABASTECER  
LA DEMANDA DE HOGARES AGROPECUARIOS EN LOMO  
DE CORVINA USANDO UN MODELO DE PROGRAMACIÓN LINEAL**

Tesis para optar el Título de Ingeniero Industrial, que presenta el bachiller:

**Alfonso Angel Medina Santana**

**ASESOR: Mg. Eduardo Carbajal López**

Lima, junio de 2017

## RESUMEN

El presente estudio tiene por finalidad desarrollar un modelo de Programación Lineal Entera Mixta que permita dimensionar sistemas híbridos de generación de electricidad a base de fuentes de energías renovables tomando en cuenta consideraciones como: el área máxima permitida por tipo de tecnología a usar, costos fijos y variables de los módulos a usar, parámetros meteorológicos, etc. Todo ello, con el fin de minimizar sus costos.

El modelo es aplicado para dimensionar un sistema domiciliario para los hogares de Lomo de Corvina. Los pobladores de esta zona tienen diferentes problemas como la carencia de energía eléctrica, carencia de agua, viviendas inadecuadas y falta de seguridad. Estos problemas se cuantificaron y priorizaron con base a la información recolectada y usando un conjunto de herramientas como: diagrama de Ishikawa, diagrama de Pareto, matriz FACTIS y el análisis *why why*, lo que permitió reconocer que su principal problema era la carencia de electricidad y la mejor alternativa de solución era el uso de fuentes de energía renovables justificando que el modelo resulta útil para ser aplicado en esta población.

Habiendo obtenido el costo de implementar un sistema híbrido para cada hogar se calcula el indicador económico LCE que es el precio al cual se generaría la electricidad resultando de 0.22 \$/kW-h. Asimismo, se calcula el VAN de un proyecto con intereses humanitarios para instalar sistemas híbridos a 120 hogares en Lomo de Corvina obteniendo un VAN de S/ 12 cobrándoles a los ciudadanos una cuota por hogar de S/ 6 y requiriendo un subsidio de parte del estado de S/ 5103 por cada hogar.

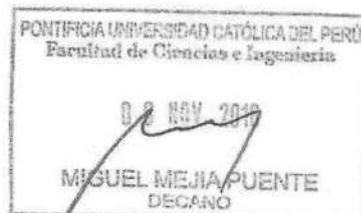
La propuesta también tiene beneficios sociales y ambientales. Así, para cada hogar se espera un incremento en las horas de estudio, acceso a radio y televisión y un aprovechamiento de la iluminación cuyo beneficio económico mensual se estima en S/ 69.12, S/ 9.52 y S/ 45.68 respectivamente. Asimismo, electrificar los 120 hogares usando la propuesta señalada no implica la emisión de CO<sub>2</sub> mientras que si se usara un grupo electrógeno, que es la energía convencional más usada en estos casos, las emisiones a lo largo de 20 años corresponden a 419.2 toneladas lo que indica el impacto ambiental negativo en el que se está dejando de incurrir.



PONTIFICIA  
**UNIVERSIDAD  
CATÓLICA**  
DEL PERÚ

### TEMA DE TESIS

PARA OPTAR : Título de Ingeniero Industrial  
ALUMNO : **ALFONSO ÁNGEL MEDINA SANTANA**  
CÓDIGO : 2010.1509.12  
PROPUESTO POR : Ing. Alfonso Á. Medina Santana  
ASESOR : Ing. Eduardo Carbajal López  
TEMA : OPTIMIZACIÓN DEL DIMENSIONAMIENTO DE UN SISTEMA HÍBRIDO DE GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD QUE USA FUENTES DE ENERGÍA RENOVABLES PARA ABASTECER LA DEMANDA DE HOGARES AGROPECUARIOS EN LOMO DE CORVINA USANDO UN MODELO DE PROGRAMACIÓN LINEAL.  
N° TEMA : # 1351  
FECHA : San Miguel, 04 de noviembre de 2016



### **JUSTIFICACIÓN:**

La electricidad es una de las principales formas de energía usadas en el mundo actual. Es importante porque permite el funcionamiento de electrodomésticos y equipos industriales que son ampliamente usados a nivel global. De acuerdo con el crecimiento económico, industrial y poblacional, su demanda global se ha incrementado considerablemente en la última década<sup>1</sup>. Así, la energía eléctrica se ha vuelto una fuente de desarrollo humano, en tanto que su uso permite el cuidado de las unidades familiares, el acceso a información y educación, brinda mayor seguridad a las personas, fomenta el empleo, entre otras diversas actividades que amplían las opciones de vida de las personas, brindando las condiciones para la eficiente formación del capital humano de un país de manera sostenible<sup>2</sup>.

Actualmente se sabe que las fuentes de energía tradicionales no son renovables y que además generan una carga ecológica.

Debido a la alta importancia que ha tomado el cuidado ambiental en la política a nivel transnacional, se fomenta cada vez más la generación de energía eléctrica a partir de fuentes renovables de energía, con el fin de evitar las emisiones de CO<sub>2</sub> y otros gases de efecto Invernadero, producidos por fuentes fósiles de energía.

<sup>1</sup> Wind energy potential of Marmara region in Turkey. En International journal of Energy and Environment, pp. 17-26

<sup>2</sup> 2. Cuánto tenemos, cuánto nos falta: unidad del Informe sobre Desarrollo Humano. Cartilla I: 'Las brechas en el territorio'. PNUD. 2009

Av. Universitaria N° 1801, San Miguel  
T: (511) 626 2000

[www.pucp.edu.pe](http://www.pucp.edu.pe)



En este sentido, es coherente pensar que los países que se quedan fuera de este tipo de innovaciones no están yendo en la misma dirección que está tomando el resto del mundo; lo cual redundaría en cierto atraso y un grave descuido de sus recursos, sea por destruirlos, despilfarrarlos o por tenerlos sin ver sus potencialidades.

Debido al aumento de su demanda, la relevancia que han adquirido, la preocupación por el medio ambiente y la necesidad de contar con un suministro seguro de electricidad se requiere de una nueva visión en la gestión de recursos Energéticos<sup>3</sup>. A nivel internacional, André, De Castro y Cerdá señalan que algunos países potencia ya están usando porcentajes importantes de energía renovable, como Estados Unidos, Dinamarca y Nueva Zelanda; mientras que las economías emergentes, como India y China demuestran que su consumo de energía renovable está en aumento<sup>4</sup>.

Esta coyuntura global hace necesario que el Perú cuente con estas políticas de Desarrollo Sostenible y propuestas de estrategias en el uso de fuentes de energías renovables orientadas al crecimiento económico y al beneficio y progreso del Estado y las comunidades regionales. Es importante saber que en nuestro país ya se está empezando a tener iniciativas en cuanto al uso de energías renovables.

Tenemos, por ejemplo, la propuesta de Jordán Arias, quien busca implementar el uso de un sistema híbrido viento-diesel en la ciudad de San Juan de Marcona, en Ica<sup>5</sup>. Así, gracias a aquellos proyectos que señalan potencialidades de los recursos renovables que están aún por explotarse, vemos que sí existen métodos concretos y viables para ayudar a las zonas más necesitadas de nuestro país y comenzar a cortar las brechas entre las clases sociales de los peruanos.

Por todo ello, esta tesis plantea el uso de una herramienta matemática de Optimización como la programación lineal para definir el dimensionamiento del uso de tecnologías para la generación energía eléctrica enfocado en unidades agropecuarias en Villa El Salvador (específicamente en Lomo de Corvina) con el fin de minimizar los costos para hacer de la energía eléctrica un recurso más accesible, dada su importancia para el desarrollo y progreso social, y que al mismo tiempo conlleva el uso de fuentes renovables que son consecuentes con las políticas de desarrollo sostenible ampliamente emprendidas a nivel mundial.

De esta manera, el esfuerzo busca contribuir como una herramienta de apoyo a la toma de decisiones para proyectos rurales que se ejecuten en esa comunidad u otra.

#### OBJETIVO GENERAL:

Encontrar las dimensiones óptimas que minimicen los costos de un sistema híbrido de generación de electricidad a base de fuentes de energías renovables para hogares agropecuarios en Lomo de Corvina.

<sup>3</sup> Green Power Grids: How Energy from Renewable Sources Affects Networks. En: PlosOne, Pp. 1-15. Moreddu, Caldarelli, Chessa, Sacala, & Damiano, 2015.

<sup>4</sup> Las energías renovables en el ámbito internacional. En: Cuadernos Económicos de ICE, No 83, 2009. Pp.11-36.

<sup>5</sup> Estudio de la utilización de energía Eólica para la generación de electricidad en un asentamiento humano de San Juan de Marcona. Arias, 2009.



**OBJETIVOS ESPECÍFICOS:**

- Describir el marco teórico, haciendo una revisión literaria de las investigaciones relevantes actuales y presentando algunos modelos importantes para el estudio propuesto.
- Describir los diferentes problemas de los hogares agropecuarios de Lomo de Corvina y priorizarlos intentando probar que la carencia de electricidad representa el problema más relevante en esta comunidad empleando técnicas de Ingeniería Industrial.
- Describir un modelo de programación lineal que minimice el costo total del sistema híbrido de generación de energía.
- Analizar indicadores de la propuesta resultante y realizar su evaluación económica.

**PUNTOS A TRATAR:**

**a. Marco teórico.**

Se presentará una revisión de las investigaciones que usan la programación lineal para tomar decisiones dirigidas a incluir las fuentes de energías renovables dentro de un plan de generación de energía a grande y pequeña escala. Finalmente, se presentarán tres modelos de programación lineal y sus resultados respectivos.

**b. Descripción del asentamiento humano y diagnóstico**

Se describe el asentamiento humano y se presenta los principales problemas que sufre la comunidad en base a indicadores estadísticos. Se priorizan los problemas y se propone y evalúa alternativas de solución empleando herramientas de Ingeniería Industrial.

**c. Propuesta de mejora**

Se desarrollará un modelo de programación lineal entera mixta para dimensionar un sistema híbrido de energía a base de fuentes renovables para cada hogar que pueda satisfacer su demanda de energía eléctrica.

**d. Evaluación técnica y económica**

Se presentan los resultados obtenidos y se calcula el presupuesto para un proyecto de electrificación rural que use esta herramienta de toma de decisiones para dimensionar los sistemas de energía.

Se evalúan los beneficios económicos para la comunidad y para una entidad externa financiadora. Finalmente, se contrasta para los hogares la situación actual y la posterior a la electrificación.

**e. Conclusiones y recomendaciones.**

*Máximo: 100 páginas*

ASESOR

## DEDICATORIA

A mi abuelo. Porque tú, Manuel, eres el mejor amigo que la vida me ha dado. Gracias por apoyarme siempre, por tus historias, por las películas que vemos juntos. Gracias papito.

Le dedico también este trabajo a quienes hacen incontables esfuerzos por difundir el uso de las energías renovables a nivel mundial, entre ellas la energía solar que es uno de los más hermosos regalos que nos ha dado Dios desde el inicio de los tiempos y que puede mejorar la situación de muchas personas en todo el mundo.

Y Dios dijo: “Haya luz”, y hubo luz.

Dios vio que la luz era buena, y separó la luz de las tinieblas.

La Santa Biblia. Génesis 1: 3-4



## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS .....	iv
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	vi
INTRODUCCIÓN .....	1
Capítulo 1: Marco teórico .....	3
1.1 Revisión de la literatura.....	3
1.1.1 Modelos a gran escala .....	4
1.1.2 Modelos a escala media.....	6
1.1.3 Modelos a escala pequeña.....	7
1.2 Modelos de programación lineal para minimizar el costo de generación de electricidad .....	9
1.2.1 Modelo 1: Lyzwa, Wierzbowski y Olek (2015) .....	9
1.2.2 Modelo 2: Alabert, Somoza, De la Hoz y Graells (2016).....	16
1.2.3 Modelo 3: Akella, Sharma y Saini (2007).....	22
1.2.4 Modelo 4: Zaatri y Allab (2012) .....	24
1.3 Fundamentos de la tecnología eólica y fotovoltaica .....	25
1.3.1 Fotovoltaica.....	25
1.3.2 Eólica .....	27
1.3.3 Componentes de los sistemas híbridos .....	29
1.3.4 Interconexión de elementos .....	30
1.3.5 Cálculo de la capacidad de los componentes .....	35
1.4 Marco legal de las energías renovables del Perú.....	37
1.4.1 Ley de concesiones eléctricas.....	38
1.4.2 Decreto legislativo de promoción para la inversión para la generación de electricidad con el uso de energías renovables.....	38
1.4.3 Ley de promoción y utilización de recursos energéticos renovables no convencionales en zonas rurales, aisladas y de frontera del país .....	39
1.4.4 Ley de electrificación rural.....	39
1.4.5 Generación distribuida .....	40
1.4.6 Resumen de especificaciones legales.....	40

1.5 Herramientas de mejora de procesos utilizadas.....	41
1.5.1 Análisis de Pareto .....	41
1.5.2 Diagrama de Ishikawa.....	43
1.5.3 Matriz Probabilidad-Impacto.....	43
1.5.4 Método <i>why-why</i> .....	43
1.5.5 Matriz FACTIS.....	44
Capítulo 2: Diagnóstico situacional	45
2.1 Orígenes y ubicación geográfica de Lomo de Corvina .....	45
2.2 Las zonas agropecuarias en Villa El Salvador .....	47
2.3 Gestión de indicadores de los hogares agropecuarios en Villa El Salvador .....	47
2.4 Identificación y priorización de problemas.....	52
2.5 Necesidades energéticas en los hogares de Lomo de Corvina .....	54
2.6 Análisis de causas .....	56
2.6.1 Diagrama de Ishikawa.....	56
2.6.2 Descripción de las causas.....	57
2.7 Análisis de las causas raíz.....	62
2.8 Análisis de contramedidas .....	63
2.8.1 Posibles contramedidas .....	63
2.8.2 Evaluación de las contramedidas.....	64
Capítulo 3: Descripción detallada del modelo	68
3.1 Descripción general .....	68
3.2 Fórmulas para el cálculo de la energía .....	69
3.2.1 Fotovoltaica.....	69
3.2.2 Eólica .....	69
3.3 Nomenclatura .....	70
3.3.1 Índices .....	70
3.3.2 Parámetros del modelo .....	70
3.3.3 Variables de decisión .....	71
3.4 Modelo de Programación Lineal Entera Mixta.....	71

3.4.1 Función objetivo .....	72
3.4.2 Restricciones .....	72
3.4.3 Rango de existencia.....	73
3.5 Obtención de datos.....	74
3.5.1 Irradiación solar.....	74
3.5.2 Velocidad del viento .....	75
3.5.3 Costos de los componentes .....	75
3.5.4 Datos técnicos relevantes de cada tecnología.....	76
3.5.5 Demanda mensual de energía en hogares agropecuarios de Lomo de Corvina .....	76
3.6 Modelado en LINGO .....	78
3.7 Limitaciones del modelo.....	80
Capítulo 4: Evaluación técnica y económica	81
4.1 Evaluación técnica .....	81
4.1.1 Resultados del modelo.....	81
4.1.2 Definición de la propuesta.....	83
4.1.3 Flujo de efectivo .....	87
4.2 Análisis de indicadores .....	89
4.2.1 Técnico-económicos .....	89
4.2.2 Económicos .....	91
4.2.3 Sociales .....	94
4.2.4 Ambientales .....	95
Capítulo 5: Conclusiones y recomendaciones	97
5.1 Conclusiones .....	97
5.2 Recomendaciones .....	98
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	100

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Parámetros del modelo 1 .....	15
Tabla 1.2 Variables de decisión del modelo 2.....	16
Tabla 1.3 Parámetro del modelo 2.....	17
Tabla 1.4 Resultados del modelo 2.....	22
Tabla 1.5 Energía a generarse por cada recurso incluido en el modelo 4 .....	23
Tabla 1.6 Resultados del modelo 5 .....	25
Tabla 1.7 Resumen del marco legal y su implicancia.....	40
Tabla 1.8 Organismos relacionados con la electrificación rural.....	41
Tabla 2.1 Priorización de problemas de los hogares agropecuarios en Lomo de Corvina. .....	54
Tabla 2.2 Matriz de Probabilidad-Impacto.....	62
Tabla 2.3 Método <i>why-why</i> .....	63
Tabla 2.4 Criterios de selección y sus factores de ponderación.....	64
Tabla 2.5 Desarrollo de la matriz FACTIS.....	65
Tabla 2.6 Criterios para seleccionar la herramienta de optimización.....	66
Tabla 2.7 Puntuación de las alternativas.....	67
Tabla 3.1 Índices de fuentes de energías .....	70
Tabla 3.2 Índice correspondiente a cada mes.....	70
Tabla 3.3 Irradiación solar promedio por cada mes.....	74
Tabla 3.4 Velocidad promedio del viento por cada mes .....	75
Tabla 3.5 Costos fijos y variables de la tecnología fotovoltaica .....	75
Tabla 3.6 Costos fijos y variables de la tecnología eólica.....	76
Tabla 3.7 Parámetros técnicos por cada tecnología.....	76
Tabla 3.8 Demanda diaria de energía de un hogar agropecuario promedio en Lomo de Corvina .....	77
Tabla 3.9 Demanda de energía eléctrica por mes.....	77
Tabla 4.1 Resultados obtenidos sobre el dimensionamiento del sistema.....	81
Tabla 4.2 Energía producida y requerida cada mes durante el año proyectado .....	82

Tabla 4.3 Característica de la batería .....	84
Tabla 4.4 Características del inversor .....	85
Tabla 4.5 Resumen de la selección .....	86
Tabla 4.6 Costos de los componentes .....	88
Tabla 4.7 Costos adicionales .....	88
Tabla 4.8 Flujo de efectivo hasta el año 10 .....	88
Tabla 4.9 Flujo de efectivo hasta el año 11 .....	89
Tabla 4.10 Valores de referencia de tarifas mensuales para proyectos similares.....	91
Tabla 4.11 Valores del VAN para cada combinación de subsidio (columna) y cuota (fila) dentro del rango objetivo.....	92
Tabla 4.12 Indicadores económicos de la propuesta .....	92
Tabla 4.13 Cálculo del ratio soles invertidos por vivienda para proyectos reales .....	93
Tabla 4.14 Cálculo del ratio soles invertidos por vivienda para las tres alternativas .....	93
Tabla 4.15 Indicadores de la propuesta .....	94
Tabla 4.16 Horas adicionales de estudio para escolares y equivalencia monetaria por región.....	94
Tabla 4.17 Beneficio económico del uso de radio y televisión mensual para hogares rurales por región.....	95
Tabla 4.18 Beneficio económico de la iluminación eléctrica mensual para hogares rurales por región .....	95
Tabla 4.19 Emisiones de CO <sub>2</sub> por kilowatt hora .....	96
Tabla 4.20 Ahorro de emisiones de CO <sub>2</sub> .....	96

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1.1. Diversificación de costos y drivers usados por cada tipo de costo .....	11
Ilustración 1.2. Diagrama de flujo.....	12
Ilustración 1.3. Demanda mensual de potencia eléctrica del Sistema Interconectado Nacional.....	13
Ilustración 1.4. Matriz de la variable binaria de decisión.....	14
Ilustración 1.5. Capacidad disponible por tipo de tecnología en el horizonte de tiempo planteado .....	16
Ilustración 1.6. Módulo fotovoltaico de referencia .....	25
Ilustración 1.7. Curva V-I de un panel solar .....	27
Ilustración 1.8. Módulo eólico de referencia .....	27
Ilustración 1.9. Valores típicos de diámetros de turbinas eólicas.....	28
Ilustración 1.10. Conexión de paneles en serie.....	30
Ilustración 1.11. Conexión de paneles en paralelo.....	31
Ilustración 1.12. Conexión de paneles en serie y paralelo.....	32
Ilustración 1.13. Conexión de baterías en serie .....	33
Ilustración 1.14. Conexión de baterías en paralelo.....	33
Ilustración 1.15. Conexión de baterías en serie y paralelo .....	34
Ilustración 1.16. Esquema de conexión eléctrica de un sistema híbrido.....	35
Ilustración 1.17. Ejemplo de diagrama de Pareto.....	42
Ilustración 1.18. Ejemplo de diagrama de Pareto Ponderado.....	42
Ilustración 1.19. Ejemplo de diagrama de Ishikawa.....	43
Ilustración 1.20. Ejemplo de matriz FACTIS.....	44
Ilustración 2.1. Tamaño del hogar en las unidades agropecuarias de Villa El Salvador	48
Ilustración 2.2. Edades de las familias en las unidades agropecuarias de Villa El Salvador .....	48
Ilustración 2.3. Número de hogares agropecuarios por tamaño .....	49
Ilustración 2.4. Número de hogares agropecuarios por tamaño .....	50
Ilustración 2.5. Porcentaje de hogares agropecuarios con electricidad de Villa El Salvador .....	50

Ilustración 2.6. Uso de tipos de energía por los hogares agropecuarios de Villa El Salvador .....	51
Ilustración 2.7. Diagrama de Pareto para priorizar los problemas de la comunidad .....	54
Ilustración 2.8. Diagrama de Ishikawa.....	57
Ilustración 4.1. Comparación entre la producción de energía y la demanda para el año proyectado.....	82
Ilustración 4.2. Elementos del sistema de generación de electricidad .....	83
Ilustración 4.3. Esquema de conexiones eléctricas del sistema fotovoltaico .....	87
Ilustración 4.4. Comparación de LCE entre proyectos reales a nivel mundial .....	90



## INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el uso de las fuentes de energías renovables es promovido a nivel mundial porque es vital para frenar el calentamiento global. En el Perú, existe un amplio potencial energético a base de estas fuentes y un marco legal que busca aumentar su participación en la electrificación a nivel nacional y rural, especialmente donde haga falta como es el caso del asentamiento humano Lomo de Corvina ubicado en el distrito de Villa El Salvador.

Así, una alternativa muy usada en hogares rurales son los sistemas híbridos compuestos por dos o más tipos de fuentes renovables (solar, eólica, hidráulica, etc.). Sin embargo, la tecnología de estos sistemas tiene requisitos que resultan una desventaja: una inversión inicial alta, un espacio grande para el sistema y un dimensionamiento correcto que asegure que se satisfará la demanda eléctrica en todo el año, lo que puede resultar bastante complejo.

Por ello, el presente trabajo busca producir un modelo de programación lineal entera mixta que permita determinar, conociendo datos de la demanda de electricidad por hogar, costos de los componentes y los parámetros meteorológicos respectivos, las dimensiones que debe tener un sistema híbrido de generación de electricidad a base de fuentes renovables que aseguren la menor inversión inicial posible, al mismo tiempo que se satisface la demanda de electricidad para cada mes del año y no se excede el área disponible que posee el hogar para dicho sistema. El modelo contribuiría como una herramienta para la toma de decisiones a los esfuerzos ya iniciados por diferentes proyectos de electrificación rural los cuales benefician a las comunidades en diferentes aspectos como el ambiental, el socioeconómico y el de la igualdad de género.

En el primer capítulo, se realiza una revisión de la literatura y se describen modelos de programación lineal con el objeto de minimizar costos en la generación de energía. Asimismo, se presenta una descripción de las tecnologías eólica y fotovoltaica a fin de revisar los conceptos pertinentes para formular un modelo propio y se analiza el marco legal pertinente a las energías renovables en el Perú.

En el segundo capítulo, se realiza un diagnóstico situacional de los hogares agropecuarios del asentamiento humano Lomo de Corvina.

El tercer capítulo corresponde al desarrollo del modelo MILP, el cual tiene como objetivo dimensionar un sistema híbrido de generación de electricidad minimizando su costo.

El cuarto capítulo corresponde a un análisis técnico y económico de los resultados. Así, se evalúa como estará compuesto el sistema de generación de electricidad y sus indicadores tales como el costo al cual se genera la energía, la contaminación ambiental que se está evitando, indicadores sociales y otros.

En el quinto capítulo se exponen las principales conclusiones que se obtuvieron de la investigación realizada y se mencionan algunas recomendaciones para posteriores trabajos y sobre el uso de otras herramientas mencionadas por la literatura.



# CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO

El presente capítulo tiene por finalidad primero describir las investigaciones de optimización revisadas relacionadas al desarrollo de estrategias para decidir qué fuentes de energía utilizar para satisfacer una demanda de energía mientras se busca minimizar los costos asociados y que a su vez permita integrar fuentes renovables de energía. El alcance del capítulo se centra en aquellas investigaciones que apliquen técnicas de investigación de operaciones con el objetivo de describir algunos de los modelos más relevantes para el caso de estudio.

## 1.1 Revisión de la literatura

Existen actualmente diversas aplicaciones de modelos de optimización empleados para resolver problemas asociados con obtener una mezcla ideal de unidades generadoras, tecnologías y/o estrategias de distribución de energía con el objetivo de minimizar costos; las cuales pueden ser divididas de acuerdo a la escala y al enfoque utilizado.

Respecto a la escala, según la literatura revisada, se propone clasificarla como grande, si la demanda a satisfacer es de una región o país o; media, si la aplicación es a nivel de una comunidad o distrito y pequeña si la demanda proviene de un hogar o un pequeño conjunto de estos.

En cuanto al enfoque, según Lyzwa, Wierbowski y Olek (2015), existen actualmente dos enfoques generales para abordar este tema: el enfoque *top down* y el enfoque *bottom up*. Ambos tipos se describen a continuación.

Enfoque *top down*:

Está orientado al estudio de la sensibilidad de los precios de energía, el equilibrio de su mercado y tiene un alcance superficial acerca de la forma en que funciona la generación de energía; esto es, carece en algunos casos de restricciones técnicas.

Enfoque *bottom up*:

Considera los aspectos técnicos con mayor detalle, de manera que el modelo detalla con mayor profundidad el comportamiento real de los componentes que conforman el sistema de generación de energía. Asimismo, este enfoque no suele incluir un análisis económico profundo.

Para ambos enfoques, se han usado modelos de programación dinámica, que debido a su complejidad se usan en horizontes de tiempo cortos; programación lineal, que se ajusta más a modelos con enfoque *top down* ; modelos de programación lineal entera mixta (MILP, por sus siglas en inglés), los cuales cuentan con la ventaja de usar variables binarias y enteras que ayudan principalmente a contar con variables de decisión que definen el estado (*on/off*) de una unidad generadora de energía y la capacidad de la misma, respectivamente. Finalmente, existen modelos de programación lineal no entera mixta (MINLP, por sus siglas en inglés), los cuales en varios casos se adecúan mucho a la realidad del problema a resolver pero demandan muchos esfuerzos (Lyzwa y otros, 2015).

### 1.1.1 Modelos a gran escala

Lyzwa, Wierzbowski y Olek (2015) presentan un modelo para encontrar la cuota óptima de a fuentes de energías renovables usar para satisfacer la demanda de energía de una región. Dicho modelo tiene restricciones técnicas y económicas. En el documento se le llama problema de optimización de Mix de energía (*EM Optimization*, por sus siglas en inglés). Los autores mencionan que, si bien es lógico abordar el problema desde un modelo de optimización, la mayoría de modelos existentes (hasta la fecha, se podría decir, dada la actualidad del documento) son de programación lineal. Dichos modelos permiten la estimación de la capacidad total a emplear por cada tecnología pero no la estimación de la potencia nominal a usar por cada unidad generadora, entre otros detalles como recarga de las unidades o emisiones individuales. En el estudio de estos autores se menciona también que los enfoques más sofisticados se basan en modelos MILP porque no se aborda la generación de energía del sistema de forma agregada sino que se le considera como un conjunto de unidades generadoras, cada una de ellas representadas por variables binarias en el modelo.

Para la formulación de variables binarias de este problema se presentan tres métodos:

- a) *Adapted Unit Commitment Method* (AUC): este método es diseñado por la *Unit Commitment* para abordar el problema de mix de energía. El estado (*on/off*) de cada unidad generadora es representado por una variable binaria de dos índices; uno representa el número de unidad a la que se hará referencia y el otro el tiempo (en años, para este caso).

- b) *Improved Adapted Unit Commitment Method (IAUC)*: en este método se dispone de variables que indican el año en que la unidad es construida y la información del tiempo de vida de la unidad como diferencias principales sobre el método anterior, además de reducir el número de restricciones. Sin embargo, cabe resaltar que esto aumenta el número de variables binarias.
- c) *Energy Mix Method (e-Mix Method)*: este es el más novedoso. Tiene como principales ventajas usar diez veces menos variables que el método AUC, reducción en el número de restricciones, una matriz de optimización de menor tamaño y la posibilidad de extenderse a modelos con nuevas características sin cambiar significativamente la formulación. Su desventaja es la gran necesidad de memoria RAM.

En el acápite 1.2 se describirá el modelo de mix de energía.

En el estudio de Ackermann, Andersson y Seoder (2001), los autores definen un sistema DER como un sistema de generación de energía localizado dentro o fuera de la localidad de los clientes finales que simultáneamente puede abastecer su demanda de calefacción y enfriamiento. Asimismo, Chinese (2001) menciona que los sistemas DER a escala de distrito pueden ser clasificados en dos tipos:

- Descentralizados: en los que las tecnologías de conversión de energía se encuentran instalados en los edificios del distrito realizándose así la distribución de energía entre edificios.
- Centralizados (como en el documento que presenta dicho autor): en los que la generación de energía se realiza fuera de los edificios y la distribución a estos se realiza a través de redes.

Al respecto de tales sistemas DER, Yang, Zhang y Xiao (2015) realizaron un estudio enfocado en hallar el diseño óptimo para un sistema DER a escala distrital usando un modelo MILP. En este caso el sistema DER genera energía desde fuera de la localidad donde están los edificios que la consumen y la envía hacia ellos mediante redes de distribución. El modelo logra simultáneamente encontrar la ubicación para las unidades generadoras (DER); sintetizarlas, esto es, hallar el tipo, capacidad requerida y número de equipos a emplear y, encontrar las estrategias de operación del sistema a nivel general para lo que se usan dos tipos de variables:

- Variables de diseño: selección de sitios, tipos de equipos, tuberías, cables y la cantidad de equipos a usar.

- Variables operacionales: monto de energía transferida por cables o tuberías y el monto de electricidad comprada por otra red, principalmente.

La función objetivo es minimizar el costo anual de inversión, operación y mantenimiento. La aplicación propuesta del modelo es en Guangzhou (China) y se menciona que los resultados muestran que la adopción del sistema DER propuesto proveería de beneficios económicos significativos respecto a los sistemas de generación de energía tradicionales.

Por otro lado, los autores Ding y Somani (2010) presentan dos modelos de programación lineal que se usan en conjunto para resolver dos problemas que surgen al pretender usar energías renovables para satisfacer la demanda en regiones grandes: el costo de la transmisión de la energía, que es mayor en el caso de la energía renovable comparada con la fósil y, la estabilidad que es relativamente baja. En esta investigación, se presenta un método de planeamiento paralelo para sistemas de energía y es aplicado sobre una región que comprende gran parte del medio oeste de Estados Unidos. La metodología implica partir esta región en múltiples regiones y en cada una se aplica los siguientes dos modelos:

- a) *year level*: corresponde a un modelo de programación lineal en el que se minimizan los costos de inversión, transmisión, operación, emisión de CO<sub>2</sub> y asimismo, se busca satisfacer el requisito denominado RPS.
- b) *hour level*: es un modelo MILP y cuyo objetivo es minimizar la volatilidad de los precios de energía (que se origina por el desbalance entre la oferta y la demanda) y las emisiones de CO<sub>2</sub>.

### 1.1.2 Modelos de escala media

En esta categoría se encuentran los modelos aplicados a comunidades o distritos y la optimización suele ser a microredes (*microgrids*) o una combinación entre microredes y sistemas individuales de generación de energía.

Ferrer-Martí, Domenech, García Villoria y Pastor (2012) presentan un modelo MILP para optimizar el diseño de un sistema híbrido de electrificación rural que combina microredes y generadores individuales y busca satisfacer la demanda de energía de los puntos de consumo. El modelo permite determinar en qué puntos de consumo se ubicarán las unidades de generación y cuál será la combinación de tecnologías a usar y en qué medida. El modelo toma en cuenta también un mapa de generación de energía el cual define la cantidad diaria que sería producida en cada punto de consumo si se colocara

una unidad generadora ahí. Adicionalmente, la investigación presenta un experimento computacional para comparar el uso de variables enteras y binarias para la formulación del modelo. De acuerdo a esto, el uso de variables enteras permite reducir el número de variables pero el rango de valores para cada una es grande mientras que usar variables binarias aumenta el número de variables pero cada una solo puede tomar el valor de 0 o 1 reduciendo así su rango. Tras el experimento se determinó que era mejor el uso de variables enteras porque obtiene mayor cantidad de soluciones óptimas en un menor tiempo en forma general. Asimismo, la aplicación del modelo se realiza en dos comunidades rurales en Perú: El Alumbre y El Alto Perú y se concluye que el modelo presentado puede ayudar a instituciones que promuevan proyectos de electrificación rural.

Similar a esta última investigación descrita, Ferrer-Martí, Pastor y Capó (2011) presentan un modelo MILP con el mismo objetivo y características. La diferencia radica en que la única fuente de energía considerada en esta investigación es la eólica. Asimismo, la aplicación del modelo es en la zona El Alumbre.

### **1.1.3 Modelos de escala pequeña**

En esta categoría, los modelos suelen ser aplicados a hogares aislados. Así, modelos orientados a minimizar los costos de sistemas híbridos de generación de electricidad ya sea que estos estén conectados o no a la red. En este nivel, los modelos están dirigidos a determinar el número de componentes a instalar de una determinada tecnología (fotovoltaica, eólica, hidráulica, etc.) así como en algunos casos el número de unidades de almacenamiento de energía y algunos toman en cuenta otras consideraciones adicionales. Existen modelos en este nivel con un enfoque *bottom up* claramente definido y no solo determinan el número de componentes necesarios sino que además buscan optimizar el sistema de generación de energía tomando en cuenta parámetros más técnicos como la configuración en serie o paralelo de las baterías o paneles solares.

En el estudio de Kusakana, Vermaak y Numbi (2012), los autores modelan la generación de energía eléctrica mediante fuentes de energías renovables aplicando programación lineal. El caso aplicativo consiste en el abastecimiento de energía eléctrica a una granja ubicada en Kwazulu Natal, Sudáfrica instalando sistemas híbridos (compuestos por varias tecnologías). El objetivo es minimizar el costo de los componentes que forman parte del sistema dimensionando adecuadamente el uso de las tecnologías que lo componen. La

conclusión del estudio fue que la decisión que generaba el menor costo de los componentes consistía en usar únicamente turbinas de viento.

Otro estudio empleando programación lineal lo presentan los autores Ramakumar, Sudhakara y Ashenai (1986). El objetivo del estudio es presentar un modelo de suministro de energía a zonas rurales aprovechando fuentes de energía renovables de la localidad. La función objetivo es minimizar el costo total por año de funcionamiento del sistema sujeto a las restricciones de disponibilidad de las fuentes de energías y de demanda. Los resultados de este estudio indican la cantidad de equipos a adquirir por cada tipo de tecnología.

Ruangpattana, Klabjan y Arinez (2011) presentan un modelo MILP aplicado a la optimización de la generación de energía para sitios industriales. Esta investigación se enfoca en el caso de una empresa automovilística que debe afrontar la decisión de realizar una inversión para generarse a sí misma electricidad mediante fuentes de energías renovables mientras que aún mantiene un contrato con un proveedor de electricidad y asimismo, puede comprarla en el mercado a precio *spot* de tal manera que pueda realizar un planeamiento a largo plazo. Además, el modelo toma en consideración que existen ingresos por vender potencia a la red y comercializar REC's (*Renewable Energy Credits*, por sus siglas en inglés). La función objetivo busca maximizar el Valor Presente Neto (VPN) de la estrategia que se va a implementar.

Existen además de las mencionadas otras aplicaciones de la investigación operativa hacia el rubro energético; así, Taylor y Love (2012) realizan un estudio aplicando programación lineal para dimensionar un sistema híbrido de generación de energía para cuarteles de tropas del ejército de Estados Unidos que están en zonas de combate y necesitan ser suministradas de Diesel como fuente de energía lo que representa costos elevados así como riesgos; por ello, se pretende optimizar el despliegue de sistemas que usen combustible y energía renovable. Así, los autores presentan dos modelos: el primero con el objetivo de minimizar los costos operacionales y el segundo con el objetivo de minimizar los incidentes (riesgo militar) mediante la minimización del tiempo de despliegue. Por otro lado, Javed y Arshad (2008) presentan un modelo de programación lineal para definir un plan de uso de las computadoras en una oficina de cómputo para minimizar el costo de operación total. Así, partiendo del supuesto de que las computadoras tienen un costo asociado al estar durante un periodo de tiempo en modo encendido, apagado, hibernación o encendiendo, se logra determinar un plan de uso de

las computadoras que define el número de computadoras a estar en cada uno de esos cuatro estados para cada periodo de tiempo de tal manera que las computadoras encendidas permitan satisfacer nuestra demanda como usuarios.

## **1.2 Modelos de programación lineal para minimizar el costo de generación de electricidad**

A continuación, se presentarán algunos modelos que usan programación lineal y programación lineal entera mixta para la optimización de costos de energía en sistemas integrados por diversos elementos y de naturaleza distinta.

### **1.2.1 Modelo 1**

El modelo descrito a continuación corresponde a Lyzwa, Wierzbowski y Olek (2015) en su estudio *Milp Formulation for Energy Mix Optimization*.

El trabajo se enfoca en el marco de atender un problema de *mix* de energía (diversidad en la generación), a través de un problema de optimización que tiene como objetivo minimizar una función de costos. Para ello deben considerarse ciertas restricciones como de limitaciones de capacidad, de presupuesto, técnicas de operación, e inclusive de decisiones. Esto manifiesta la participación de variables de diferente índole. Este modelo propone una toma de decisiones óptimas valederas en un horizonte finito, lo que le da un carácter dinámico. En un presente establecido, se establecen las decisiones para el horizonte temporal trazado.

Adicionalmente, cabe mencionar que el artículo sobre el cual se basa el presente trabajo, expone metodologías para atender el problema central, a fin de dar resultados concernientes con aspectos computacionales que incluye el análisis de la estabilidad de los resultados numéricos obtenidos. En este caso, el esquema matemático que se expone no se ocupa de esto; sin embargo, sí se presentarán resultados obtenidos en el escenario planteado por los autores.

En primer lugar, se expone la notación matemática referida a las variables en estudio:

En principio, la variable temporal es discreta. Si se quieren resultados para un horizonte de  $T$  unidades temporales (como por ejemplo años), cada periodo desde el presente se indicara por  $t$ . Se denotará al conjunto de periodos por  $Y = \{1, 2, \dots, T\}$ . Por otro lado, por

la naturaleza del problema, las demandas así como las capacidades de las unidades generadoras estarán dadas en Megawatts (MW).

Se tienen dos consideraciones:

Se asume que las unidades generadoras están indexadas de modo que denota a la unidad indexada con  $i$ .

Por se hará referencia al conjunto de unidades generadoras que se construyen en el periodo  $j$ , para

### 1.2.1.1 Parámetros del modelo

: representa el costo fijo de la unidad generadora ( $u$ ) en un periodo de tiempo ( $t$ ). Comprende el costo de amortización de la deuda, el costo financiero y los costos fijos de operación y de mantenimiento (en unidades u.m./MW/año).

: es el costo variable de la unidad  $u$  en el periodo  $t$ . Incluye costos variables de operación y mantenimiento, costo de combustible y costo por las emisiones de  $\text{CO}_2$  en dicho periodo (en unidades monetarias).

: Potencia nominal de la unidad  $u$  en el periodo  $t$  (En MW).

: Potencia disponible de la unidad  $u$  en el periodo  $t$  (En MW).

: Carga máxima en el sistema en el periodo  $t$  (En MW).

: Factor de reserva de potencia que determina el margen de potencia durante los picos de demanda.

: Demanda de energía en el periodo ( $t$ )

: Límite inferior de generación de energía por la unidad  $u$  en el periodo  $t$ .

: Límite máximo de generación de energía por la unidad  $u$  en el periodo  $t$ .

: Tiempo de vida de la unidad generadora (en años).

### 1.2.1.2 Variables de decisión

El modelo usa las siguientes variables de decisión:

$x_{u,t}$ : Variables binarias que corresponden al estado de funcionamiento de la unidad generadora  $u$  en el periodo  $t$ .

$e_{u,t}$ : Variables reales que representan la generación anual de electricidad de la unidad  $u$  en el periodo  $t$ .

### 1.2.1.3 Función objetivo

El objetivo es minimizar el costo total de la generación de energía que tiene un componente fijo y variable. La función objetivo se expresa en (1).

$$\min Z = \sum_{u \in U} \left( \sum_{t \in \gamma} (x_{u,t} \times P_{u,t} \times cf_{u,t} + e_{u,t} \times cv_{u,t}) \right) \dots (1)$$

En la ilustración 1.1 se indica los tipos de costo que se tomarán en cuenta para la función objetivo de minimización en el uso de este modelo. Así, se observa que el costo fijo de cada unidad generadora está en función de su potencia nominal y el costo variable, en función de la energía producida.



Ilustración 1.1. Diversificación de costos y drivers usados por cada tipo de costo.

Elaboración propia

### 1.2.1.4 Restricciones

A continuación se muestran las restricciones que componen el modelo.

En la expresión (2) se realiza una declaración de las variables binarias. Esto es,  $x_{u,t}$  indica la decisión de usar una unidad generadora de energía durante el periodo  $t$ . Si esta toma el valor de 1 indica estar funcionando y por lo tanto está generando costos.

$$\forall u \in U, t \in \gamma, x_{u,t} = \begin{cases} 1, & \text{u funciona en el periodo } t \\ 0, & \text{u no funciona en el periodo } t \end{cases} \quad (2)$$

Para indicar la relación que tiene en los costos se usará la ilustración 1.2.

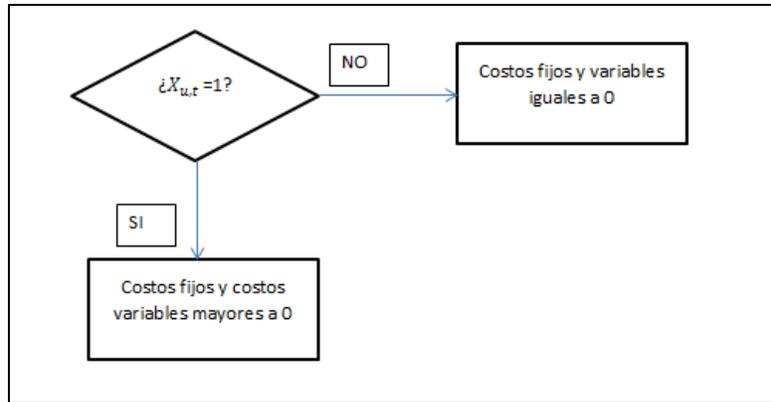


Ilustración 1.2. Diagrama de flujo

Elaboración propia

La ilustración 1.2 indica que sólo cuando la unidad generadora esté funcionando incurrirá en costos fijos y variables. Asimismo, solo si la unidad está funcionando, se generará energía. Para asegurar ello, se establecen las siguientes dos condiciones en las expresiones (3) y (4). Así, la expresión (3) indica que si la unidad (u) está funcionando en el periodo (t) la cantidad de energía producida debe ser mayor a 0.

$$X_{u,t} = 1 \rightarrow e_{u,t} > 0 \dots \forall u \in U, \forall t \in T \dots (3)$$

La expresión (4) indica que si la unidad (u) no está funcionando en el periodo (t) la cantidad de energía producida debe ser igual a 0.

$$X_{u,t} = 0 \rightarrow e_{u,t} = 0 \dots \forall u \in U, \forall t \in T \dots (4)$$

La restricción en la expresión (5) indica que la energía producida por cada unidad generadora tiene límites máximos y mínimos.

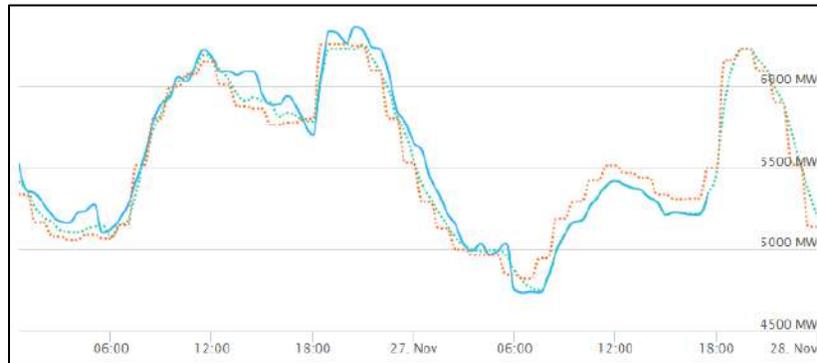
$$E_{u,t}^{min} \leq e_{AUC_{u,t}} \leq E_{u,t}^{max}, \forall u \in U, t \in T \dots (5)$$

Donde  $E_{u,t}^{min}$  y  $E_{u,t}^{max}$  son los límites de máxima y mínima generación de energía en un determinado periodo (t) por la unidad generadora (u). La capacidad máxima está dada por las limitaciones técnicas y el límite inferior corresponde a la cantidad de energía que se debe producir y enviar para cubrir los costos fijos de la unidad generadora.

En la expresión (6) se asegura que la capacidad disponible total que se expresa como la sumatoria de potencias disponibles individuales cubre la carga máxima demandada por el sistema en un periodo (t) adicionando un margen adecuado que está representado por el factor  $k^{res}$ .

$$\forall t \in \gamma, \sum_{u \in U} P_{u,t}^A \geq P_t^D + k^{res} \times P_t^D \dots (6)$$

Resulta interesante observar que esta restricción implica un margen de seguridad indicando que el sistema debe siempre tener una potencia disponible mayor a la que se puede llegar a demandar para evitar colapsos ya que el comportamiento de la demanda de potencia eléctrica puede llegar a tener variaciones por encima del promedio como puede observarse en la ilustración 1.3.



**Ilustración 1.3. Demanda mensual de potencia eléctrica del Sistema Interconectado Nacional**

**Fuente: COES. 2016**

En la expresión (7) se formula que la demanda de energía total en un periodo de tiempo (t) es igual a la energía producida por todas las unidades generadoras (u).

$$\forall t \in \gamma, \sum_{u \in U} e_{u,t} = E_t^D \dots (7)$$

En la ilustración 1.4 tomada del documento estudiado, se muestra que la variable  $x$  corresponde a una matriz de dimensiones  $U \times T$ ; donde  $U$  corresponde a la cantidad de unidades generadoras que pueden ser construidas y  $T$  al número de periodos de tiempo en que se dividen el horizonte asumido. En este caso el horizonte de tiempo es de 2020 al 2090 y cada periodo de tiempo corresponde a un año.

		time from 2020 to 2090					
$X_{AUC} =$	1	1	1	...	0	0	$lignite\_1$
	1	1	1	...	0	0	$lignite\_2$
	:	:	:	:	:	:	:
	0	0	0	...	1	1	$lignite\_L-1$
	0	0	0	...	0	1	$lignite\_L$
	0	0	1	...	0	0	$hardcoal\_1$
	:	:	:	:	:	:	:
	0	1	1	...	0	0	$hardcoal\_HC$
	0	0	0	...	1	0	$gas\_1$
	:	:	:	:	:	:	:
	0	1	1	...	0	0	$gas\_G$
	1	1	1	...	0	0	$nuclear\_1$
	:	:	:	:	:	:	:
	0	0	0	...	1	1	$nuclear\_N$

Ilustración 1.4. Matriz de la variable binaria de decisión.

Fuente: Lyzwa y otros. 2015

Al respecto de la construcción de las unidades generadoras, una vez que se construye una unidad generadora (u) esta funciona durante su periodo de vida  $lt_u$ ; esto es, desde  $t$  hasta  $t + lt - 1$ . Esto se asegura en las restricciones que se detallarán a continuación para cada rango relevante de valores que puede tomar el periodo de tiempo (t).

Para el periodo inicial  $t_1$  se cumple la expresión (8).

$$\forall u \in U, t' = t_1$$

$$\sum_{t=t'}^{lt_u} x_{u,t} \geq lt_u \times x_{u,t'} \dots (8)$$

Para el siguiente rango de años que corresponde de  $t_1 + 1$  a  $t_T - lt_u + 1$ , se establece la restricción de la expresión (9).

$$\forall u \in U, \quad \forall t' \in [t_1 + 1, \dots, t_T - lt_u + 1]$$

$$\sum_{t=t'}^{lt_u+t'-1} x_{u,t} \geq lt_u (x_{u,t'} - x_{u,t'-1}) \dots (9)$$

Por último, en el último rango de periodos a analizar que es de  $t_T - lt_u + 2$  a  $t_T - 1$  se cumple la expresión (10).

$$\forall u \in U, \quad \forall t' \in [t_T - lt_u + 2, \dots, t_T - 1]$$

$$\sum_{t=t'}^{t_T} X_{u,t} \geq (T_t - t' + 1)(X_{u,t} - X_{u,t-1}) \dots (10)$$

Para los demás periodos posibles, se cumple la expresión (11):

$$\forall u \in U, \quad \forall t' \in [t_1 + 1, \dots, t_T - lt_u]$$

$$\sum_{t=t'+lt}^{t_T} (1 - x_{u,t}) \geq (T_t - lt_u - t' + 1)(X_{u,t} - X_{u,t-1}) \dots (11)$$

No es necesario analizar si fuera de este rango; es decir, a partir del periodo  $t_T - lt_u + 1$  en adelante las unidades cumplen esta restricción. Si se quiere saber si estando la unidad funcionando en dicho periodo no volverá a funcionar luego de su periodo de vida, esto es en el periodo  $(t_T - lt_u + 1) + lt_u$ ; carecería de sentido para el modelo ya que este periodo es  $t_T + 1$  y excede al último periodo del horizonte T, que es  $t_T$ .

### 1.2.1.5 Resultados

Los valores de los parámetros que se usaron para la solución del modelo se muestran en la tabla 1.1.

Tabla 1.1. Parámetros del modelo 1

<i>CO2 price</i>	<i>Gas price</i>	<i>RES share</i>	<i>Resources limit</i>
€/ Mg	\$/ 1,000 / m <sup>3</sup>	%	-
10-25	350	19-23	No hay

Fuente: Lyzwa y otros. 2015

Aunque no se indica exactamente cuál fue la lista de unidades generadoras, se menciona que entre el 19 y 23% correspondían a fuentes renovables de energía. Asimismo, se asignó un costo por las emisiones de CO<sub>2</sub> y por el gas. Se menciona que el modelo fue resuelto tomando en consideración pronósticos de picos de demanda y la fluctuación del precio de las emisiones de CO<sub>2</sub>. Asimismo, otro resultado obtenido fue que para el 2020 la capacidad disponible de generación de energía sería en su mayoría compuesta por fuentes fósiles como el carbón; sin embargo, debido al incremento en el precio de las emisiones de CO<sub>2</sub>, para el 2050 la capacidad disponible estaría ampliamente abarcada por el gas natural. Esto se resume en la ilustración 1.5.

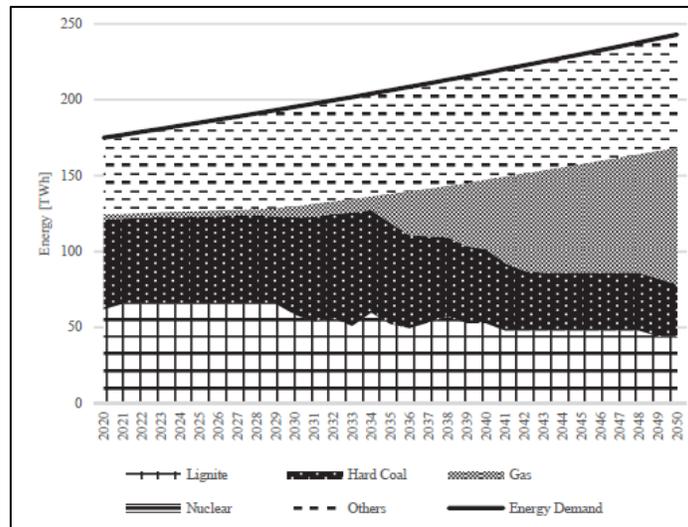


Ilustración 1.5. Capacidad disponible por tipo de tecnología de generación en el horizonte de tiempo planteado.

Fuente: Lyzwa y otros. 2015.

## 1.2.2 Modelo 2

La investigación realizada por Alabert, Somoza, De la Hoz y Graells (2016) desarrolla un modelo MILP para encontrar el dimensionamiento óptimo de un sistema de generación eléctrica cuyo objetivo es minimizar el costo total del sistema buscando satisfacer la demanda eléctrica que se tiene para distintos escenarios

### 1.2.2.1 Variables de decisión

Las variables de decisión se indican en la siguiente tabla 1.2.

Tabla 1.2. Variables de decisión del modelo 2

Variable	Definición
$PwI_i$	Potencia (watts) a instalar de la fuente (i)
$PwX_x$	Potencia (watts) a contratar de la fuente externa (x)
$EnK_k$	Capacidad (watts) a instalar en el almacén de energía (k)
$EnI_{i,j,t,s}$	Flujo de energía (watts-hora) entre la fuente generadora (i) y la demanda (j)
$EnIK_{i,k,t,s}$	Flujo de energía (watts-hora) entre la fuente generadora (i) y el almacén (k)
$EnIX_{i,x,t,s}$	Flujo de energía (watts-hora) entre la fuente generadora (i) y la fuente externa (x)
$EnXJ_{x,j,t,s}$	Flujo de energía (watts-hora) entre la fuente externa (x) y la demanda (j)
$EnXK_{x,k,t,s}$	Flujo de energía (watts-hora) entre la fuente externa (x) y el almacén (k)
$EnKJ_{i,k,t,s}$	Flujo de energía (watts-hora) entre un almacén (k) y una demanda (j)
$PwIG_{i,t,s}$	Energía a generar (watts-hora) por la fuente (i)

Fuente: Alabert y otros. 2016

Los índices (t) y (s) indican que se refieren a una determinada división de tiempo y escenario, respectivamente.

### 1.2.2.2 Parámetros

Los parámetros se definen en la siguiente tabla 1.3.

Tabla 1.3. Parámetros del modelo 2

Parámetro	Definición
<b>HL</b>	Duración de todo el sistema
<b>PL</b>	Periodo de tiempo de carga y descarga
<b>SL</b>	División elemental de tiempo entre las cuales ocurren cambios
$w_s$	Ponderación del escenario
<b>PwIMax<sub>i</sub></b>	Máxima potencia (watts) a instalar de la fuente (i)
<b>PrPwI<sub>i</sub></b>	Precio por unidad de potencia instalada de la fuente (i)
<b>PrEnI<sub>i</sub></b>	Máxima potencia (watts) a contratar de la fuente (x)
<b>PwI<sub>i</sub></b>	Precio por unidad de energía generada de la fuente (i)
<b>PwXMax<sub>x</sub></b>	Máxima potencia (watts) a contratar de la fuente (x)
<b>PrPwX<sub>x</sub></b>	Precio por unidad de potencia contratada de la fuente (x)
<b>PrEnP<sub>x</sub></b>	Precio de cada unidad de energía comprada de la fuente (x)
<b>PrEnS<sub>x</sub></b>	Precio de cada unidad de energía vendida a la fuente (x)
<b>EnKMax<sub>k</sub></b>	Máxima capacidad (en watts-hora) a instalar en el almacén (k)
<b>PrEnK<sub>k</sub></b>	Precio de cada unidad de energía de capacidad instalada al almacén (k)
<b>PrEnCh<sub>k</sub></b>	Precio de cargar cada unidad de energía al almacén (k)
<b>PrEnDh<sub>k</sub></b>	Precio de descargar cada unidad de energía del almacén (k)
<b>PwChMax<sub>k</sub></b>	Máxima potencia de carga del almacén (k)
<b>PwDhMax<sub>k</sub></b>	Máxima potencia de descarga del almacén (k)
<b>EfCh<sub>k</sub></b>	Eficiencia en la carga del almacén (k)
<b>EfDh<sub>k</sub></b>	Eficiencia en la descarga del almacén (k)
<b>DODMax<sub>k</sub></b>	Máxima profundidad de descarga del almacén (k)
<b>EnD<sub>j,t,s</sub></b>	Cantidad de energía demandada por cada (j) en cada slot (t) en el escenario (s)

Fuente: Alabert y otros. 2016

### 1.2.2.3 Restricciones

En la expresión (12) se muestra la ecuación de balance de energía mediante cada demanda (j) es satisfecha mediante la energía que se suministra por fuentes internas (i), fuentes externas (x) y los almacenes (k). Todo ello para un determinado slot (t) y escenario (s).

$$\sum_i EnI_{i,j,t,s} + \sum_x EnX_{x,j,t,s} + \sum_k EnK_{k,j,t,s} = EnD_{j,t,s} \quad \forall j, t, s \dots (12)$$

En la expresión (13) se cumple que la energía generada por cada fuente interna (i) durante un slot (t) es la potencia multiplicada por el tiempo.

$$EnIG_{i,t,s} = PwIG_{i,t,s} \times SL \quad \forall i, t, s \dots (13)$$

En la expresión (14) se asegura que la potencia instalada de cada fuente (i) no sea mayor que la máxima potencia posible a instalar de esa fuente que se ha previamente definido.

$$PwI_i \leq PwIMax_i \quad \forall i \dots (14)$$

La expresión (15) indica el balance de energía para cada fuente (i). Así, la energía generada por cada fuente (i) es transmitida a una demanda (j), vendida a una fuente externa (x) almacenada en un almacén (k) o se considera como un exceso que es representado por la expresión  $EnEx_{i,t,s}$ .

$$\sum_j EnIJ_{i,j,t,s} + \sum_x EnIX_{i,x,t,s} + \sum_k EnIK_{i,k,t,s} + EnEx_{i,t,s} = EnIG_{i,t,s} \quad \forall j, t, s \dots (15)$$

La expresión (16) es homóloga a la ecuación en (13) pero aplicada a cada fuente externa (x).

$$PwEx_{i,t,s} = EnEx_{i,t,s} / SL \quad \forall i, t, s \dots (16)$$

Las expresiones (17) y (18) aseguran que en caso de que se decida generar energía mediante la fuente (i) la potencia no sea mayor a la máxima permitida y asimismo que si se decide no usar la fuente (i), la potencia máxima a instalar sea cero.

$$PwIG_{i,t,s} \geq -PwIMax_i \times G_{i,t,s} \quad \forall i \dots (17)$$

$$PwIG_{i,t,s} \leq PwIMax_i \times G_{i,t,s} \quad \forall i \dots (18)$$

Las siguientes ecuaciones se refieren a las fuentes externas de energía. Así, la expresión (19) indica que la potencia contratada a la fuente externa (x) no puede ser mayor a la máxima permitida.

$$PwX_x \leq PwXMax_x \quad \forall x \dots (19)$$

La expresión (20) explica el balance de energía que ha sido comprada a cada fuente externa (x). Esta energía es usada para satisfacer cada demanda (j) y asimismo, una parte es almacenada en los almacenes (k).

$$EnXP_{x,t,s} = \sum_j EnXJ_{x,j,t,s} + \sum_k EnXK_{x,k,t,s} \quad \forall x, t, s \dots (20)$$

La expresión (21) indica que la energía vendida a la fuente externa (x) es la suma de las energías que se dirigen de las fuentes (i) a dicha fuente (x). Nótese que no se consideran para la venta la energía que se encuentra almacenada.

$$EnXS_{x,t,s} = \sum_i EnIX_{i,x,t,s} \quad \forall x, t, s \dots (21)$$

Las expresiones (22) y (23) son homólogas a las (13) y (16) pero haciendo referencia a la energía comprada y vendida a cada fuente (x) respectivamente.

$$PwXP_{x,t,s} = EnXP_{x,t,s} / SL \quad \forall x, t, s \dots (22)$$

$$PwXS_{x,t,s} = EnXS_{x,t,s} / SL \quad \forall x, t, s \dots (23)$$

Asimismo, las expresiones (24) y (25) indican que tanto la potencia de la energía que se compra como la de la energía que se vende no exceden a la potencia contratada en ese orden, respectivamente.

$$PwXP_{x,t,s} \leq PwX_x \quad \forall x, t, s \dots (24)$$

$$PwXS_{x,t,s} \leq PwX_x \quad \forall x, t, s \dots (25)$$

En la expresión (26) se indica que la capacidad de almacenamiento a instalar en el almacén (k) no debe exceder la máxima capacidad permitida a ser instalada.

$$EnK_k \leq EnKMax_k \quad \forall k \dots (26)$$

En la expresión (27) se establece que la energía que se carga o almacena a un almacén (k) es la energía que proviene de las fuentes internas y externas considerando también una eficiencia de carga  $EfCh_k$ .

$$EnKCh_{k,t,s} = \left( \sum_i EnIK_{i,k,t,s} + \sum_x EnXK_{x,k,t,s} \right) \times EfCh_k \quad \forall k, t, s \dots (27)$$

En la expresión (28) se establece que la energía suministrada para satisfacer las demandas es igual a la cantidad de energía que se debe descargar de los almacenes considerando que esta cantidad se ve afectada por una eficiencia de descarga que hace que para suministrar una cierta cantidad de energía la cantidad a descargar sea mayor.

$$EnKDh_{k,t,s} = \left( \sum_J EnJK_{k,j,t,s} \right) \times 1/EfDh_k \quad \forall k, t, s \dots (28)$$

En las expresiones (29) y (30) se indica que la potencia de carga y descarga respectivamente no exceden los máximos permitidos.

$$EnKCh_{k,t,s} \leq PwChMax_k \times SL \quad \forall k, t, s \dots (29)$$

$$EnKDh_{k,t,s} \leq PwDhMax_k \times SL \quad \forall k, t, s \dots (30)$$

En la expresión (31) se indica que para un determinado almacén (k) y escenario (s) la cantidad de energía que se almacena en un *slot* (t) es igual a la cantidad que estaba almacenada el *slot* anterior (t-1), sumándole la cantidad que se añade (carga) durante el *slot* actual y restándole la cantidad que se libera (descarga).

$$EnKS_{k,t,s} = EnKS_{k,t-1,s} + EnKCh_{k,t,s} - EnKDh_{k,t,s} \quad \forall k, t > 1, s \dots (31)$$

En la expresión (32) se aplica el mismo criterio que en (31) pero esta vez se busca asegurar que el estado final sea igual al inicial.

$$EnKS_{k,t,s} = EnKS_{k,last(t),s} + EnKCh_{k,t,s} - EnKDh_{k,t,s} \quad \forall k, t = 1, s \dots (32)$$

En la expresión (33) se asegura que la energía almacenada para cada almacén (k) en cualquier *slot* (t) y escenario (s) sea menor que la capacidad de almacenamiento que se instaló.

$$EnKS_{k,t,s} \leq EnK_k \quad \forall k, t, s \dots (33)$$

En la expresión (34) se asegura que en cada *slot* (t) y escenario (s) la energía que se almacena se encuentra por encima de la mínima cantidad que debe haber en el almacén (k) que se calcula tomando en cuenta la máxima profundidad de descarga que se permite en cada almacén.

$$EnKS_{k,t,s} \geq EnK_k \times (1 - DODMax_k) \quad \forall k, t, s \dots (34)$$

#### 1.2.2.4 Función objetivo

La función objetivo se muestra en la expresión (35) mediante la cual se busca minimizar el costo total que está compuesto por el costo de instalación de los componentes así como

los costos operacionales. El costo operacional resulta de un promedio ponderado de los costos operacionales que resultan en cada escenario (s) tomando en cuenta el peso de cada escenario  $w_s$ .

$$\text{Min Total cost} = \text{CIns} + \sum_j (w_s \times \text{COp}_s) \dots (35)$$

En las expresiones (36) y (37) se define cómo se calcula el costo de instalación y el costo operacional respectivamente. Así, en (36) se define el costo de instalación como el costo por instalar las fuentes generadoras, contratar las fuentes externas y el costo de instalar los almacenes. Cada uno de ellos se obtiene como un producto entre el costo unitario de instalación y la capacidad instalada.

$$\text{CIns} = \sum_i (\text{PrPw}_i \times \text{PwI}_i) + \sum_i (\text{PrPwX}_x \times \text{PwX}_x) + \sum_i (\text{PrEnK}_k \times \text{EnK}_k) \dots (36)$$

En la expresión (37) el costo operacional queda definido como el precio de generar cada unidad de energía por la fuente (i) multiplicado por la energía generada, sumado a la diferencia entre la energía vendida (que representa un ingreso) y comprada a la fuente externa (k) y sumado al costo por carga y descarga de los almacenes.

$$\begin{aligned} \text{COp}_s = \frac{HL}{PL} \times \sum_t \sum_i (\text{PrEnI}_i \times \text{EnIG}_{i,t,s}) \\ + \sum_x \text{PrEnP}_x \times \text{EnXP}_{x,t,s} - \text{PrEnS}_x \times \text{EnXS}_{x,t,s} \\ + \sum_k \text{PrEnCh}_k \times \text{EnKCh}_{k,t,s} + \text{PrEnDh}_k \times \text{EnKDh}_{k,t,s} \quad \forall s \dots (37) \end{aligned}$$

### 1.2.2.5 Resultados

La investigación señala los siguientes resultados analizando dos periodos diferentes en los cuales se consideró la demanda de energía correspondiente a una semana y un día. Cada uno de esos periodos fue analizado considerando dos casos: con la posibilidad de conectarse a una red externa y sin esa posibilidad. La tabla 1.4 señala el dimensionamiento que se obtuvo como resultado de la aplicación del modelo y el costo en euros €. La aplicación fue sobre un hogar con cinco habitantes. Las dos fuentes internas son la eólica y fotovoltaica. La fuente externa es la conexión a la red y los almacenes son baterías.

Tabla 1.4. Resultados del modelo 2.

Concepto	Unidades	Conectado a la red		Sin conectar	
		1 día	1 semana	1 día	1 semana
Superficie fotovoltaica	(m <sup>2</sup> )	0.0	0.0	14.7	7.0
Potencia eólica	(W)	0.0	0.0	0	277.0
Capacidad de las baterías	(Ah)	0.0	0.0	375.4	549.0
Potencia contratada a la red	(W)	233.8	233.8	0.0	0.0
Costo de instalación fotovoltaica	(€)	0.0	0.0	7,498.0	3,587.0
Costo de instalación de las baterías	(€)	0.0	0.0	3,003.0	4,392.0
Costo de instalación eólica	(€)	0.0	0.0	0.0	970.0
Costo del contrato con la red	(€)	121.0	121.0	0.0	0.0
Costo operacional	(€)	2,277.0	2,204.0	0.0	0.0
Costo total	(€)	2,398.0	2,325.0	10,501.0	8,949.0

Fuente: Albert y otros. 2016

Debe notarse que al variar el ciclo en el cual se analiza el diseño del sistema, su configuración cambia. Así, en el caso del sistema sin conectar a la red hay dos resultados: si el ciclo analizado es de 1 día el sistema está compuesto solo por paneles solares y baterías como suministro de energía; mientras que si el ciclo es de una semana el sistema es híbrido y usa también baterías.

### 1.2.3 Modelo 3

Akella, Sharma y Saini (2007) presentan un modelo de programación lineal para encontrar la cuota de participación de un conjunto previamente definido de fuentes de energías renovables para satisfacer la demanda de una región en extrema pobreza en la India con el objetivo de minimizar el costo de la generación de energía.

#### 1.2.3.1 Parámetros

Los parámetros usados en el modelo son:

$C_{ij}$  : Costo por unidad de energía generada por la fuente (i) para satisfacer la demanda (j).

$n_{ij}$  : Eficiencia de la conversión de energía generada por la fuente (i) para satisfacer la demanda (j).

$D_j$  : Demanda (j) en unidades de energía.

$S_i$  : Máxima capacidad de producción de energía de la fuente (i)

### 1.2.3.2 Variables de decisión

$X_{ij}$  : Cantidad de energía generada por la fuente (i) para satisfacer la demanda (j)

### 1.2.3.3 Función objetivo

En la expresión (38) se busca minimizar el costo de generación de energía.

$$\text{Min } Z = \sum C_{ij} \times X_{ij} \dots (38)$$

### 1.2.3.4 Restricciones

En la expresión (39) se establece que la suma de la energía producida por todas las fuentes (i) para satisfacer la demanda (j) iguala a la demanda (j).

$$\sum X_{ij} = D_j \quad \forall j \dots (39)$$

En la expresión (40) se establece que la energía generada por cada fuente (i) no debe exceder la máxima capacidad disponible tomando en cuenta las pérdidas por eficiencia de conversión.

$$\sum \frac{X_{ij}}{n_{ij}} \leq S_i \quad \forall i \dots (40)$$

En la expresión (41) se establece que las cantidades de energía generada son no negativas.

$$X_{ij} \geq 0 \quad \forall i, j \dots (41)$$

### 1.2.3.5 Resultados

La demanda anual a satisfacer fue de 687 MW-h y el valor óptimo hallado para la función objetivo fue de 2'134,710 Rs. La tabla 1.5 indica la energía a generarse por fuente.

Tabla 1.5. Energía a generarse por cada recurso incluido en el modelo 4

Fuente	Energía generada (MW-h)	Participación (%)
MHP	115,465	16.81
SPV	15,588	2.27
WES	12,201	1.78
BES	543,546	79.14

Fuente: Akella y otros. 2007

#### 1.2.4 Modelo 4

Zaatri y Allab (2012) presentan un modelo de programación entera para el dimensionamiento óptimo de un sistema híbrido de generación de energía para minimizar la inversión inicial bajo ciertas restricciones para satisfacer la demanda de energía. La formulación requiere la estimación de la energía que puede ser provista por cada unidad fotovoltaica o eólica así como su costo unitario. Así, el caso de aplicación es para un sistema híbrido localizado en Argelia.

##### 1.2.4.1 Parámetros

$C_i$  : Costo por unidad de generación del tipo (i)

$E_i$  : Energía que puede producir una unidad de generación del tipo (i) al año.

$D$  : Demanda de energía al año.

##### 1.2.4.2 Variables de decisión

$N_i$  : Cantidad de unidades de generación del tipo (i) a instalar.

##### 1.2.4.3 Función objetivo

La función objetivo es de minimización de costos. Así, en la expresión (42) se busca minimizar el costo de generación de energía que se calcula como la multiplicación de las unidades de generación de energía por su respectivo costo unitario.

$$\text{Min } Z = \sum C_i \times N_i \dots (42)$$

##### 1.2.4.4 Restricciones

En la expresión (43) se establece que la suma de la energía producida por todas las fuentes (i) para satisfacer la demanda (j) iguala a la demanda (j).

$$\sum E_i = D \quad \dots (43)$$

En la expresión (44) se establece que el número de unidades de generación de energía del tipo (i) es no negativo.

$$N_i \geq 0 \quad \forall i, j \dots (44)$$

### 1.2.4.5 Resultados

La demanda a satisfacer fue de 3000 kW-h en un año. El valor óptimo hallado para la función objetivo fue de 3880 (\$) y las cantidades de unidades de generación de energía a instalarse por cada recurso (i) se enlistan en la tabla 1.6.

Tabla 1.6. Resultados del modelo 5

Fuente (i)	Número de módulos N(i)
Fotovoltaica	6
Eólica	31

Fuente: Akella y otros. 2007

## 1.3 Fundamentos de las tecnologías fotovoltaica y eólica

La tecnología fotovoltaica se basa en el fenómeno físico conocido como efecto fotovoltaico que es la conversión directa, en un dispositivo llamado célula fotovoltaica, de radiación electromagnética proveniente del sol en corriente eléctrica (Ortega, 2000). Por otro lado, la tecnología eólica aprovecha la energía del viento produciendo fuerza motriz que se convierte al final en energía eléctrica. Ambas tecnologías son usadas para electrificar servicios públicos remotos, viviendas alejadas y venta de electricidad (Perales, 2012). A continuación se describirán los fundamentos de los equipos usados en cada tecnología.

### 1.3.1 Fotovoltaica

Las células fotovoltaicas se agrupan formando módulos fotovoltaicos o también llamados paneles solares. La ilustración 1.6 muestra un panel solar.



Ilustración 1.6 Módulo fotovoltaico de referencia

Fuente: EMARESA

La energía eléctrica producida en ellos se puede calcular mediante la expresión (45):

$$E_{pv} = A \times n_{gen} \times P_f \times I \dots (45)$$

Donde:

**I**: La irradiación solar es la energía que proviene del sol y llega a la superficie terrestre. Se mide en kilowatts hora por unidad de área que ocupan los módulos fotovoltaicos (kW-h/m<sup>2</sup>). Su magnitud varía durante el año según la zona a analizar.

**P<sub>f</sub>**: El factor de empaquetamiento corresponde a un factor que indica el porcentaje de área efectiva que usan los módulos para generar electricidad.

**A**: El área ocupada en total por los módulos fotovoltaicos.

**n<sub>gen</sub>**: La eficiencia depende del tipo de silicio del que están hechas las células fotovoltaicas.

Existen en el mercado tres tipos de células de silicio:

- a) Silicio monocristalino: todos los átomos están perfectamente ordenados. Su eficiencia es alrededor de 18%
- b) Silicio policristalino: los átomos cambian cada cierto tiempo durante el proceso de deposición. Su eficiencia es de alrededor de 16%
- c) Silicio amorfo: en él ha desaparecido la estructura cristalina ordenada. Su eficiencia es de alrededor de 6%.

Adicionalmente, los módulos fotovoltaicos poseen las siguientes características principales.

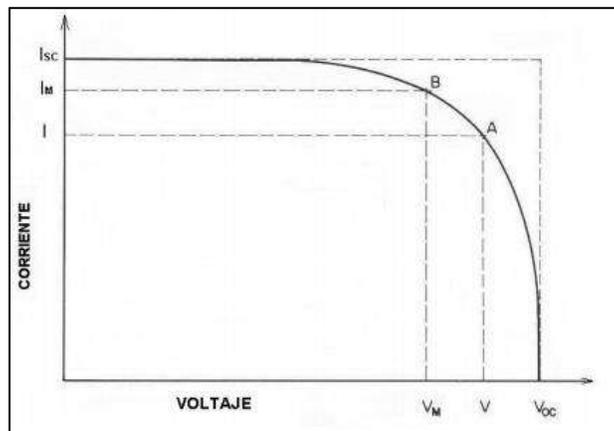
**Potencia máxima**: es la potencia máxima en vatios (w) que puede generar un módulo en las condiciones estándar de radiación incidente (1,000 w/m<sup>2</sup>).

**Corriente de máxima potencia**: Es aquella intensidad (A) que hace que la potencia sea máxima.

**Tensión nominal**: suele ser de 12 V o múltiplos de esa tensión.

**Curva corriente-tensión**: es la curva característica de los módulos fotovoltaicos. Define cada combinación posible de voltaje y corriente para un nivel de irradiación. El valor I<sub>sc</sub> corresponde a la corriente de cortocircuito y V<sub>oc</sub> corresponde al valor de la tensión en circuito abierto. Asimismo, V<sub>M</sub> e I<sub>M</sub> corresponden a los valores de tensión de máxima

potencia y corriente de máxima potencia respectivamente. Una curva I-V característica se muestra en la ilustración 1.7.



**Ilustración 1.7. Curva V-I de un panel solar.**

**Fuente: Hualpa. 2006.**

### 1.3.2 Eólica

Los módulos eólicos son las turbinas eólicas que aprovechan la energía cinética del viento. La ilustración 1.8 muestra una turbina eólica.



**Ilustración 1.8. Módulo eólico de referencia**

**Fuente: TODOPRODUCTIVIDAD**

La energía eléctrica producida en un periodo de tiempo se puede calcular según la expresión (46).

$$E_w = \frac{1}{2} \times \rho \times C \times A \times V^3 \times \Delta t \dots (46)$$

Donde:

$\rho$  : La densidad del aire. Su valor estándar es de  $1.225 \text{ kg/m}^3$

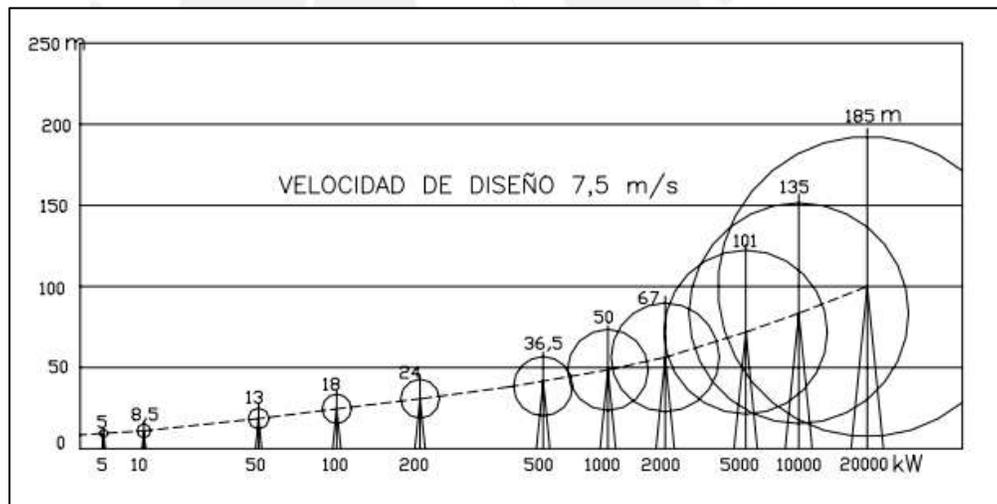
$V$ : La velocidad del viento. Su valor se expresa en metros por segundo. La magnitud varía durante el año según la zona a analizar.

$A$  : El área que atraviesa el flujo de aire corresponde es el área del círculo cuyo radio es el aspa de las turbinas eólicas.

$\Delta t$ : El tiempo medido en horas según el periodo para el cual se quiera medir la energía producida.

Las características principales de los módulos eólicos son:

Potencia máxima: Medida en kilowatts. Está directamente relacionada con el diámetro de las turbinas. La ilustración 1.9 muestra algunos valores típicos de diámetros de turbinas eólicas según la potencia máxima deseada.



**Ilustración 1.9. Valores típicos de diámetros de turbinas eólicas.**

**Fuente: Hualpa. 2006.**

Velocidad de diseño: A esta velocidad el generador funciona a su potencia nominal.

Velocidad de arranque: Con esta velocidad del viento el rotor vence la inercia y la turbina empieza a girar.

Velocidad de inicio de carga: A esta velocidad el rotor alcanza las RPM necesarias para que el voltaje del generador supere el del banco de baterías y se pueda almacenar energía eléctrica.

Velocidad de protección: A esta velocidad el generador funciona a la potencia máxima.

### **1.3.3 Componentes de los sistemas híbridos**

Además de los respectivos módulos de cada tecnología, un sistema híbrido está compuesto por otros componentes que se exponen a continuación.

#### **1.3.3.1 Acumuladores de energía**

El objetivo de la acumulación de energía es evitar la dependencia del carácter cíclico y los factores climatológicos. Los acumuladores pueden ser primarios, si no pueden regenerarse y secundarios, si pueden volver a cargarse haciendo pasar una corriente eléctrica en el sentido contrario de la descarga. Los acumuladores más comunes son de plomo/ácido dada la relación entre prestaciones y precio.

Voltaje: Dado que los paneles trabajan a 12 V, las baterías suelen tener una tensión múltiplo de ese valor. Durante una descarga la densidad del ácido adentro de a batería disminuye haciendo que disminuya también la tensión.

Intensidad de corriente: Es la intensidad con la cual se carga y descarga la batería. La resistencia a la deformación mengua el efecto de las descargas intensas, mientras que para descargas prolongadas es adecuado que la batería tenga mayor porosidad.

Capacidad: Es medida en amperios hora (Ah) y corresponde a la carga que se puede extraer sin que la batería sufra daños irreversibles disminuyendo su vida útil.

Ciclo de vida: La vida útil del acumulador depende de la periodicidad de los ciclajes y de su profundidad; esto es, con qué frecuencia se realiza un ciclo de carga y descarga y en qué porcentaje se realiza.

### 1.3.3.2 Controlador o regulador

Suministra la tensión y la intensidad de corriente que debe llegar a la batería de acuerdo al estado en que se encuentre. Asimismo, interrumpe la carga una vez que esta ha completado y brinda protección en contra descargas excesivas interrumpiendo el consumo ante una caída de tensión. Cumple también la función de mantener a las baterías en estado de flotación, esto es, en estado de máxima carga en los días en que no hay consumo.

### 1.3.3.3 Inversor

Se encarga de transformar la corriente continua en corriente alterna. En Perú se requiere que los equipos en corriente continua usen los parámetros de 220V y 60 Hz.

De acuerdo a su tipo de onda pueden ser: cuadrada, semisenoidal y senoidal; siendo estos últimos los que protegen más los equipos de consumo.

### 1.3.4 Interconexión de elementos

En este acápite se describen las formas de interconectar paneles y baterías.

#### 1.3.4.1 Paneles

Los paneles a conectar deben ser del mismo fabricante y contar con las mismas características. Los paneles pueden conectarse de tres formas: serie, paralelo y mixto.

- i. Serie: la tensión de salida es la tensión de un módulo por el número de módulos en serie y la intensidad de corriente es la misma que en un módulo individual. La ilustración 1.10 muestra la conexión de paneles en serie.

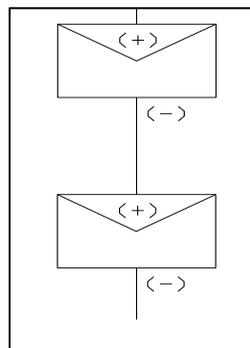


Ilustración 1.10. Conexión de paneles en serie.

Elaboración propia

En este tipo de conexión se cumple la expresión (47).

$$V_G = V_M \times N_S \dots (47)$$

Donde:

$V_G$  : Tensión del campo generador (V).

$V_M$  : Tensión individual de cada módulo (V).

$N_S$  : Número de paneles en serie.

- ii. Paralelo: la tensión de salida es la misma que en un módulo individual y la intensidad de salida es la intensidad individual multiplicada por el número de ramas en paralelo. La ilustración 1.11 muestra la conexión de paneles en paralelo.

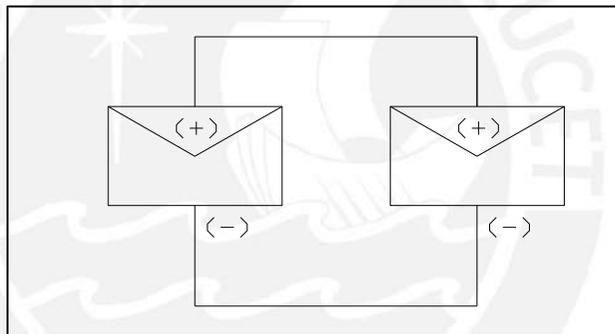


Ilustración 1.11. Conexión de paneles en paralelo

Elaboración propia

En este tipo de conexión se cumple la expresión (48).

$$I_G = I_M \times N_P \dots (48)$$

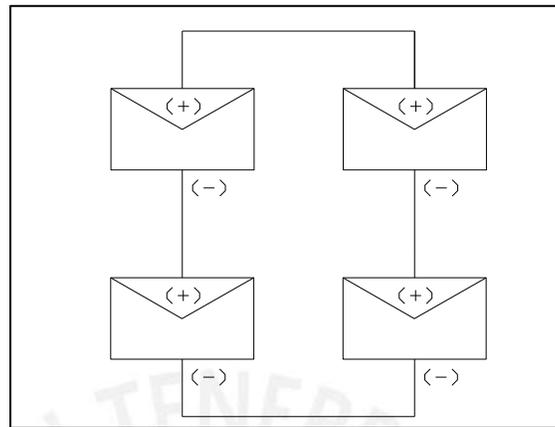
Donde:

$I_G$  : Intensidad de corriente del campo generador (A).

$I_M$  : Intensidad individual de cada módulo (A).

$N_P$  : Número de paneles en paralelo.

- iii. Mixto: es una combinación de módulos en serie y paralelo. La ilustración 1.12 muestra la conexión de paneles en serie y paralelo.



**Ilustración 1.12. Conexión de paneles en serie y paralelo**

**Elaboración propia**

En este tipo de conexiones se cumplen las expresiones (47) y (48). Adicionalmente, para todo tipo de conexión de paneles se cumple la expresión (49)

$$P_{pG} = P_{pM} \times N_T \dots (49)$$

Donde:

$P_{pG}$  : Potencia pico del campo generador (w).

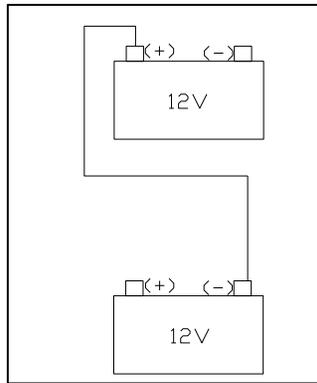
$P_{pM}$  : Potencia pico individual de cada módulo (w).

$N_T$  : Número de paneles en total.

#### 1.3.4.2 Baterías

Las baterías, al igual que los paneles, no deben ser conectadas con otras de distintas características. Pueden conectarse de tres formas: serie, paralelo y mixto.

- i. Serie: la capacidad se mantiene como la de una batería individual pero la tensión se multiplica por el número de baterías en serie. La ilustración 1.13 muestra la conexión de baterías en serie.



**Ilustración 1.13. Conexión de baterías en serie.**

**Elaboración propia**

En este tipo de conexión se cumple la expresión (50)

$$V = V_B \times N_{BS} \dots (50)$$

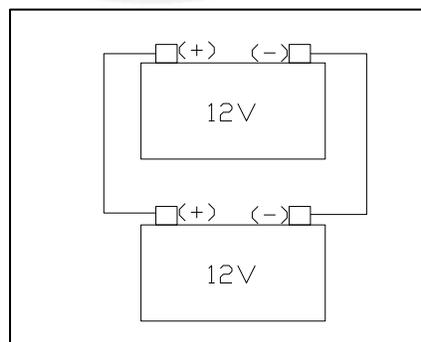
Donde:

$V_G$  : Tensión del campo generador (V).

$V_M$  : Tensión individual de cada módulo (V).

$N_S$  : Número de paneles en serie.

- ii. Paralelo: la tensión se mantiene pero la capacidad se multiplica por el número de baterías en paralelo. La ilustración 1.14 muestra la conexión de baterías en paralelo.



**Ilustración 1.14. Conexión de baterías en paralelo.**

**Elaboración propia**

En este tipo de conexión se cumple la expresión (51)

$$C_{RB} = C_B \times N_{BP} \dots (51)$$

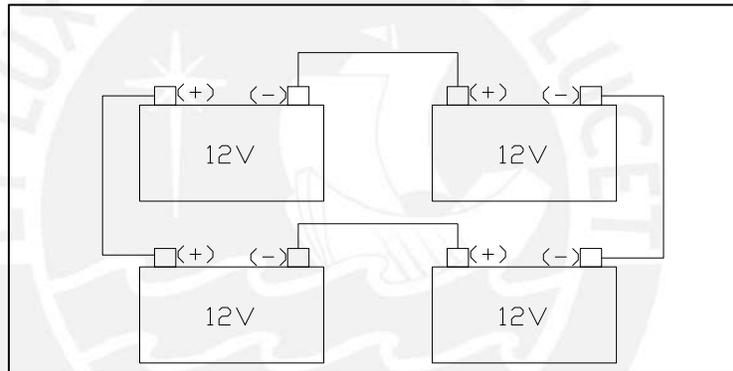
Donde:

$V_G$  : Tensión del campo generador (V).

$V_M$  : Tensión individual de cada módulo (V).

$N_S$  : Número de paneles en serie.

- iii. Mixto: es una combinación de los dos anteriores. La ilustración 1.15 muestra la conexión de baterías en serie y paralelo. En este tipo de conexión se cumple las ecuaciones en (51) y (50).



**Ilustración 1.15. Conexión de baterías en serie y paralelo.**

**Elaboración propia**

Finalmente, la ilustración 1.16 muestra un esquema de conexión eléctrica para un sistema híbrido.

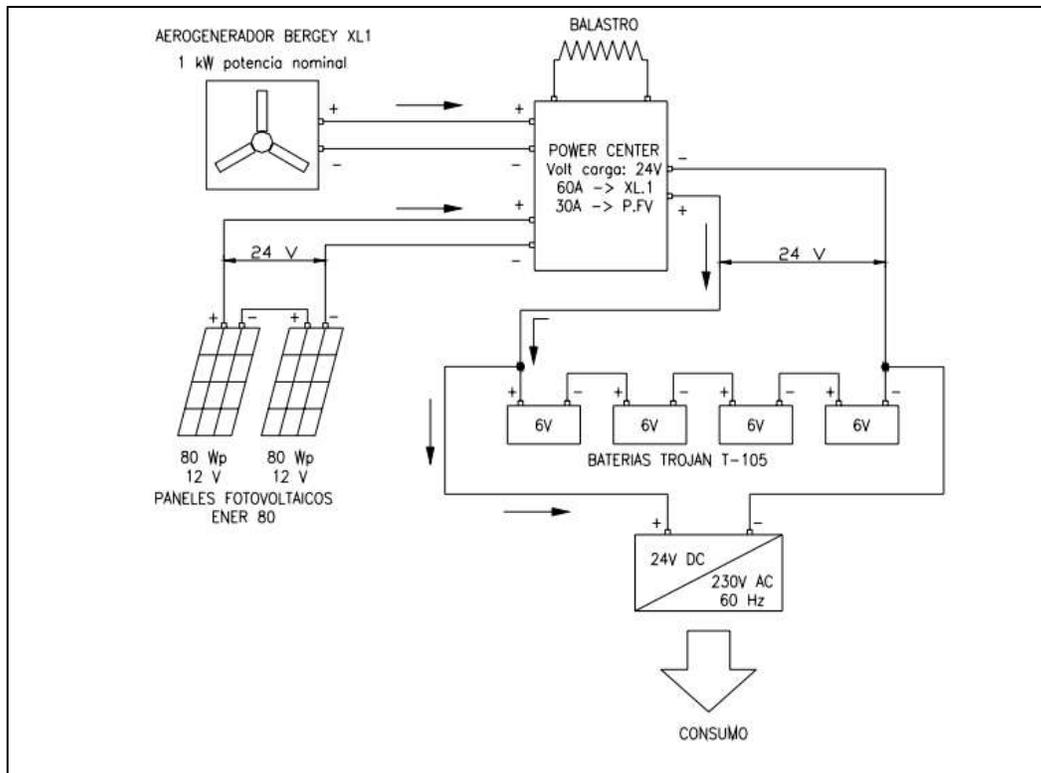


Ilustración 1.16. Esquema de conexión eléctrica de un sistema híbrido

Fuente: Hualpa. 2006

### 1.3.5 Cálculo de la capacidad de los componentes

En este acápite se detallan como calcular las capacidades de los equipos de balance: baterías, regulador e inversor. Para ello, primero se determina cómo calcular la energía requerida por el sistema híbrido.

#### 1.3.5.1 Cálculo de la energía requerida

La energía que debe suministrar el sistema híbrido será la demanda energética de los equipos de consumo, tomando en cuenta la eficiencia del inversor y del regulador como se señala en la expresión (52).

$$\text{Energía diaria requerida } (E) = \frac{E_{CC}}{\eta_{reg}} + \frac{E_{CA}}{\eta_{reg} \times \eta_{inv}} \dots (52)$$

Donde:

$E_{CC}$  : Energía demandada por los equipos que requieren corriente continua (kW-h).

$E_{CA}$  : Energía demandada por los equipos que requieren corriente alterna (kW-h).

$\eta_{reg}$  : Eficiencia del regulador

$\eta_{inv}$  : Eficiencia del inversor

### 1.3.5.2 Cálculo del número de baterías

El conjunto de baterías debe tener una capacidad (Ah) que depende de los días de autonomía y del porcentaje de descarga permitido por sus elementos. La fórmula para el cálculo se muestra en la expresión (53).

$$\text{Capacidad requerida } (C_{RB}) = \frac{E \times D}{DOC \times V} \dots (53)$$

Donde:

$E$  : Energía diaria requerida por el sistema (kW-h).

$D$  : Días de autonomía definidos.

$DOC$  : Porcentaje máximo de descarga.

$V$  : Tensión de trabajo del banco de baterías (V).

Asimismo, habiendo definido la capacidad requerida del banco, el número de ramas en paralelo se calcula mediante la expresión (54).

$$\text{Número de ramas en paralelo } (N_{BP}) = \frac{C_{RB}}{C_B} \dots (54)$$

Donde:

$C_{RB}$  : Capacidad requerida del banco de baterías.

$C_B$  : Capacidad individual de las baterías.

Finalmente para que la tensión de trabajo sea la misma tensión del sistema se usa un número de baterías en serie en cada rama que se calcula mediante la expresión (55).

$$\text{Número de baterías en serie } (N_{BS}) = \frac{V}{V_B} \dots (55)$$

Donde:

$V$  : Tensión de trabajo del banco de baterías.

$V_B$  : Tensión individual de las baterías.

### 1.3.5.3 Cálculo de la capacidad del regulador

La capacidad del regulador se define como la intensidad de corriente (A) que puede recibir por la potencia del campo generador a la tensión del sistema. Se calcula mediante la expresión (56).

$$\text{Capacidad requerida del regulador } (C_R) = \frac{P}{V_G} \dots (56)$$

Donde:

$P$  : Potencia del campo generador (w).

$V_G$  : Tensión del sistema (V).

### 1.3.5.4 Cálculo de la capacidad del inversor

La capacidad del inversor (w) es la suma de las potencias de consumo de los equipos que requieren corriente alterna tomando en consideración la eficiencia del inversor. Se calcula mediante la expresión (57).

$$\text{Capacidad del inversor } (C_{inv}) = \frac{\sum P_{CA}}{\eta_{inv}} \dots (57)$$

Donde:

$\sum P_{CA}$  : Suma de las potencias de consumo en corriente alterna.

$\eta_{inv}$  : Eficiencia del inversor.

## 1.4 Marco legal de las energías renovables en el Perú

El marco legal está constituido por cada una de las leyes que determinan la participación de las diferentes entidades en la electrificación rural y el uso de energías renovables. Asimismo, indica cuáles son los lineamientos para los proyectos de este rubro. La tabla 1.7, que se presenta más adelante en este acápite, resume las leyes que se describen a continuación y el anexo 1 muestra un esquema del marco legal.

### 1.4.1 Ley de concesiones eléctricas

El decreto de ley N° 25844 en su artículo 3, menciona lo siguiente:

Se requiere concesión para el desarrollo de cada una de las siguientes actividades:

- a) La generación de energía eléctrica que utilice recursos hidráulicos y geotérmicos cuando la potencia instalada mayor a 20 MW;
- b) La transmisión de energía eléctrica, cuando las instalaciones afecten bienes del Estado y/o requieran la imposición de servidumbre por parte de éste;
- c) La distribución de energía eléctrica con carácter de Servicio Público de Electricidad, cuando la demanda supere los 500 KW (Congreso de la República, 2007).

Puede notarse que la autogeneración de electricidad para uso domiciliario (potencias relativamente bajas) mediante recursos energéticos renovables no está contemplada en ninguno de estos cuatro casos por lo que se concluye que, de acuerdo a ley, no se requiere de concesión para dicha actividad y no se paga impuestos por la misma.

### 1.4.2 Decreto legislativo de promoción de la inversión para la generación de electricidad con el uso de energías renovables

El decreto legislativo N°1002 menciona el interés por parte del estado en el aumento de la participación de las fuentes de energías renovables en la generación de electricidad:

Artículo 2.- Declaratoria de interés nacional y participación de la energía con RER<sup>6</sup> en la matriz de generación de electricidad

2.1 Declárese de interés nacional y necesidad pública el desarrollo de nueva generación eléctrica mediante el uso de RER.

2.2 El Ministerio de Energía y Minas establecerá cada cinco (5) años un porcentaje objetivo en que debe participar, en el consumo nacional de electricidad, la electricidad generada a partir de RER, no considerándose en este porcentaje objetivo a las centrales hidroeléctricas. Tal porcentaje objetivo será hasta el cinco por ciento (5%) en cada uno de los años del primer quinquenio (Congreso de la República, 2010).

Tal mención indica que cada dos años se busca incrementar en al menos 5 % la participación de RER (Recursos de Energías Renovables) declarándolo un objetivo de

---

<sup>6</sup> RER son las siglas de Recursos Energéticos Renovables.

interés nacional el cual, definitivamente, se alinea a los intereses de la propuesta presentada.

#### **1.4.3 Ley de promoción y utilización de recursos energéticos renovables no convencionales en zonas rurales, aisladas y de frontera del país**

La ley N° 28546 busca promover el uso de fuentes de energías renovables específicamente en el ámbito de la electrificación rural:

##### Artículo 1º.- Objeto de la Ley

La presente Ley tiene por objeto promover el uso de las energías renovables no convencionales para fines de electrificación, con el fin de contribuir al desarrollo integral de las zonas rurales, aisladas y de frontera del país, así como mejorar la calidad de vida de la población rural y proteger el medio ambiente.

Debe notarse que la zona en cuestión puede ser considerada como aislada dada su condición de carencia de electricidad por medios formales y la aplicación de un proyecto de electrificación por parte del estado usando fuentes de Energías Renovables es, de acuerdo a dicha ley, objeto de interés que el Estado busca fomentar y que se alinea al marco legal anterior antes presentado.

##### Artículo 2º.- Ámbito de aplicación

Esta norma es de aplicación a los proyectos de electrificación basados en energías renovables no convencionales, que se desarrollen en zonas calificadas como rurales, aisladas y de frontera del país, de acuerdo a lo establecido en el artículo 3º de la Ley N° 27744, Ley de Electrificación Rural y de Localidades Aisladas y de Frontera (Congreso de la República, 2005).

#### **1.4.4 Ley de electrificación rural**

La ley N° 27744 en su artículo 3, define el ámbito de aplicación de la ley descrita en el acápite 1.4.3:

Artículo 3º.- Definición económica de zonas rurales, localidades aisladas y zonas de frontera:

Las zonas rurales, localidades aisladas y zonas de frontera del país, para efectos de la presente Ley, se consideran aquellas en que los niveles de rentabilidad financiera de las inversiones de electrificación no son necesariamente atractivos a la participación privada y

requieren del rol subsidiario del Estado por tener una alta rentabilidad social (Congreso de la República, 2002).

Asimismo, en el artículo 7 de esta misma ley se indica la contribución que cada usuario conectado al SEIN (Sistema Eléctrico Interconectado Nacional) debe hacer de acuerdo a su consumo:

“El aporte de los usuarios de electricidad, de 2/1000 de 1 UIT por Megavatio hora facturado, con excepción de aquellos que no son atendidos por el Sistema Interconectado Nacional”.

Con esto queda claro que cada usuario conectado al SEIN contribuye a la electrificación rural con un aporte monetario.

#### 1.4.5 Generación distribuida

Cabe resaltar que no existe en el país la infraestructura para implementar sistemas bidireccionales de generación de electricidad, esto es, en donde la electricidad fluya tanto de los sistemas de autogeneración de los hogares hacia un sistema de almacenamiento como viceversa y legalmente no se cuenta con una ley de “Generación Distribuida” como en Brasil, la cual permite no solo en muchos casos un ahorro al 100 % de la tarifa sino la posibilidad de obtener una ganancia por la venta de la energía a la red interconectada.

#### 1.4.6 Resumen de especificaciones legales

La tabla 1.7 resume cada ley relevante respecto a la propuesta y lo que esta implica.

Tabla 1.7. Resumen del marco legal y su implicancia

Ley	Implicancia
Decreto de Ley N° 28544	No se requiere de concesión ni de pago de impuestos para actividades de autogeneración a pequeña escala.
Decreto Legislativo N°1002	Se persigue un aumento cada dos años del 5 % en la participación de las energías renovables en la generación eléctrica
Ley N°28546	Se busca contribuir al desarrollo de zonas aisladas mediante la generación de electricidad a base de fuentes de energías renovables
Ley N° 27744	Define el ámbito de aplicación de la ley N° 28546 y también que todos los usuarios conectados al SEIN contribuimos a la electrificación rural.
Generación distribuida	Su carencia implica la imposibilidad de acceder a las ventajas de generar electricidad para autoconsumo y a su vez vender el excedente a una red de distribución para generar mayores ahorros o ingresos.

Elaboración propia

La tabla 1.8 indica los organismos relacionados con la electrificación rural.

Tabla 1.8. Organismos relacionados con la electrificación rural

Organismos	Función principal en la electrificación rural
Ministerio de Energía y Minas (MEM)	El principal ministerio responsable del suministro de energía eléctrica a nivel de gobierno central
Ministerio de Educación y Cultura	Electrificación de escuelas
Ministerio de Salud	Electrificación de postas médicas
ADINELSA	Operación y mantenimiento de proyectos no rentables implementados por el gobierno
FONCODES	Electrificación a la solicitud de los poblados de escasos recursos
PRONAMACHCS	Electrificación de poblados agrícolas
Gobiernos regionales	Principal organismo responsable a nivel regional
Empresa de suministro eléctrico	Electrificación en base a la existencia de redes existentes
ONG	Electrificación utilizando los fondos de gobierno u organismos internacionales

Fuente: Ministerio de Energía y Minas. 2008

## 1.5 Herramientas de mejora de procesos utilizadas

En este apartado se analizarán las herramientas de Ingeniería Industrial que se utilizarán a lo largo del capítulo 2.

### 1.5.1 Análisis de Pareto

El análisis de Pareto fue propuesto por Vilfredo Pareto quien establece que el 20% de las causas totales generan el 80% de los efectos totales. Así, el 20% de las personas poseen 80% de la riqueza, por ejemplo. Esto sugiere que existe una gran cantidad de causas triviales frente a unas pocas importantes.

Un diagrama de Pareto es un tipo especial de gráfica de barras donde los valores graficados están organizados de mayor a menor. El principal uso que tiene el elaborar este tipo de diagrama es para poder establecer un orden de prioridades en la toma de decisiones dentro de una organización (Minitab, 2017). La ilustración 1.17 muestra un ejemplo de un diagrama de Pareto.

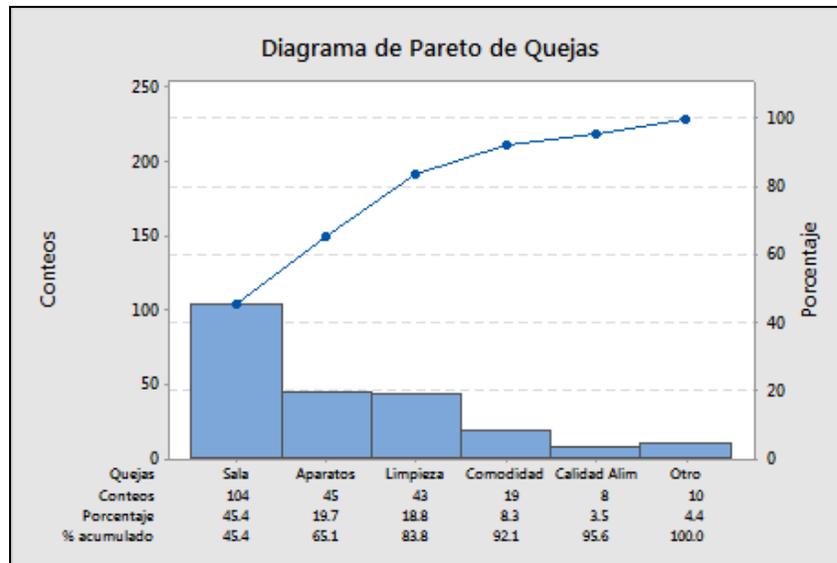


Ilustración 1.17. Ejemplo de diagrama de Pareto.

Fuente: Minitab. 2017.

Por otro lado, un diagrama de Pareto ponderado no solamente considera la frecuencia de ocurrencia, sino también su importancia. El factor que determina la importancia de las causas suele ser el costo pero podría ser cualquier elemento al que se desee hacer un seguimiento. La ilustración 1.18 ejemplifica un diagrama de Pareto ponderado.

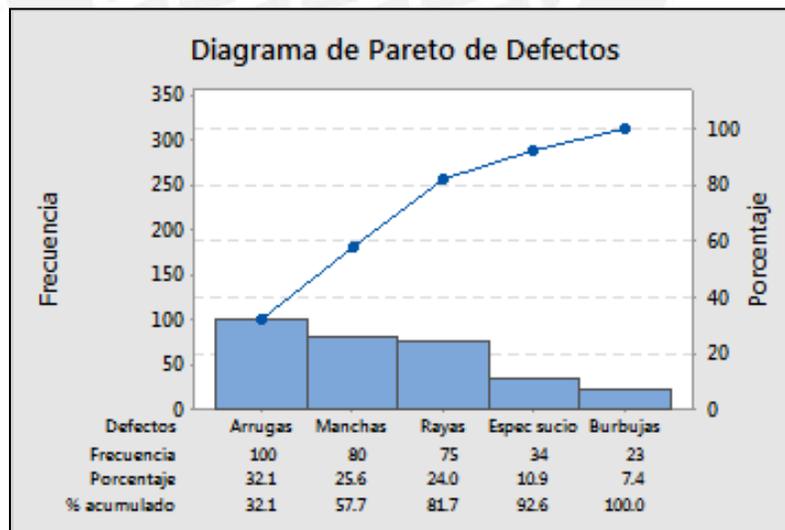


Ilustración 1.18. Ejemplo de diagrama de Pareto Ponderado.

Fuente: Minitab.2017

### 1.5.2 Diagrama de Ishikawa

Un diagrama de Ishikawa (también llamado diagrama causa y efecto) es una herramienta de lluvia de ideas que permite investigar las diversas causas que influyen en un efecto específico. Las causas en este diagrama se organizan con frecuencia en cinco categorías principales denominadas “5M” y son: Mano de Obra, Máquina, Materia Prima, Métodos, Medio ambiente. Algunas aplicaciones específicas añaden a las cinco categorías el Personal o el Procedimiento. Sin embargo, es posible usar cualquier clase de causa que se desee investigar (Minitab, 2017). La ilustración 1.19 muestra un ejemplo de diagrama de Ishikawa.

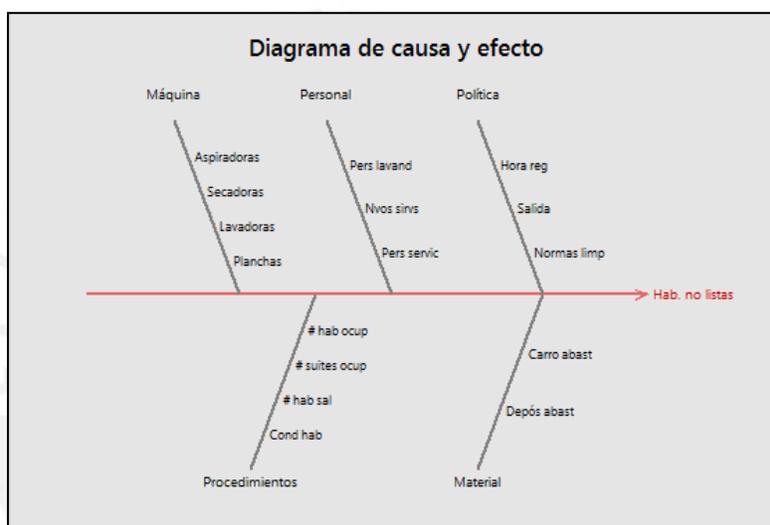


Ilustración 1.19. Ejemplo de un diagrama de Ishikawa.

Fuente: Minitab. 2017

### 1.5.3 Matriz de Probabilidad-Impacto

La matriz de Probabilidad e Impacto es una herramienta útil para priorizar los fenómenos que generan problemas de tal manera que se puedan concentrar los esfuerzos en estudiar solo aquellos cuya contribución esperada al desarrollo de problemas sea meritoria (Puga, 2015).

### 1.5.4 Método *why-why*

El método *why-why* es útil para investigar la causa raíz de un problema. Así, tras haber identificado y priorizado los problemas (con el análisis de Pareto), haber definido cuáles son las causas de esos problemas (Diagrama de Ishikawa) y haber definido cuáles de

esas causas deben ser priorizadas (Matriz Probabilidad- Impacto), la existencia de cada una de ellas será cuestionada hasta encontrar la causa raíz que la origina. También suele llamarse el método de los cinco porqués. Cabe mencionar que el cinco sugiere que se realicen estos cuestionamientos en varias interacciones. Asimismo, es el analista quien decide cuándo parar de cuestionar (Puga, 2015).

### 1.5.5 Matriz FACTIS

La matriz FACTIS es una matriz de selección mediante la cual se evalúa la factibilidad y adecuación de diversas soluciones a considerar frente a un problema en particular. Para ello, primero es necesario definir una serie de criterios y su ponderación. En el caso de la matriz FACTIS, cada letra corresponde a un criterio: Facilidad, Afectación a otras áreas, Calidad, Tiempo, Inversión y Seguridad. Así, cada solución es posteriormente evaluada en base a cada criterio y obtendrá una puntuación de acuerdo a la ponderación previamente realizada. Finalmente, la alternativa con mejor puntuación resulta ser la mejor de acuerdo a este método. Cabe resaltar que se evaluarán las soluciones a las causas raíces encontradas mediante el método 5WH. La ilustración muestra un ejemplo de matriz FACTIS (Robbins, 2014). La ilustración 1.20 muestra un ejemplo de la elaboración de una matriz FACTIS.

Criterios de Selección	Factor de Ponderación	Causa Raíz	Propuestas de solución	Peso					Total	
				F	A	C	T	S		
F Facilidad para solucionar 1.Difícil 2.Fácil 3.Muy Fácil	4	No se realiza programas de capacitación para realizar el secado de materia prima	Implementar programas de capacitación	2	1	3	3	3	2	54
A Afecta a otras áreas su implementación 1.No 2.2 áreas 3.+ de2 áreas	1	No existe un procedimiento para realizar el secado	Definir procedimiento detallado de manejo de secadores acorde al tipo de producto	1	1	2	3	3	2	44
C Mejora la calidad 1.Baja 2.Media 3.Alta	6		Estandarizar tiempos de secado acorde al tipo de producto	2	1	2	3	3	1	45
T Tiempo de implementación 1.Mayor 4 2.Entre 2 a 4 3.menos 4 meses meses meses	5	No existe un procedimiento de supervisión	Definir e implementar el procedimiento de supervisión	2	1	2	3	3	3	51
I Inversión requerida 1.Alta 2.Media 3.Baja	2	Variación del tiempo de secado por reparación de maquinaria	Después de la reparación el área de mantenimiento informe los nuevos tiempos de secado	1	2	2	2	2	2	38
S Seguridad de mejora 1.Poco 2.Medio 3.Mucho	3									

Ilustración 1.20. Ejemplo de matriz FACTIS.

Fuente: Universidad Continental. 2014

## **CAPÍTULO 2: DIAGNÓSTICO SITUACIONAL**

El presente capítulo tiene por objetivo describir la situación actual de los hogares agropecuarios de Lomo de Corvina, identificar sus problemas y priorizarlos para luego hallar las causas raíces de los problemas más importantes. Posteriormente, se analizan las posibles contramedidas para solucionar dichos problemas con el objetivo de seleccionar la más conveniente.

Se inicia explicando los orígenes y dando una descripción general del asentamiento humano, insertando también el papel que juegan los hogares agropecuarios en él, para luego centrarse en mostrar su realidad y la necesidad de servicios básicos que tienen cuantitativamente.

Debido a la falta de información oficial, se presenta información de los hogares agropecuarios de Villa El Salvador que sirve como referencia para los hogares agropecuarios de Lomo de Corvina. El anexo 2 presenta más información de los pobladores de Lomo de Corvina. Los anexos 3, 4 y 5 presentan el consumo energético de Lima y Villa El Salvador.

### **2.1 Orígenes y ubicación geográfica de Lomo de Corvina**

Los asentamientos humanos tienen su origen en Lima en la década de 1920 y han seguido diversos periodos de desarrollo condicionados por factores tales como la disminución de espacios libres en el área central, la migración y las políticas oficiales de permitir las invasiones de terrenos eriazos de propiedad pública. En los últimos años los otros distritos llamados «periféricos» han experimentado un acelerado proceso de crecimiento poblacional. Y es que los asentamientos humanos que albergan estos distritos populares constituyen lugares donde recalán familiares, alojados o inquilinos precarios que ingresan cada año al sistema informal de vivienda que invaden terrenos reservados a usos públicos y equipamiento comunal (Municipalidad de Villa El Salvador [MUNIVES], s.f. a).

De acuerdo a la clasificación distrital de pobreza relativa, mencionada por Fernando Tuesta Soldevilla (2015) en el libro: "Tendencias de Crecimiento Urbano de Lima Metropolitana al año 2015", publicado por el INEI, Lima es calificada como una ciudad de grandes contradicciones donde "cerca del 80% de su población vive en asentamientos

urbanos populares y el resto en barrios medios y residenciales" (como se citó en Flores, 2005, p.9).

El distrito de Villa El Salvador se encuentra ubicado en la Costa Central del departamento de Lima, a 20 Km. al sur del centro histórico, y forma parte de los distritos del Área Sur de Lima. Se ubica aproximadamente entre los paralelos 12°12'34" latitud Sur y los 76°56'08" de longitud Oeste, y a 175 metros sobre el nivel del mar. (Villanueva, 2006, p.10)

Con el tiempo, la ciudad alcanza a Villa El Salvador y la envuelve, pasando de ser un distrito periférico a formar parte del llamado Cono Sur de Lima Metropolitana. Debido a la presión social se incrementó el espacio para la zona residencial, abarcando zonas no aptas para ser habitadas. Entonces, se reduce la zona industrial y se convierte predominantemente en una zona de comercio metropolitano de muebles, calzado y otros rubros, así como de viviendas talleres. Así, se obtiene una zona agropecuaria subutilizada y en proceso de cambio debido a la falta de sostenibilidad del uso y a la fuerte presión urbana por grandes terrenos en la ciudad. Cuando Villa El Salvador se convirtió en distrito integró también más espacios con vocación agrícola, así como una zona arqueológica y playas, las cuales estaban y siguen estando desintegradas del área urbana principal (MUNIVES, s.f. b, p.27).

Actualmente, en las zonas más periféricas de Villa El Salvador hay viviendas que se han formado a partir de una invasión, las cuales pueden estar en una etapa inicial o precaria, en construcción o ya consolidada (MUNIVES, s.f. b). En el caso de las viviendas en etapa inicial o precaria, estas existen a partir de las ocupaciones que empezaron en la década de 1990 y se da en los asentamientos humanos de la zona I (límite con San Juan de Miraflores), la zona IV y V (Zona de playa) y las zonas VI, VII y VIII. De este nivel, las asociaciones de la zona Lomo de Corvina, la cual es la más deprimida y la que tiene mayor número de habitantes y también mayor cantidad de litigios por terreno, no se tienen títulos de propiedad de los terrenos (16%) o en el mejor de los casos están en trámite (casi el 80% de las parcelas del Asentamiento Humano) (MUNIVES, s.f. b).

Lomo de Corvina "se encuentra limitado por el Norte con la Asociación de Vivienda Rinconada de Villa, por el Sur con la prolongación de la Av. María Reiche, por el Oeste con la Av. Panamericana Sur, y por el Este con el pie del talud del Lomo de Corvina. Está conformado por la Cooperativa Colonización Vertientes, abarcando longitudinalmente con los asentamientos humanos: La Encantada, Mirador de Villa, 11 de Diciembre, Organización Social Collasuyo 28 de octubre, San Ignacio de Loyola, Ampliación Noveno Sector Grupo 6, Mirador de Villa 200 Millas, Los Jardines de Pachacamac, Edilberto

Ramos, Los Laureles de Villa, Ida Lossio y Villa de Mar” (Centro Peruano-Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigaciones de Desastres, 2011, p.11). La ONG Desco afirma que la zona fue ocupada por alrededor de 800 familias agrupadas en seis organizaciones vecinales (Ramírez y Riofrío, 2006, p.46).

## **2.2 Las zonas agropecuarias en Villa El Salvador**

En cuanto a la zona agropecuaria MUNIVES lo define así:

Es una gran extensión de territorio, de topografía accidentada, que debido a la falta de agua de regadío nunca cumplió completamente con el uso para la cual fue reservada. En la actualidad y debido a la presión urbana, sufre un proceso de cambio y consolidación de usos diferentes al que fue planificado. La presencia de grandes lotes y su cercanía con la Carretera Panamericana Sur ha permitido la inserción de usos industriales y comerciales, así como viviendas unifamiliares. Prueba de ello es la ubicación en la zona de los almacenes de las transnacionales SAGA FALABELLA y RIPLEY, así como del Mercado UNICACHI (MUNIVES, s.f. b, p.6).

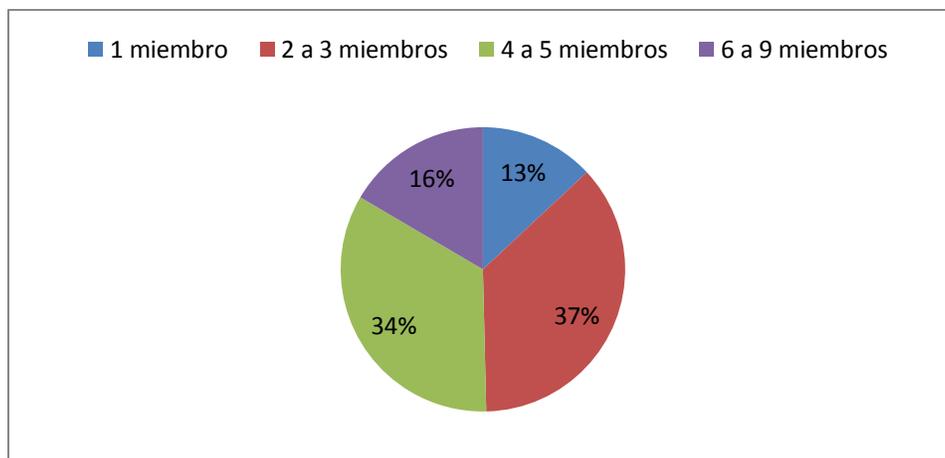
Por lo tanto, se trata de una densificación “de relleno”, puesto que el terreno, en principio, estaba destinado a otros usos (Ramírez y Riofrío, 2006, p.30).

Así, toda la zona agropecuaria “es la principal reserva ecológica del distrito, y se encuentra al Noroeste. Allí se realizan proyectos de tratamiento de aguas servidas mediante lagunas de oxidación [...]. La zona también tiene otros usos como el Cementerio Municipal y el Campo Santo Nuestra Señora de la Nube, la cual no cuenta con espacios públicos. Está formada por 4 sectores principales: Lomo de Corvina (también conocido como Zona Agropecuaria CIZAVES), la Asociación Agrícola de Granjeros ‘La Concordia, la Sociedad de Unión de Colonizadores de la Tabla de Lurín (SUC) y la Sociedad Agropecuaria Villa Rica” (Villanueva, 2006, p.16).

En el acápite 2.3 se presentan estadísticas descriptivas de los 563 hogares agropecuarios de Villa El Salvador los cuales son tomados como referencia para los hogares agropecuarios específicamente de Lomo de Corvina.

## **2.3 Gestión de indicadores de los hogares agropecuarios en Villa El Salvador**

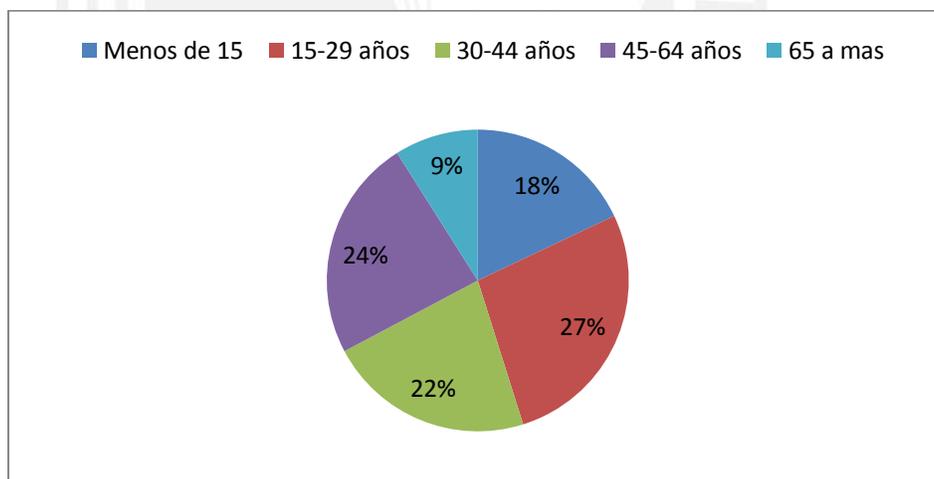
En cuanto a la composición de los hogares, los indicadores relevantes son el número de miembros que tienen y cómo se distribuyen las edades de sus miembros. La ilustración 2.1 indica el tamaño de los hogares.



**Ilustración 2.1. Tamaño del hogar en las unidades agropecuarias de Villa El Salvador**

Fuente: INEI. 2012

Así, en primer lugar, se puede ver en la ilustración 2.4 que en su mayoría no son familias demasiado extensas, pero tampoco son pequeñas. La gran mayoría están repartidos en los grupos de 2 a 3 miembros y de 4 a 5. La ilustración 2.2 muestra las edades de los miembros de estos hogares.

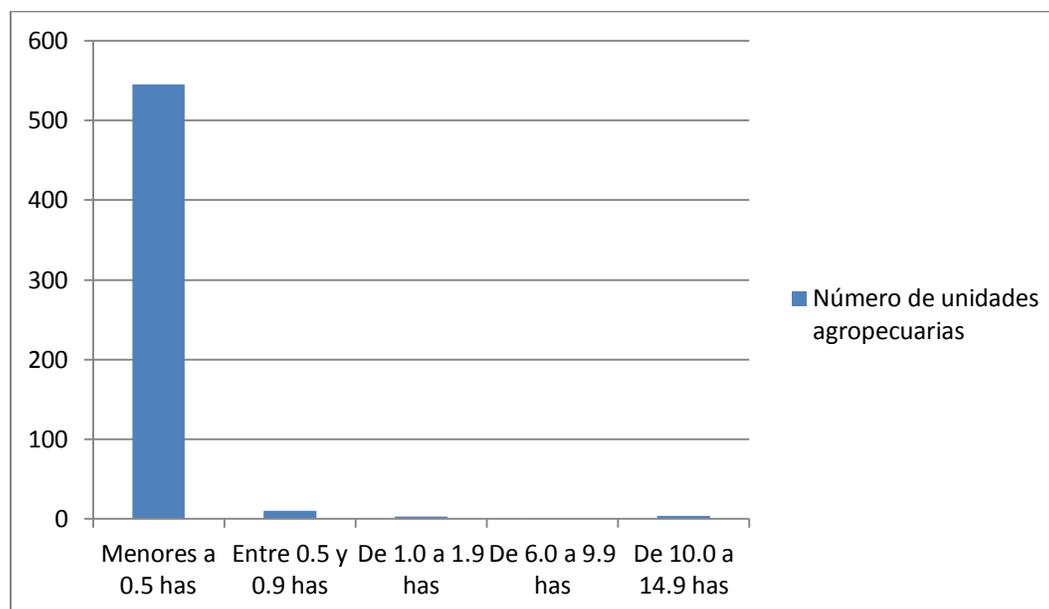


**Ilustración 2.2. Edades de las familias de las unidades agropecuarias de Villa El Salvador**

Fuente: INEI. 2012

De la ilustración se observa que no hay un grupo de edad mayoritario. De este modo, la heterogeneidad generacional revela la importancia de prestar atención a necesidades diferentes, según cada grupo de edad.

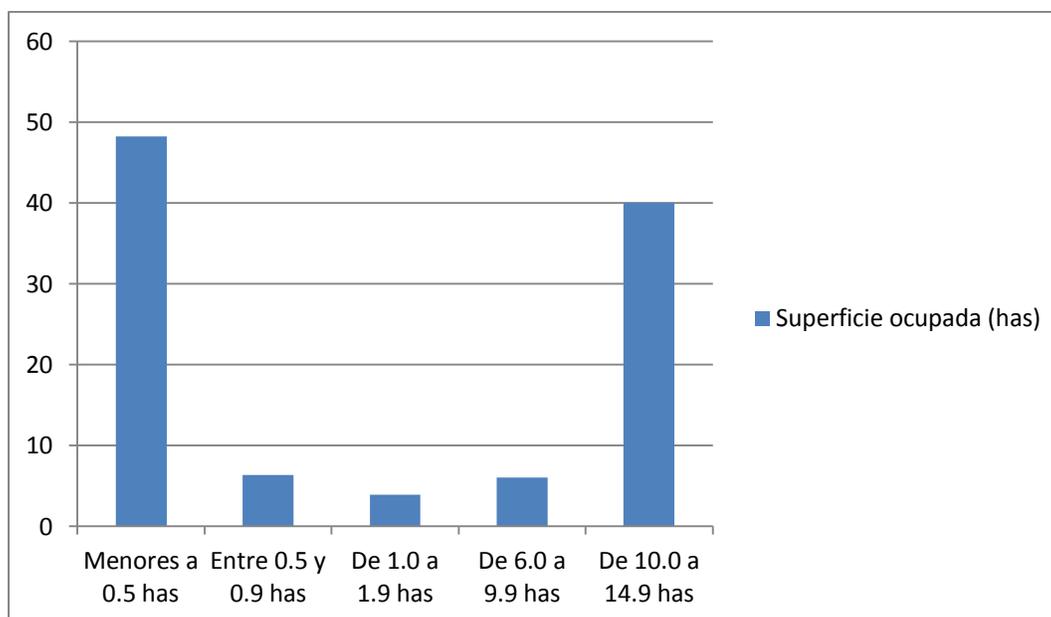
También resulta útil conocer la distribución de la superficie ocupada por estos hogares. Así, la ilustración 2.3 muestra el número de unidades agropecuarias que ocupan ciertos rangos de superficie.



**Ilustración 2.3. Número de hogares agropecuarios por tamaño.**

**Fuente: INEI. 2012**

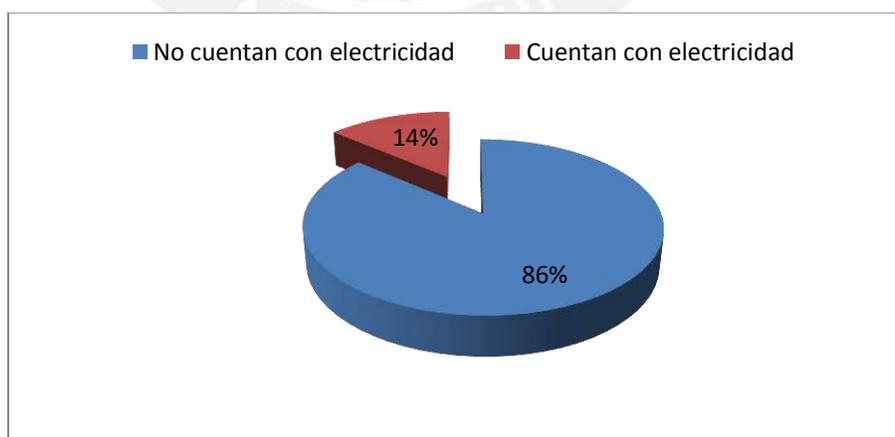
La ilustración 2.3 muestra que casi todos los hogares agropecuarios en VES poseen individualmente una superficie menor a 0.5 hectáreas. La superficie total que ocupan esta categoría y las demás puede apreciarse en la ilustración 2.4.



**Ilustración 2.4. Número de hogares agropecuarios por tamaño.**

**Fuente: INEI. 2012**

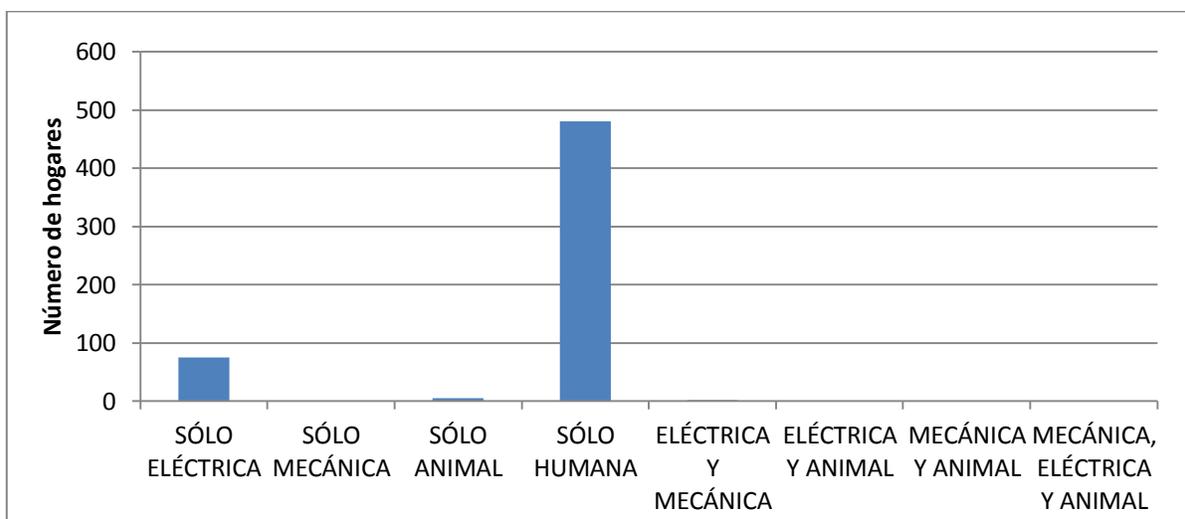
La ilustración 2.4 permite apreciar una desproporcionada distribución de la superficie agrícola. El área ocupada por las más de 500 unidades pequeñas en total no llega a las 50 hectáreas, mientras que 4 unidades juntas llegan casi a 40 hectáreas. Con respecto a las necesidades energéticas de los hogares, los indicadores relevantes son la carencia de luz eléctrica y las fuentes de energías usadas. La ilustración 2.5 indica el porcentaje de hogares que carecen de electricidad.



**Ilustración 2.5. Porcentaje de hogares agropecuarios con electricidad de Villa El Salvador**

**Fuente: INEI. 2012**

Debe notarse que esta carencia afecta a la mayoría de hogares agropecuarios en Villa El Salvador. Asimismo, la ilustración 2.6 indica las fuentes de energía usadas por los hogares.



**.Ilustración 2.6. Uso de tipos de energía por los hogares agropecuarios de Villa El Salvador**

**Fuente: INEI. 2012**

De la ilustración 2.6 se observa que son muy pocos los hogares que usan electricidad y la mayoría usa solo energía humana. Esta es una condición que limita el progreso del sector. En torno al desarrollo de la actividad agropecuaria en el Perú, el INEI afirma que este sector históricamente “ha sido también uno de los más pobres, respecto de los otros sectores de la economía, debido a las de medidas de política sectorial que adoptaba cada gobierno en su momento, las cuales no hacían sino restarle estabilidad y seguridad jurídica a la actividad agropecuaria” (INEI 2012). Sin embargo, ello no implica que el sector agropecuario en sí mismo no sea rentable. A lo que apunta esta explicación es a que son las políticas públicas o la falta de planificación en este rubro lo que han frenado al sector agropecuario durante mucho tiempo. Sin embargo, aunque actualmente aún no se ve un cambio radical en las políticas que se dan en este sector, “el Perú se ha convertido en una de las diez primeras naciones proveedoras de alimentos en el mundo y su agricultura creció a un promedio de 3,2% anual entre el 2011 y 2014” (América Economía, 2015).

## **2.4 Identificación y priorización de problemas**

En este acápite se identifican los problemas de los hogares agropecuarios específicamente de Lomo de Corvina y se cuantifican con el fin de priorizarlos. El acápite 2.4.1 muestra las evidencias que permiten identificar los problemas y en el acápite 2.4.2 se priorizan los problemas identificados usando un diagrama de Pareto.

### **2.4.1 Identificación de problemas**

Existen problemas con los servicios básicos. En el caso del distrito de VES y específicamente en Lomo de Corvina "No hay servicios básicos, el único lugar con energía eléctrica es 11 de Diciembre, zona que vio la luz cuando sufrió un voraz incendio" (La República, 2007). El diario La República entrevistó a un poblador, quien explicó la situación: "Comprar agua todos los días es más caro que en las zonas residenciales. Cada tacho grande de agua nos cuesta S/ 1.50 y si lo multiplicamos por 30 días, pagamos S/ 45. ¿Ve? Resulta tonto, pero es así. Somos los que tenemos menos recursos los que pagamos más". Asimismo, se sabe que el 44% de los hogares en asentamientos humanos en VES no cuentan con servicio de agua, lo que sirve de referencia para los hogares agropecuarios afectados en Lomo de Corvina (MUNIVES, 2005, p.19).

En cuanto a la tenencia de luz, se explica que "la luz llegó a este lugar luego del incendio que se produjo el 11 de diciembre de 2002. Aquella vez 400 viviendas quedaron devastadas. Tras la tragedia llegaron las promesas y, por suerte, por primera vez se vio en esta zona postes y cableados nuevos, pero únicamente para la zona siniestrada, que bautizaron como 11 de Diciembre" (La República, 2007). A partir de esto, la zona de "11 de Diciembre" terminó encontrando una ganancia en la desgracia, y son los únicos que cuentan con conexiones formales de luz. [...] Ahora hay conexiones clandestinas, pues para tener luz la jalamos de 11 de Diciembre y pagamos 35 soles. Ellos abusan de nosotros porque saben que necesitamos de ella" (La República, 2007). Entonces, salvo por un único sector en Lomo de Corvina, el resto del asentamiento no tiene una conexión estable a la luz eléctrica, y solo acceden a ella cuando pueden pagarla.

Por otro lado, existe el problema de la inseguridad. El artículo realizado por el Diario La República anteriormente citado expresó que los habitantes de Lomo de Corvina se sentían inseguros porque el 53% de ellos afirman haber sido asaltados al menos una vez. Dado que el contexto en el que están ellos es más hostil que el contexto de la ciudad de Lima, se podría asumir que los asaltos pueden ser más agresivos, lo cual agrava ese

sentimiento de inseguridad. A la par, el concepto de vivir en viviendas inadecuadas se explica a partir de lo que expresa la ONG Desco, cuando explica que las personas que han ocupado espacios como los asentamientos humanos de VES ubican sus viviendas en lugares de alta vulnerabilidad cuyas posibilidades para obtener un nivel de calidad de vida aceptable aparece como muy difícil, por no decir imposible (Desco, 2015, p.14). Si bien no se dispone del porcentaje de viviendas inadecuadas para Lomo de Corvina se puede estimar en base al porcentaje de viviendas improvisadas de Villa El Salvador que corresponde a 29.6 % (MUNIVES, s.f. b, p.16).

#### **2.4.2 Priorización de problemas**

Los problemas descritos en el acápite 2.4.1 son: la carencia de luz eléctrica mediante conexiones adecuadas, la inseguridad, las viviendas inadecuadas y la carencia de servicios de agua potable.

Cabe mencionar que se entiende la carencia de luz eléctrica y la carencia de servicios de agua potable no como un concepto cerrado en el cual los hogares de Lomo de Corvina nunca reciben tales servicios; sino como que éstos no llegan de una forma estable y formal. En realidad, la tenencia de electricidad llega bajo redes clandestinas y el agua se vende por tachos; lo cual implica que las personas sólo acceden a estos servicios si es que pueden pagar por ellos y por el tiempo en el que los puedan pagar.

Como ya ha sido explicado previamente, las personas de Lomo de Corvina pagan mensualmente S/ 35 por una conexión clandestina de luz. Por otro lado, suponiendo que consuman un tacho de agua al día, tendrían que pagar S/ 45 mensualmente. Asimismo, en el trabajo de campo se preguntó a algunas personas que habían sido víctimas de un robo en cuánto estimaban el monto del mismo y este en promedio es S/ 20 al mes. Del mismo modo, se preguntó por un monto que las familias estiman pagar debido a la infraestructura inadecuada (esto incluye gastos como los artículos de limpieza que compran para contrarrestar la suciedad del ambiente que puede filtrarse a sus hogares o al uso de utensilios descartables por no contar con un lavadero) resultando que en promedio estiman gastar S/ 20 al mes. El porcentaje de pobladores afectado por cada uno de los cuatro problemas se extrae de los acápites 2.3 y 2.4.1. Con toda esta información se presenta la tabla 2.1 la cual permite priorizar los problemas asignándoles una ponderación que se calcula como el producto del porcentaje de hogares afectados y el costo económico en que incurrir.

Tabla 2.1. Priorización de problemas de los hogares agropecuarios en Lomo de Corvina<sup>7</sup>

Problema	% de la población	costo económico	Ponderación	Porcentaje
Carencia de luz	86.0%	35.0	30.1	45.0%
Inseguridad	53.0%	20.0	10.6	16.0%
Viviendas inadecuadas	29.6%	20.0	5.9	9.0%
Carencia de agua	44.0%	45.0	19.8	30.0%
TOTAL			66.4	100.0%

Elaboración propia

Con los datos de la tabla 2.1 se elabora el diagrama de Pareto para priorizar los problemas encontrados el cual se señala en la ilustración 2.7.

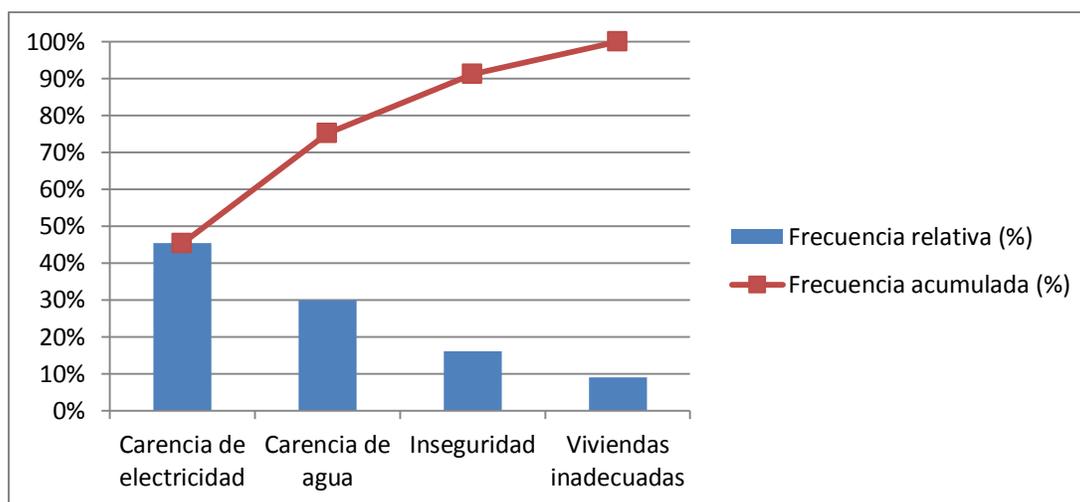


Ilustración 2.7. Diagrama de Pareto para priorizar los problemas de la comunidad

Elaboración propia

De la ilustración 2.7 se observa que la carencia de luz se presenta como la preocupación más importante para los habitantes de Lomo de Corvina. Las necesidades específicas por las cuales se requiere la luz eléctrica en esta zona se discuten a continuación.

## 2.5 Necesidades energéticas en los hogares de Lomo de Corvina

Según estudios llevados a cabo en África, Asia y América Latina las cinco categorías principales de las necesidades energéticas de hogares de escasos recursos son: iluminación, cocina y agua caliente, calefacción, refrigeración y ventilación e información y comunicaciones (*Practical Action*, 2014). A continuación se define cada una de las categorías.

<sup>7</sup> Los costos de inseguridad y viviendas inadecuadas fueron estimados por representantes vecinales del Asentamiento Humano Lomo de Corvina.

- a) Iluminación: Brinda a los hogares durante la noche la posibilidad de estudiar y sentirse seguros. Es necesario contar con iluminación en la calidad adecuada y evitando el uso de fuentes peligrosas como lámparas o velas. El estándar mínimo sugerido es que cada hogar debe contar con iluminación cuatro horas por noche.
- b) Cocina y agua caliente: Brinda a los hogares la posibilidad de darles a los alimentos cocción y hervir agua. Solo el 2% de las estrategias energéticas implementadas en países menos desarrollados contemplan el tema de la energía para cocinar.
- c) Calefacción: Cumple la función de calentar los hogares. Esta función se vuelve más importante durante el invierno en zonas altas. El estándar mínimo es de 18°C que es la temperatura recomendada para un dormitorio. Los estándares mínimos se definen como usar poco combustible, usar un medio eficiente y no dañar en exceso la calidad del aire.
- d) Refrigeración y ventilación: Permite conservar alimentos y medicinas. Constituye un servicio energético clave en países muy calurosos. El estándar mínimo de refrigeración consiste en mantener una temperatura aparente máxima de 30°C.
- e) Información y comunicaciones: Se define como el conjunto de tecnologías que procesan y transmiten información y facilitan la comunicación por medios electrónicos. Son herramientas clave para aliviar la pobreza porque permite acceder a información importante: servicios públicos, actividades políticas, derechos humanos, educación, etc. El estándar mínimo requerido es que los hogares puedan acceder a información mediante medios electrónicos.

Si bien todas esas categorías representan necesidades básicas para los hogares, la comunidad de Lomo de Corvina ha encontrado la forma de satisfacer la cocina y agua caliente con los comedores colectivos. Asimismo, la refrigeración y calefacción no son prioridad dado que la zona donde están ubicados los hogares no está expuesta a climas extremos que violen los estándares mínimos discutidos. Además, cabe mencionar que las tres necesidades mencionadas tienen un alto consumo energético por lo que solo se justificaría el satisfacerlas mediante energía eléctrica en caso de ser prioritario.

A diferencia de estas necesidades, el acceso a la iluminación y comunicaciones constituyen prioridades y en la actualidad satisfacer estas necesidades mediante energía eléctrica es la mejor opción por mucho.

Habiendo definido las necesidades, el acápite 2.6 discute las causas de la carencia de electricidad en estos hogares.

## **2.6 Análisis de causas**

Se ha detectado que la carencia de electricidad posee causas de diversa índole. Para su representación, en este acápite se utilizará el Diagrama de Ishikawa con el cual, se analizará el origen de las causas y posteriormente se describirá con mayor detalle cada una de las causas.

### **2.6.1 Diagrama de Ishikawa**

Como es sabido, el diagrama de Ishikawa parte de la premisa de que las causas de los problemas pertenecen a una entre cinco categorías, conocidas también como “5M”. El caso más general hace referencia a las categorías: Mano de Obra, Máquinas, Método, Materia prima y Medio ambiente. Con la intención de no perder la objetividad al usar esta herramienta se describirá a continuación cuál será el alcance de cada una de ellas.

Medio ambiente: Por esto se entiende la vida sociopolítica que rodea a los pobladores de Lomo de Corvina; esto incluye la influencia de las asociaciones de vecinos o de personas externas que desean ayudar así como la forma de vivir de los pobladores y a lo que se exponen.

Mano de Obra: Tradicionalmente, en el diagrama de Ishikawa se refiere al factor humano de una empresa, como lo representan los operarios. En este caso, el factor humano lo representan los mismos pobladores quienes buscan desarrollarse y conseguir las comodidades necesarias para vivir.

Materia Prima: Corresponde al *input* que se recibe en primera instancia por la empresa para generar el producto terminado. Si el “producto” finalmente resulta ser la electricidad distribuida hacia cada uno de los hogares, se puede pensar en la materia prima como la fuente que se usa para generar esta electricidad. En esta categoría se encuentran las causas que corresponden al uso de fuentes de energías fósiles o tradicionales.

Método: En cuánto al método, usualmente se trata de cuál es la forma en que se busca conseguir los resultados; esto es, cómo se están realizando los procesos. En cuanto al caso de Lomo de Corvina, habría que preguntarse de qué forma se está distribuyendo la electricidad de la que disponen los pobladores ya sea formal o clandestinamente.

Entonces, el método conduce a reflexionar sobre la forma en que opera la empresa de distribución de electricidad que brinda este servicio a una parte de la población y cómo es que se brinda clandestinamente por los pobladores que cuentan con ella hacia los demás.

Máquinas: Tradicionalmente corresponde al factor no humano que forma parte de la empresa y que está presente en el proceso productivo. En este caso, se tomará en cuenta en esta categoría las causas relacionadas a la infraestructura de los hogares en general de Lomo de Corvina por tratarse de, al igual que en el interior de una empresa, el principal hardware del que disponen los pobladores.

La ilustración 2.8 muestra el análisis de causas usando el diagrama de Ishikawa.

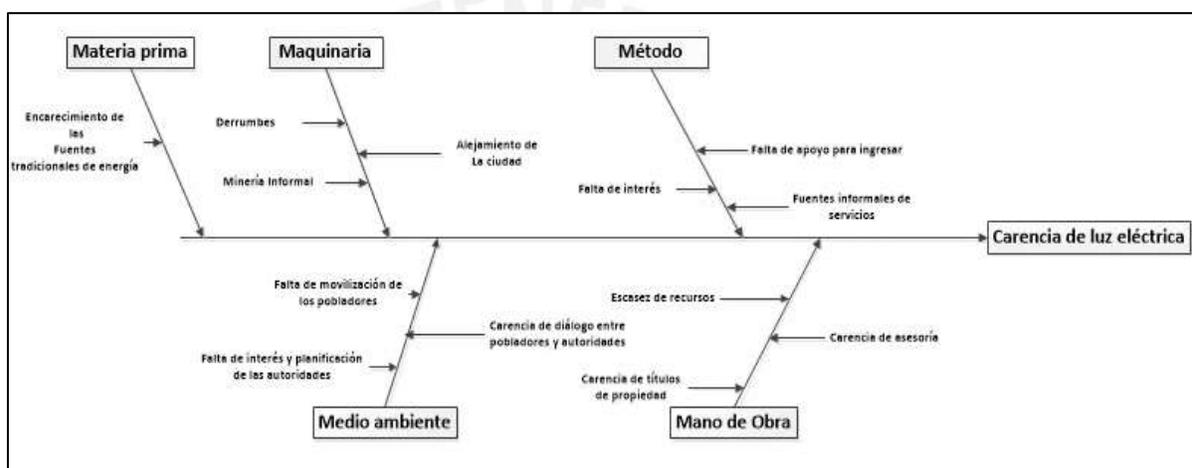


Ilustración 2.8. Diagrama de Ishikawa

Elaboración propia

## 2.6.2 Descripción de las causas

A continuación se describe cada una de las categorías haciendo hincapié en los documentos de investigación que indiquen objetivamente la existencia de cada una de las causas presentadas en la ilustración 2.9. Cabe resaltar que al tratarse de una población, las citas que se presentan a continuación tienen un carácter de estudio social.

### 2.6.2.1 Infraestructura (Maquinaria)

En primer lugar, la infraestructura para que los habitantes puedan contar con postes de luz y conexiones formales de electricidad resulta inadecuada por diferentes causas: el riesgo de derrumbes debido al tipo de suelo que no soporta construcciones pesadas, el trabajo de minería ilegal que se da en la zona y el alejamiento de Lomo de Corvina de la ciudad. Todos estos problemas se pueden explicar tomando en cuenta que “desde la

municipalización de las regiones en 1983, el crecimiento urbano del distrito ha sido desordenado: son miles de dispersas construcciones hechas sin las mínimas condiciones de seguridad. Las viviendas ubicadas en las faldas de los cerros son las más vulnerables. [...]En VES todo es ilegal. Las nuevas construcciones de las partes periféricas son aún más precarias y serán las más afectadas si ocurre un desastre” (Diez, s.f., p.69).

Por ello, ha resultado difícil hasta ahora que se realicen dichas conexiones. Actualmente, “el nivel de consolidación de estos barrios, con varias décadas de existencia, demanda otro tipo de mejoramiento, más cercano a la renovación urbana, en el que resulta fundamental evitar que las viviendas se transformen en tugurios por la baja calidad de sus estructuras y el aumento de las densidades, sin que eso signifique aumento de viviendas” (Ramírez y Riofrío, 2006, p.15).

#### **2.6.2.2 Vida Sociopolítica (Medio ambiente)**

La vida sociopolítica resulta un factor muy importante en el análisis. En primer lugar, resulta importante ver la acción de las autoridades, marcada por la falta de interés y planificación. Desco explica en torno a la política de vivienda para el caso peruano:

El problema de la vivienda para los pobres (y su construcción) quedó reducido al asunto del suelo y su mejoramiento. La política de vivienda en el Perú sacó provecho de una situación en la que las familias solamente demandaban un espacio vital para iniciar allí su esfuerzo propio en edificar la vivienda. A diferencia de lo sucedido en otros países, las autoridades en vivienda no iniciaron acciones amplias y sostenidas para producir viviendas baratas para las familias de muy bajos ingresos, lo que sucede hasta nuestros días. [...] De este modo, la política de dotación de viviendas se convirtió en una política de dotación de terrenos. Con eso era suficiente para atender las necesidades de las mayorías urbanas pobres sin necesidad de grandes esfuerzos económicos y políticos del Estado. Esta política funcionó sin mayores contratiempos en la etapa de expansión explosiva de las ciudades y muestra sus problemas ahora, en la etapa de la consolidación urbana. Ello se debe a la desatención pública a asuntos tan elementales como las características y la calidad del proceso de producción de la vivienda que, no teniendo supervisión, presenta deficiencias que hubiera sido mejor prevenir (Ramírez y Riofrío, 2006, p.14).

Otra causa de que no se haya conseguido el acceder a este recurso básico es la ineficacia en la acción colectiva de los pobladores de la zona. Esta fue muy activa en un inicio en los distintos asentamientos humanos en VES, pero actualmente ha decaído

debido a que la reciente heterogeneidad social ha diluido el sentimiento de colectividad que se tenía. Así:

La organización vecinal tenía (en la década de 1970) el papel de único representante del barrio y era por su intermedio que se canalizaban las demandas y gestiones. En muchos casos, la organización de pobladores preexistía a las municipalidades en su papel de autoridad urbana y definitivamente reemplazaron al inexistente promotor inmobiliario en los procesos convencionales de urbanización, pues eran ellas las responsables de la toma de iniciativas y las definiciones acerca de las características de la urbanización y las inversiones a efectuarse sobre ellas. Esta autoridad también fue de gran significación en los años sesenta y setenta para proporcionar un marco de acogida y seguridad propia a familias en muchos casos inmigrantes y rechazadas por la sociedad excluyente de las ciudades. [...] Esta organización ha sido tan o más importante que las asociaciones de provincianos que constituyeron el primer anclaje de relaciones urbanas de los inmigrantes en los años sesenta. Estas formas de organización vecinal han ido perdiendo vigencia en la medida en que las acciones colectivas de mejoramiento de los barrios fueron llegando a su fin, [...] finalmente, en la medida en que la heterogeneidad social ha sustituido a la relativa homogeneidad de familias pobres y jóvenes viviendo en urbanizaciones en las que todo estaba por hacerse (Ramírez y Riofrío, 2006, p.15).

Otra causa de la carencia de electricidad resulta el diálogo entre autoridades y habitantes, sumando a esto la falta de interés de los gobernadores y la creciente incapacidad de acción colectiva de los pobladores antes descrita. Desco explica:

El [...] modelo de atención a las necesidades urbanas de las mayorías de bajos ingresos ha tenido una serie de reglas, respetadas por poblaciones y autoridades. Se trató de una especie de pacto social de la habitación popular, que empezó a resquebrajarse en los ochenta y se ha roto y olvidado desde los años noventa. Dentro de ese pacto el asunto de la entrega de suelo en vez de vivienda ha sido un elemento clave. Ya en los años sesenta las autoridades en vivienda reconocían el papel de interlocutor válido a las organizaciones de vecinos para la toma de decisiones conjuntas respecto de la urbanización de estos asentamientos (Ramírez y Riofrío, 2006, p.15).

### **2.6.2.3 Modo de obtención de la electricidad (Método)**

El método actual que consiste en la generación de energía para su posterior transmisión y distribución es causa también del problema debido a que las compañías de distribución necesitan no solo una infraestructura para poder satisfacer la demanda eléctrica sino

también la autorización para poder hacerlo y esta ha estado ausente ya que los habitantes de esta zona no contaban con título de propiedad.

Sin embargo, tras el trágico incidente en “11 de diciembre” se registró lo siguiente:

El Presidente de la República visitó la zona al día siguiente del incendio y tomó la iniciativa de ofrecer el apoyo de las instituciones estatales para resolver el problema de vivienda de los damnificados. [...] Además de los organismos que estuvieron durante los primeros momentos de la emergencia, quedaron el Ministerio de Vivienda, a través de la Dirección Nacional de Urbanismo y el Banco de Materiales, COFOPRI, la Municipalidad Metropolitana de Lima, La Municipalidad de Villa El Salvador. Luego se coordinó también con Luz del Sur (empresa privada de distribución de energía eléctrica), Sedapal (empresa pública de abastecimiento de agua) y el programa A Trabajar Urbano de empleo temporal. Como puede verse, estaban presentes todos los actores necesarios para la política de mejoramiento de barrios (Ramírez y Riofrío, 2006, p.47).

Esto evidencia que no es imposible que las compañías de Luz ingresen a los asentamientos humanos si es que reciben apoyo del gobierno. También se evidencia el interés a partir de un caso concreto que, como ya ha sido explicado, fue muy mediático. De este modo, “gracias a las gestiones del Ministerio de Vivienda, la empresa Luz del Sur ha colocado excepcionalmente al Asentamiento Humano ‘11 de Diciembre’, conexiones eléctricas, incluyendo alumbrado público, antes de la obtención del título de propiedad individual” (Ramírez y Riofrío, 2006, p.49). Esto deja ver que, aún antes de tener las condiciones legales para ello, la obtención de servicios elementales, en casos como éste, es el resultado de la voluntad política de las autoridades, y las compañías que brindan tales servicios se suman cuando reciben órdenes por parte del Estado. Asimismo, como se comentó en el acápite 2.2, se sabe que la zona “11 de diciembre” brinda electricidad de forma clandestina a otros sectores de Lomo de Corvina lo cual merma la escasez de este recurso y aparenta que no fuese tan urgente.

#### **2.6.2.4 Población (Mano de Obra)**

Con respecto a la población en sí misma, se puede decir que es evidente que es una población de escasos recursos, lo cual, como ya se explicó, los deja en una situación de vulnerabilidad. La pobreza crónica los afecta no sólo al no tener capacidad adquisitiva de productos o de ahorrar, sino también los afecta en tanto que no les permite cubrir necesidades esenciales. Es por ello que la única solución que para ellos parecía viable era habitar lugares sumamente inhóspitos e inestables. A ello hay que sumar que no

tienen título de propiedad de sus viviendas. No tienen tal documentación puesto que “la legalización de una ocupación muy peligrosa es una condena a la pobreza extrema. No es responsable dar títulos en una zona de pendiente porque eso atenta contra la mínima integridad de los ciudadanos” (Diez, s.f., p.71). Sin embargo, vivir sin él puede ser incluso peor que tener un título de propiedad en una zona de riesgo, ya que esto presenta un motivo válido para que las empresas de servicios de agua y electricidad no tengan presencia en estos espacios.

Por otro lado, al ser personas que no se han podido formar o educar lo suficiente, es vital la cooperación de actores externos en cuestiones informativas y asesorías. Desco es una de las ONG que más ha trabajado en diversos asentamientos humanos de VES, incluyendo el propio Lomo de Corvina. Así, se puede afirmar lo siguiente:

“es necesario que las personas reconozcan los riesgos de sus propias viviendas. Por eso las capacitaciones y reuniones son muy importantes. [...] (Sin embargo), a veces la gente viene a las charlas sobre vulnerabilidades, pero no para aprender y ser consciente del peligro de su construcción, sino porque es una condición para que INDECI dé el visto bueno para la titulación. Al final, la titulación es un juego con la muerte” (Diez, s.f., p.75).

Así, a veces la urgencia de tener una vivienda juega en contra de la propia población, ya que ellos mismos asumen los riesgos como un factor que pasa a un segundo plano.

#### **2.6.2.5 Fuente de obtención de la energía (Materia prima)**

El costo de la energía está asociado a la fuente de la cual se extrae. De esta manera, el hecho de que se usen fuentes convencionales de energía para producir electricidad perjudica a las personas con escasos recursos que no pueden pagar este servicio. Así lo explica Mariano Ortega (2000) quien menciona que “la centralización de la obtención de combustibles en determinados países y el control de los recursos y de las tecnologías de generación por determinados grupos financieros, hacen de la energía la verdadera moneda de cambio y el mejor medio de dominación política”. Explica, además, que la dependencia de algunos países de determinadas fuentes energéticas trae consecuencias económicas capaces incluso de llevar a la crisis.

## 2.7 Análisis de las causas raíz

Para analizar objetivamente las causas de la problemáticas ya mencionadas se hará uso de una herramienta para priorizar las causas más importantes conocida como Matriz de Probabilidad e Impacto la cual se encuentra en la tabla 2.2.

Tabla 2.2. Matriz de Probabilidad-Impacto

Causa	Magnitud del daño	Probabilidad del riesgo					Total
		1	2	3	4	5	
Falta de apoyo para colocar postes de luz	6				20		120
Al haber fuentes informales de servicios los pobladores suplen esa necesidad y no buscan conseguir electricidad formalmente	5					25	125
Falta de interés de las compañías eléctricas	4				20		80
Alejamiento de la Ciudad de Lomo de Corvina	5				20		100
Minería informal hace más difícil el habitar Lomo de Corvina	6			15			90
Costo de las fuentes fósiles generan que el servicio tenga un costo que resulta alto para estas personas	6					25	150
Falta de movilización de pobladores	3		10				30
Falta de planificación de las autoridades	6				20		120
Carencia de diálogo entre pobladores y autoridades	3				20		60
Escases de recursos	7					25	175
Carencia de títulos de propiedad hace que aunque no hubiese postes de luz no sería correcto brindarles una conexión	3			15			45
Carencia de asesoría	4			15			60

### Elaboración propia

De la tabla 2.2 se observa que las causas más importantes dentro de Lomo de Corvina son la escasez de recursos, los altos costos de las fuentes fósiles o tradicionales, las fuentes informales de servicio, la falta de apoyo para colocar los postes de luz y la falta de planificación de las autoridades. Cada una de ellas ha obtenido un puntaje mayor o igual a 120 en la matriz de probabilidad e impacto.

En la tabla 2.3 se procede a cuestionar cada una de las cinco causas a fin de encontrar las causas raíces y poder plantear contramedidas.

Tabla 2.3. Método *why-why*

Causa	Por qué(1)	Por qué (2)
Falta apoyo para colocar postes de luz	Ni las autoridades ni la compañía eléctrica se quieren responsabilizar por colocar postes de luz	Se sabe que la zona no es un lugar habitable por lo que colocar postes y cables de distribución de electricidad no sería realmente adecuado.
Al haber fuentes informales de servicios los pobladores suplen esa necesidad y no buscan conseguir electricidad formalmente	Los pobladores recurren a ello por no contar con postes de luz	Se sabe que la zona no es un lugar habitable por lo que colocar postes y cables de distribución de electricidad no sería realmente adecuado
Costos de las fuentes fósiles generan que la luz eléctrica sea un servicio con un costo alto para estas personas	Los costos variables de las fuentes fósiles son más altos que los de las fuentes renovables	Estos recursos se están agotando y al ser escasos aumentan su valor
Falta de planificación de las autoridades	Las autoridades priorizan otros planes antes que la electrificación de la zona	No se le está dando la atención adecuada a las necesidades de estos pobladores
Escasez de recursos	Los pobladores no disponen de medios ni apoyo para prosperar	No se le está dando la atención adecuada a las necesidades de estos pobladores

**Elaboración propia**

De la tabla 2.3 se concluye que las causas raíces son tres: la inhabitabilidad de la zona, el agotamiento de las fuentes convencionales de energía y la falta de atención a las necesidades de los pobladores.

## 2.8 Análisis de contramedidas

En este acápite se definen posibles contramedidas y se evalúan usando la matriz FACTIS para seleccionar la más conveniente.

### 2.8.1 Posibles contramedidas

Las posibles contramedidas para cada una de las causas raíces son:

1. Con respecto a la inhabitabilidad de la zona, no es posible cambiar esa situación. Lo que se puede hacer para que estas personas tengan luz eléctrica el tiempo que vivan ahí (si es que se reubican en algún momento) es usar fuentes de energías renovables las cuales son ampliamente conocidas por su portabilidad y que forman parte de diversos proyectos de electrificación rural por esta peculiaridad. Esto permitiría también, por la portabilidad, que en caso de reubicarse, se pueda trasladar también los equipos de generación de electricidad.
2. Con respecto al agotamiento de recursos fósiles, esto también es irreversible; pero el uso de las energías renovables también resulta una solución puesto que el costo variable de generación de electricidad en el último caso es nulo lo cual, por

ende, no depende de la alza de los precios de las fuentes de energía. Así la contramedida consistiría en equipar a los hogares agropecuarios de sistemas de autogeneración de energía a base de fuentes renovables, estimándose que en Lomo de Corvina existen alrededor de 120 de estos hogares.

3. Respecto a la carencia de atención adecuada, una contramedida resulta la concientización de las autoridades y que se abra el diálogo entre los pobladores, las autoridades y la empresa de distribución de electricidad para llegar a un consenso sobre las posibilidades de instalar postes de luz en la zona así como planes de acción sobre otros problemas que aquejan a la población.

### 2.8.2 Evaluación de las contramedidas

Con el propósito de calificar y evaluar posibles soluciones, partiendo de las causas ya presentadas de los principales problemas en Lomo de Corvina, se utilizará la siguiente matriz FACTIS; la cual cuenta con seis criterios de selección, los cuales han sido ponderados de acuerdo con la tabla que expresa la importancia que, dada la apremiante necesidad descrita hasta el momento, corresponde a cada criterio. Así, los criterios más importantes son el tiempo que toma ejecutar la solución, el impacto de mejora en la calidad de vida y la facilidad con que se puede ejecutar la propuesta. Por otro lado, los criterios con menor ponderación serán la afectación a terceros, seguridad en la mejora y por último, la inversión requerida. A pesar de ello, se sabe que el presupuesto en cualquier proyecto es limitado; sin embargo, la visión de este trabajo es priorizar el bienestar humano de los pobladores aquejados por la situación. Los criterios se muestran en la tabla 2.4.

Tabla 2.4. Criterios de selección y sus factores de ponderación

	Criterios de selección	Factor de ponderación
F	Facilidad para solucionar	4
A	Afectación a terceros	1
C	Mejora calidad de vida	5
T	Tiempo de implementación	6
I	Inversión requerida	2
S	Seguridad de mejora	3

#### Elaboración propia

Entonces, a cada raíz se le asignó una propuesta de solución las cuales han sido evaluadas en la matriz FACTIS que se muestra en la tabla 2.5, colocándoles un número entero entre uno y tres donde el puntaje mayor representa el más conveniente en términos del criterio respectivo que está siendo evaluado. Nótese que solo se han

colocado dos alternativas de solución debido a que una de ellas representa la alternativa a dos causas raíces.

Tabla 2.5. Desarrollo de la matriz FACTIS

	Peso						Total
	F	A	C	T	I	S	
Propuesta de Solución	4	1	5	6	2	3	
Usar autogeneración de electricidad	3	3	3	3	2	3	61
Concientización de las autoridades	1	3	3	1	3	2	40

#### Elaboración propia

Respecto a la tabla 2.5, el uso de autogeneración de electricidad es una contramedida que, de acuerdo con la Matriz FACTIS, representa la más favorable para abordar la carencia de electricidad. Pero ello, como se mencionó, tiene la desventaja de requerir una inversión inicial alta por lo que es preciso, antes de la evaluación económica de la propuesta, dimensionar un sistema híbrido de generación de electricidad acorde al potencial de la zona (fotovoltaico y eólico) que pueda satisfacer la demanda eléctrica de un hogar agropecuario en Lomo de Corvina a lo largo de todo el año y que a su vez represente el menor costo de inversión inicial. Todo ello sujeto también a las restricciones de espacio disponible del mismo para poder contar con paneles solares y turbinas eólicas.

Esta medida está siendo cada vez más usada: el uso de energías renovables para satisfacer la demanda de electricidad de comunidades aisladas es ampliamente recomendada por la literatura, más aún el uso de sistemas híbridos los cuales son cada vez más usados (Ferrer-Martí y otros, 2012). Por un lado, esto permite integrar el uso de módulos de energías renovables que son beneficiosos dada su portabilidad (América fotovoltaica, 2016). Por otro lado, permite aprovechar un recurso local lo cual, según el informe más reciente de IRENA (2014) tiene costos competitivos comparados con las fuentes de energía convencionales.

En casos como este, el factor crítico es el presupuesto (Ferrer-Martí y otros, 2012), por lo que, habiendo ya definido la propuesta a realizar, lo siguiente se enfocará a dimensionar el sistema híbrido de generación de energía minimizando el costo. Esto es una tarea especialmente retadora puesto que el sistema debe dimensionarse lo suficientemente grande como para satisfacer la demanda pero un excesivo dimensionamiento puede generar sobre costos que es lo que se debe evitar (Kusakana y otros, 2012). Así pues, tal como la literatura lo resalta, el problema de seleccionar las fuentes de energías

renovables a usar, hallando el número de componentes y tomando en cuenta restricciones técnicas constituye un problema de optimización (Jaramillo, 2012). Dicho problema puede ser resuelto usando distintas técnicas dentro de las cuales la programación lineal constituye actualmente una poderosa herramienta (Domenech y otros, 2011). Asimismo, cuenta con la ventaja de que puede resultar más sencilla y provee excelentes resultados en un corto plazo (Kusakana y otros, 2012).

Por otro lado, otros dos métodos como son el uso de modelos matemáticos y programas especializados son herramientas usadas para resolver este problema (Luna y otros, 2012). En el caso de los modelos matemáticos, estos pueden llegar a resultar demasiado complejos y costosos de realizar (Jaramillo, 2012), mientras que el uso de programas de cómputo especializados requieren un periodo de adiestramiento en su uso además de conllevar un costo elevado para adquirir la licencia (HOMER Energy LLC, 2016).

Dadas estas condiciones se realizará una comparación entre las tres metodologías antes presentadas para seleccionar la más adecuada. Así, la tabla 2.6 señala los criterios a tomar en cuenta para seleccionar la herramienta y la valoración de cada uno.

Tabla 2.6. Criterios para seleccionar la herramienta de optimización

Criterio de selección	Valoración
Simplicidad (S)	7
Tiempo (T)	5
Costo (C)	6
Confiabilidad (CO)	4

**Elaboración propia**

De los criterios de la tabla 2.6 se consideran la simplicidad y el costo como los más valorados. La tabla 2.7 muestra la evaluación de cada uno de esos criterios tomando en cuenta lo mencionado sobre cada uno de los métodos en la literatura revisada.

Tabla 2.7. Puntuación de las alternativas

	S	T	C	CO	
Herramienta	7	5	6	4	Puntuación otorgada
Programación Lineal	5	4	4	2	87
Modelos matemáticos	2	2	2	5	56
Programas de computación especializados	2	5	1	5	65

**Elaboración propia**

Según se observa, la herramienta más conveniente es el uso de Programación Lineal para resolver el problema de dimensionamiento de un sistema híbrido de generación de electricidad. Así, el capítulo 3 se enfocará en desarrollar dicho modelo con el objetivo de minimizar el costo de dicho sistema.



## CAPÍTULO 3: DESCRIPCIÓN DETALLADA DEL MODELO

En este capítulo se presenta un modelo MILP que está inspirado en uno propuesto por Kusakana, Vermaak y Numbi del año 2012 en el cual se usa programación lineal para el dimensionamiento óptimo de un sistema híbrido de generación de energía eléctrica.

### 3.1 Descripción general

El modelo propuesto busca optimizar un sistema híbrido compuesto por energía fotovoltaica y eólica para un hogar. Cada una de estas fuentes de energía posee una unidad generadora con características particulares; sin embargo, la energía producida por cada uno de los equipos se puede expresar de forma lineal. Asimismo, a diferencia del documento de referencia mencionado, incluye variables de decisión enteras y binarias permitiendo que el modelo tome en cuenta costos fijos y variables así como restricciones del espacio disponible para cada tipo de tecnología.

Es relevante para el caso de estudio que es el asentamiento humano Lomo de Corvina debido a que en dicha localidad existen estas dos fuentes de energías renovables y, al mismo tiempo, los hogares agropecuarios que son la unidad de estudio sufren una escasez de electricidad, la misma que puede ser solucionada usando un sistema híbrido de energías renovables para lo cual es importante, como se mencionó en el capítulo 2, dimensionar el sistema de modo que permita minimizar el costo total de inversión para instalar esta tecnología. Además, esta decisión implica determinar cuántos módulos se usarán de cada fuente, los cuales difieren en área, costos y la forma como generan electricidad. Así pues, la decisión es compleja puesto que por un lado la tecnología eólica tiene mayor eficiencia en la conversión mientras que los módulos fotovoltaicos son más económicos y se debe evitar sobredimensionar el sistema porque sería un costo innecesario. Asimismo, decidir una tecnología o una combinación de ambas está sujeto a costos fijos que están compuestos de los costos de instalación que se hacen inicialmente y los costos de mantenimiento y limpieza ajustados al valor presente para poder compararlos. Todas estas consideraciones serán tomadas en cuenta por el modelo. Por otro lado, es conveniente mencionar que el modelo únicamente dimensiona los componentes generadores de energía cuando en realidad es necesario que el sistema se complemente con inversores, controladores y baterías cuya selección y costo se realiza en el capítulo 4. Sin embargo, su selección y costo será considerado como un costo no

relevante, y por tanto no incluido en el modelo, debido a que de cualquier manera que se dimensione el sistema se incurrirá en ese gasto.

Antes de empezar a describir el modelo se presentan las fórmulas útiles para su formulación las cuales fueron explicadas en el capítulo 1.

### 3.2 Fórmulas para el cálculo de la energía

A continuación se presentan las fórmulas para calcular la energía producida del tipo fotovoltaica y eólica.

#### 3.2.1 Fotovoltaica

Esta se estima usando datos de la irradiación, el factor de empaquetamiento de los módulos fotovoltaicos, la eficiencia que estima el fabricante de los mismos y su área. Así, la ecuación queda definida en la expresión (1).

$$E_{pv} = A \times \eta_{gen} \times P_f \times I \dots (1)$$

Donde:

$A$ : Área Total del generador fotovoltaico ( $m^2$ )

$\eta_{gen}$ : Eficiencia del generador

$P_f$  : Factor de empaquetamiento

$I$  : Irradiación diaria ( $kW\text{-h}/m^2$ )

#### 3.2.2 Eólica

La energía se define como la potencia de la turbina operando en un periodo de tiempo. Esto se indica en la expresión (2).

$$E_w = P_w \times \Delta t \dots (2)$$

$P_w$  : Potencia generada por la turbina de viento (kW)

$\Delta t$  : Variación de tiempo (horas)

Sin embargo, la potencia de la turbina de viento no es aprovechada al 100 % por lo que se requiere de emplear una fórmula que explique la potencia utilizada en términos de eficiencia. Así, se tiene la expresión (3).

$$P_w = \frac{1}{2} \times \rho \times C \times A \times V^3 \dots (3)$$

Donde:

$A$  : Área transversal por la que fluye el viento ( $m^2$ ).

$\rho$  : Densidad del aire ( $kg/m^3$ ).

$C$  : Eficiencia del equipo, que depende de la estructura de los equipos.

$V$  : Velocidad del viento ( $m/s$ ).

### 3.3 Nomenclatura

A continuación se presenta la nomenclatura empleada para la construcción del modelo que incluye los índices usados, los parámetros y las variables de decisión.

#### 3.3.1 Índices

Los índices (i) corresponden a uno de los dos tipos de energía que se toman en cuenta y se reseñan en la tabla 3.1. Los índices (m) corresponden a cada uno de los meses del año y son reseñados en la tabla 3.2.

Tabla 3.1. Índices de fuentes de energías

Valor de (i)	Tipo de energía
1	Fotovoltaica
2	Eólica

Elaboración propia

Tabla 3.2. Índice correspondiente a cada mes

Valor de (m)	Mes
1	Enero
2	Febrero
3	Marzo

Elaboración propia

Debe notarse que la tabla 3.2 muestra solo un fragmento de los valores que puede tomar el índice (m) ya que este representa cada uno de los doce meses del año.

#### 3.3.2 Parámetros del modelo

Del acápite 3.2 se puede notar que para calcular la energía producida por cada tipo de fuente, se requiere de ciertos parámetros los mismos que se detallan a continuación:

$\eta_i$  : Eficiencia del generador de la tecnología (i)

$P_f$ : Factor de empaquetamiento

$I$  : Irradiación solar (kW-h/m<sup>2</sup>)

$\rho$  : Densidad del viento en (kg/m<sup>3</sup>)

$V_i$  : Velocidad del viento (m/s)

$A_{max_i}$  : Área máxima disponible para la tecnología (i) (m<sup>2</sup>)

$E_{dem_m}$  : Energía demandada en el mes (m)

$Cu_i$  : Costo unitario de cada módulo de la tecnología (i) (S/ por módulo)

$Cf_i$  : Costo fijo de la tecnología i (S/)

$Am_i$  : Área de un módulo de la tecnología i (m<sup>2</sup>)

### 3.3.3 Variables del modelo

En este punto se nombrará una lista de las diferentes variables que servirán para la formulación del modelo.

$M_i$ : Número de módulos a instalar de la tecnología (i)

$Ep_m$  : Energía producida en el mes m en total (kW-h)

$A_i$  : Dimensión de uso de la fuente (i) en unidad de área (m<sup>2</sup>)

$E_{i,m}$  : Contribución disponible de energía del tipo de fuente (i) por unidad de área en el mes m (kW-h/m<sup>2</sup>)

$Q_i$  : Es una variable cuya única finalidad es definirla como entera y permitir asegurar que el número de paneles sea par.

### 3.4 Modelo de Programación Lineal Entera Mixta

Tener presente que en lo sucesivo se hará referencia al dimensionamiento como la determinación de la magnitud del uso de una fuente de energía renovable expresada en unidades de área (m<sup>2</sup>).

### 3.4.1 Función objetivo

La expresión (4) indica que se busca minimizar el costo total inicial de la compra de los componentes. Debe notarse que el primer sumando corresponde al costo total de comprar módulos de ambas tecnologías, multiplicando el costo por unidad de área por el número de metros cuadrados empleados. El segundo sumando corresponde al costo fijo en que se incurre por instalar un tipo de tecnología y debe notarse que está multiplicado por una variable binaria. Esto es, si la variable binaria correspondiente a la tecnología (i) es 0, la tecnología no se instala y por tanto el costo fijo de instalación se hace cero en la función objetivo.

$$\min Z = \sum M_i \times Cu_i + x_i \times Cf_i, \forall i \dots (4)$$

### 3.4.2 Restricciones

La expresión (5) indica que la energía producida en un mes en total debe ser mayor o igual a la energía que se estima se demandará en ese mismo mes.

$$Edem_m \leq Ep_m, \forall m \dots (5)$$

La expresión (6) indica que para cada mes, la energía producida corresponda al área que se dispone de cada tecnología multiplicado por la cantidad de energía que produce cada tecnología por unidad de área.

$$Ep_m = \sum_i A_i \times E_{i,m}, \forall m \dots (6)$$

La explicación de la restricción en la expresión (7) se puede dividir en dos partes:

1. Esta restricción busca que el área que se instale de cada tipo de tecnología sea menor que el área máxima que se sabe de antemano que está disponible.
2. Se persigue que haya coherencia en que el área que ocupará una tecnología depende de si esta será instalada o no. Así por ejemplo, si no se instala la tecnología eólica, el área ocupada por las turbinas debe ser cero. Para ello nótese que  $x_i$  es una variable binaria y toma el valor de cero cuando no se instala la tecnología (i). Caso contrario toma el valor de uno.

$$A_i \leq Amax_i \times x_i, \forall i \dots (7)$$

Las siguientes dos ecuaciones están relacionadas con la ecuación en (3). Se trata de la inserción de los parámetros físicos necesarios para estimar la energía obtenida por cada tipo de fuente. Así, la expresión (8) es similar a la (1) en la cual se explica cómo se calcula la energía en el caso fotovoltaico. La diferencia con esta ecuación es que no se está multiplicando por el área, de tal modo que  $E_{i,m}$  se refiere a la energía fotovoltaica que se puede obtener en el mes (m) por cada unidad de área ( $m^2$ ) que se instale de módulos fotovoltaicos.

$$E_{i,m} = \eta_i \times Pf \times I_m, \quad \forall m, i = 1 \dots (8)$$

Por otro lado, la expresión (9) es similar a la (2) en la cual se explica cómo se calcula la energía en el caso eólico. Análogamente, la expresión no se está multiplicando por el área, de tal modo que  $E_{i,m}$  se refiere a la energía eólica que se puede obtener en el mes (m) por cada unidad de área ( $m^2$ ) que se instale de turbinas eólicas. Asimismo, el número de horas  $\Delta t$  de cada mes dependerá del número de días que tenga.

$$E_{i,m} = \eta_i \times 0.5 \times \Delta t \times 0.001 \times \rho \times V^3, \quad \forall m, i = 2 \dots (9)$$

En la expresión (10) se indica que el área a instarse por cada tipo de tecnología es igual al producto entre el área que ocupa cada módulo y el número de módulos. La utilidad de esta ecuación en el modelo consiste en que la variable  $M_i$  es definida como entera y de esta manera se hace coherente con la realidad.

$$M_i \times Am_i = A_i, \forall i \dots (10)$$

En la expresión (11) se indica que el número de módulos que formarán parte del campo generador debe ser un número par o cero. Esto se debe a que el sistema que se está diseñando tiene una tensión de 24 V y cada panel que se usará tiene una tensión de 12 V por lo que es necesario colocar dos en serie. Para ello, la variable  $Q_i$  será definida como entera en el rango de existencia.

$$M_i = Q_i \times 2, \quad i = 1 \dots (11)$$

### 3.4.3 Rango de existencia

En la expresión (12) se indica que el número de módulos a instalar por cada tecnología es un número entero.

$$M_i \in \mathbb{Z}^+, \forall i \dots (12)$$

En la expresión (13) se indica que la variable  $x_i$  es una variable binaria.

$$x_i = 0,1 \forall i \dots (13)$$

En la expresión (14) se indica que el área ocupada por cada tecnología es una cantidad no negativa.

$$A_i \geq 0 \forall i \dots (14)$$

En la expresión (15) se indica que la variable  $Q_i$  toma valores enteros positivos.

$$Q_i \in \mathbb{Z}^+, \forall i \dots (15)$$

### 3.5 Obtención de datos

A continuación se describirán los datos relevantes para la ejecución del modelo que incluyen datos meteorológicos que han sido proporcionados por el SENAMHI así como costos de los componentes y parámetros técnicos recopilados por datos de fabricantes y del documento de referencia. Los datos de SENAMHI se muestran en el anexo 6.

#### 3.5.1 Irradiación solar

La tabla 3.3 indica el promedio de irradiación solar que se ha calculado para cada mes del año 2015 en Lima. Estos datos están publicados en el atlas de energía solar.

Tabla 3.3. Irradiación solar promedio por cada mes

Mes	Irradiación solar (kW-h/m <sup>2</sup> )
Enero	186.0
Febrero	154.0
Marzo	186.0
Abril	150.0
Mayo	139.5
Junio	135.0
Julio	124.0
Agosto	139.5
Setiembre	165.0
Octubre	155.0
Noviembre	180.0
Diciembre	201.5

Fuente: SENAMHI. 2003

### 3.5.2 Velocidad del viento

La tabla 3.4 indica el promedio de velocidad del viento diario por mes basado en los últimos 5 años disponibles (2001-2006) que se ha calculado en la estación llamada Pantanos de Villa la cual está igualmente cercana a la Costa que Lomo de Corvina.

Tabla 3.4. Velocidad promedio del viento por cada mes

Mes	Velocidad del viento (m/s)
Enero	3.90
Febrero	4.91
Marzo	5.12
Abril	6.04
Mayo	5.78
Junio	5.23
Julio	5.44
Agosto	3.65
Setiembre	4.44
Octubre	5.58
Noviembre	5.23
Diciembre	5.24

Fuente: SENAMHI. 2016

### 3.5.3 Costos de los componentes

Para el uso de las tecnologías renovables, fotovoltaica y eólica se requieren por cada una serie de cuatro componentes: regulador de carga, batería, inversor de carga y módulos (paneles solares, en el caso de fotovoltaica y turbinas eólicas, en el de eólica).

Las tablas 3.5 y 3.6 resumen los costos de la tecnología fotovoltaica.

Tabla 3.5. Costos fijos y variables de la tecnología fotovoltaica

Costo unitario (soles)	Panel solar	120.00
Costo fijo (soles)	Instalación y soporte para paneles	250.00
	Mantenimiento	67.66
	Limpieza	62.31

Fuente: Opalux. 2016

Para el cálculo de los costos de mantenimiento y limpieza se consideró que la limpieza anual tiene un costo anual de S/ 5 y el mantenimiento se hace cada 5 años y tiene un costo de S/ 30. Su ajuste al valor presente se hace considerando una tasa de 5 % anual. La tabla 3.6 resume los costos de la tecnología eólica

Tabla 3.6. Costos fijos y variables de la tecnología eólica

Costo unitario (soles)	Turbina eólica	1371.07
Costo fijo (soles)	Instalación	300.00
	Mantenimiento	121.58
	Limpieza	124.62

Fuente: Aliexpress. 2016

Para el cálculo de los costos de mantenimiento y limpieza se consideró que la limpieza anual tiene un costo anual de S/ 10 y el mantenimiento se hace cada 2 años y tiene un costo de S/ 20.

### 3.5.4 Datos técnicos relevantes de cada tecnología

Otros parámetros de entrada corresponden a la eficiencia de ambas tecnologías las cuales fueron proporcionadas por la literatura (eficiencia y área de los módulos). El área máxima disponible para cada tecnología se estimó en base a la disposición de espacio de los hogares agropecuarios observada en la visita de campo. Dichos datos se especifican en la tabla 3.7.

Tabla 3.7. Parámetros técnicos por cada tecnología

Tecnología	Fotovoltaica	Eólica
Eficiencia	18.00 %	25.00 %
Área del módulo (m <sup>2</sup> )	0.24	0.65
Área máxima disponible en un hogar agropecuario (m <sup>2</sup> )	12.00	12.00

Elaboración propia

Adicionalmente, se considerará la densidad teórica del aire que es de 1.225 (kg/m<sup>3</sup>) para todo el año. Cabe resaltar que para efectos de estimaciones suele tomarse este dato teórico para estimar el potencial eólico en proyectos de electrificación afines. Asimismo, se considerará un factor de empaquetamiento de 0.75 para el módulo fotovoltaico lo que significa que tienen un empaque moderado.

### 3.5.5 Demanda mensual de energía en hogares agropecuarios de Lomo de Corvina

La tabla 3.8 muestra un consumo hipotético de un hogar en Lomo de Corvina el cual fue elaborado basado en las necesidades de electrificación que se discutieron en el acápite 2.3 del capítulo 2. Así, se indican los electrodomésticos y las horas de consumo para calcular la demanda diaria.

Tabla 3.8. Demanda diaria de energía de un hogar agropecuario promedio en Lomo de Corvina

Electrodoméstico	Cantidad	Consumo por electrodoméstico <sup>8</sup> (w)	Horas	Energía (Wh/día)
Televisor	1	100	4	400
Foco de luz	5	20	4	400
Foco de luz (exterior)	1	20	10	200
Equipo de sonido	1	25	4	100
			<b>Total</b>	1100

**Elaboración propia**

Con estos datos, se estima que la demanda diaria de energía de un hogar agropecuario promedio de Lomo de Corvina resulta 1.1 kW-h/día. Sin embargo, para poder satisfacer esta demanda la energía requerida debe ser mayor tomando en cuenta la pérdida de energía en los equipos. Esta energía se puede calcular según la ecuación de la expresión (16), la cual toma en cuenta que todos los artefactos de consumo funcionan en corriente alterna:

$$Energía\ diaria\ requerida = \frac{Energía\ demandada}{Eficiencia\ convertor \times Eficiencia\ regulador} \dots (16)$$

Tomando valores referenciales de los equipos comerciales para la eficiencia del convertor y regulador la energía requerida es de 1617.64 kW-h por día<sup>9</sup>. Con base en esto, y al igual que el documento de referencia propuesto por otros autores, se procede a calcular la energía eléctrica requerida en cada mes según el número de días de cada uno respectivamente la cual se muestra en la tabla 3.9.

Tabla 3.9. Demanda de energía eléctrica por mes

Mes	Demanda (kW-h)
Enero	50.15
Febrero	45.29
Marzo	50.15
Abril	48.53
Mayo	50.15
Junio	48.53
Julio	50.15
Agosto	50.15
Setiembre	48.53
Octubre	50.15
Noviembre	48.53
Diciembre	50.15

**Elaboración propia**

<sup>8</sup> Los consumos son tomados como referencia de los consumos sugeridos del Ministerio de Energía y Minas.

<sup>9</sup> Las eficiencias usadas para el cálculo se indican en el acápite 4.1.2.

### 3.6 Modelado en LINGO

A continuación, se presenta cada una de las sentencias que conforman el modelado usando el software LINGO que permite hallar la solución a este problema del tipo MILP.

MODEL :

SETS:

MESES/1..12/:Edem, Ep, IR, T, V,D;

FUENTE/1..2/:N, A, Cv, Amax, M, Am, Cf, X;

MATRIZ1 (MESES, FUENTE) :E;

ENDSETS

!FUENTE 1 = FOTOVOLTAICA;

!FUENTE 2 = EOLICA;

Las sentencias anteriores indican la creación de los sets. Por un lado, las categorías correspondientes al índice m se agrupan en el set MESES. Dicho set tiene una dimensión de 12. Así, existe una energía producida, irradiación, velocidad del viento, densidad del aire y energía demandada para cada mes del año.

Del mismo modo, las categorías correspondientes al índice i se agrupan en el set FUENTE. Dicho set tiene una dimensión de 2. Así, existe una eficiencia del generador, área instalada, costo variable, área máxima, número de módulos, área por módulo y un costo fijo para cada tipo de fuente de energía renovable tomada en cuenta en el modelo.

Por último, se comenta que el índice i corresponde a la fuente fotovoltaica cuando toma el valor de 1 y a la eólica, cuando toma el valor de 2.

Las sentencias siguientes corresponden a la importación y exportación de datos.

DATA:

Edem, IR, V, D, N, Cv, Amax, Am, Cf, T =

@OLE( 'C:\Users\Angel\Dropbox\tesis\Datos de entrada y de salida para el Lingo V2.xlsx');

Las sentencias anteriores importan los siguientes parámetros: irradiación, velocidad del viento, densidad del aire, eficiencia de los módulos fotovoltaicos, costo variable, área máxima disponible, área de un módulo, costo fijo y número de horas por mes. Se usa el comando @OLE para referenciarlos a su ubicación en el archivo de extensión “.xlsx”.

```
@OLE( 'C:\Users\Angel\Dropbox\tesis\Datos de entrada y de salida para el
Lingo V2.xlsx')=
Ep, A, M, E, X;
```

Las sentencias anteriores exportan los valores de las siguientes variables: energía producida mensual, área ocupada por cada tecnología, número de módulos por cada tecnología y la variable binaria de decisión. Se usa el comando @OLE para referenciarlos a su ubicación en el archivo de extensión “.xlsx”.

```
Pf = 0.75;
```

Se define el factor de empaquetamiento, el cual será de 0.75.

```
MIN =@SUM(FUENTE(I):A(I)*Cv(I))+@SUM(FUENTE(I):X(I)*Cf(I));
```

Se modela la función objetivo de minimización. Es equivalente a la ecuación<sup>10</sup> (4)

```
@FOR(MESES(I): Ep(I) >= Edem(I));
```

Esta sentencia indica que la energía producida para cada mes debe ser mayor a la energía demandada. Es equivalente a la ecuación (5)

```
@FOR(MESES(I): @SUM(FUENTE(J): E(I,J)*A(J)) = Ep(I));
```

Esta sentencia indica que la energía producida cada mes equivale a la energía disponible por unidad de área de cada fuente multiplicada por el área instalada de cada tipo de fuente. Es equivalente a la ecuación (6)

```
@FOR(FUENTE(I): A(I) <= Amax(I)*X(I));
```

Esta sentencia indica que la energía producida para cada mes debe ser mayor a la energía demandada. Asimismo, en caso de que se decida no instalar una tecnología puede notarse que el lado derecho de la restricción toma el valor de cero indicando que el área instalada para ese tipo de tecnología será cero. Esto es para hacer el modelo coherente como se explicó en el acápite 3.4. Es equivalente a la ecuación (7)

```
@FOR(MATRIZ1(I,J)|J#EQ#1: E(I,J)= N(J)*Pf*IR(I));
```

Esta sentencia indica la ecuación para calcular la energía disponible proveniente de fuente fotovoltaica por unidad de área. Es equivalente a la ecuación (8)

```
@FOR(MATRIZ1(I,J)|J#EQ#2: E(I,J)= 0.001*0.5*T(I)*N(J)*D(I)*V(I)^3);
```

---

<sup>10</sup> Las ecuaciones a las que hacen referencia las sentencias son las desarrolladas en el acápite 3.4.2.

Esta sentencia indica la ecuación para calcular la energía disponible proveniente de fuente eólica por unidad de área. Es equivalente a la ecuación (9)

```
@FOR (FUENTE (I) : A (I) = M (I) * Am (I));
```

Esta sentencia indica que el área instalada por cada tipo de fuente equivale al número de módulos instalados por el área de cada uno. Es equivalente a la ecuación (10).

```
@FOR (FUENTE (I) | J#EQ#1 : M (I) = 2 * G (I));
```

Esta sentencia asegura que el número de módulos fotovoltaicos sea par. Es equivalente a la ecuación (11)

```
@FOR (FUENTE (I) : @GIN (M (I)));
```

```
@FOR (FUENTE (I) : @BIN (X (I)));
```

```
@FOR (FUENTE (I) : @GIN (G (I)));
```

END

Las sentencias anteriores aseguran que la variable  $M_i$  y  $G_i$  sean enteras y que la variable de decisión  $x_i$  sea una variable binaria.

### 3.7 Limitaciones del modelo

El modelo se basa en estimados del comportamiento promedio de los equipos generadores de energía, los cuales se sabe no tienen un comportamiento absolutamente uniforme en el tiempo. Por otro lado, como se mencionó en el capítulo 1, posee un enfoque *top down*, al no considerar detalles más técnicos como por ejemplo el estado de descarga de las baterías.

## CAPÍTULO 4: EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA

El siguiente capítulo tiene por objetivo discutir los resultados que se obtienen de la ejecución del modelo y definir cómo estará compuesto el sistema para electrificar cada hogar usando dichos resultados y los conceptos desarrollados en el acápite 1.2 del capítulo 1. Finalmente, analizar los indicadores de la propuesta.

### 4.1 Evaluación técnica

Este acápite se compone de tres partes: en 4.1.1 se muestra los resultados del modelo desarrollado en el capítulo 3, en 4.1.2 se complementa dichos resultados para definir la propuesta y en 4.1.3 se indica los flujos de efectivo involucrados para llevarla a cabo.

#### 4.1.1 Resultados del modelo

El valor óptimo de la función objetivo fue de 2,060, lo que significa que la inversión inicial sumado a los costos de instalación, limpieza y mantenimiento en el valor presente ascienden al monto de S/ 2,060 por hogar, como mejor alternativa.

La tabla 4.1 resume los resultados del modelo que corresponden a la decisión de las tecnologías a usar, el área instalada y el número de módulos correspondientes.

Tabla 4.1. Resultados obtenidos sobre el dimensionamiento del sistema

Tipo de tecnología (i)	Fotovoltaica (1)	Eólica (2)
Variable de decisión ( $x_i$ )	1.0	0.0
Área a instalar ( $A_i$ )	3.1	0.0
Numero de módulos ( $M_i$ )	14.0	0.0

Elaboración propia

Las variables de decisión  $x_i$  toman el valor de 1 y 0 para ambas fuentes de energía (i). Esto significa que el sistema solo empleará energía fotovoltaica y no eólica. Asimismo, el número de módulos a instalar son 14, los cuales ocuparán un área de 3.1 m<sup>2</sup>.

Por otro lado, los resultados también indican cuánto sería la cantidad de energía producida cada mes del año proyectado. La cantidad de energía producida y demandada se muestra en la tabla 4.2.

Tabla 4.2. Energía producida y requerida cada mes durante el año proyectado

Mes	Energía requerida (KW-h)	Energía producida (kW-h)
Enero	50.15	84.40
Febrero	45.29	69.90
Marzo	50.15	84.40
Abril	48.53	68.00
Mayo	50.15	63.30
Junio	48.53	61.20
Julio	50.15	56.20
Agosto	50.15	63.30
Septiembre	48.53	74.80
Octubre	50.15	70.30
Noviembre	48.53	81.60
Diciembre	50.15	91.40

Elaboración propia

La ilustración 4.1 permite apreciar la diferencia entre la energía producida y la demanda eléctrica para cada mes.

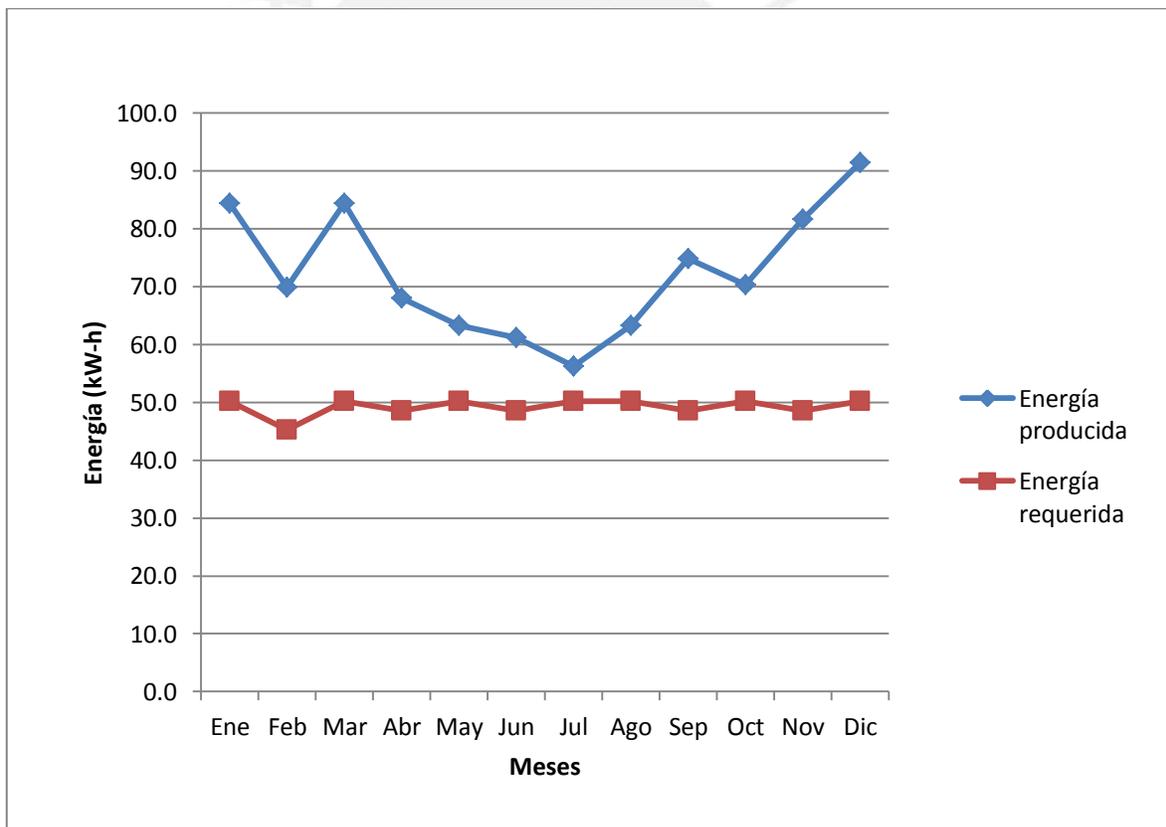


Ilustración 4.1. Comparación entre la producción de energía y la demanda para el año proyectado

Elaboración propia

De la ilustración 4.1 se puede observar que la producción de electricidad es suficiente para abastecer la demanda de electricidad de los hogares con bastante holgura en los meses de Enero a Abril y de Septiembre a Diciembre. Sin embargo, en el periodo de Junio a Agosto la holgura se acorta debido a que la irradiación disminuye por cuestiones climatológicas; siendo en Julio donde la holgura es la menor de todo el año.

#### 4.1.2 Definición de la propuesta

Hasta el momento se ha determinado que la alternativa más conveniente es usar solo paneles fotovoltaicos y se logró dimensionar la cantidad de paneles que necesita un hogar. Sin embargo, tal como se explicó en el capítulo 1, un sistema de generación fotovoltaica, en este caso, está compuesto por 4 componentes principales: paneles, inversor, regulador y banco de baterías. En este acápite se realizará la selección de dichos componentes de acuerdo al cálculo de su capacidad requerida, lo cual se detalló también en el capítulo 1, de manera que se defina cuáles y cuántos componentes se comprarán para electrificar cada hogar. Los elementos se muestran en la ilustración 4.2.

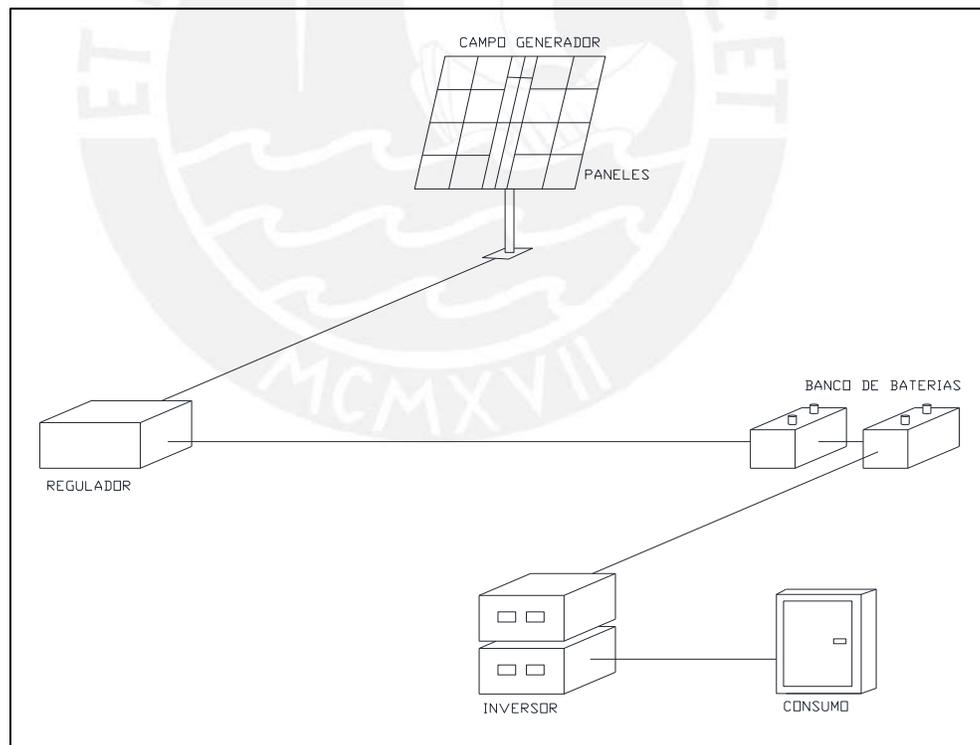


Ilustración 4.2. Elementos del sistema de generación de electricidad.

Elaboración propia

#### 4.1.2.1 Paneles

Los paneles a usar ya fueron definidos en el capítulo 3. Debido a que cada panel tiene 12 V, usaremos ramas compuestas de dos paneles en serie. Así, conseguiremos alcanzar una tensión de 24 V que es la tensión del sistema. Asimismo, como los resultados del modelo indican que se usen 14 paneles, usaremos 7 ramas en paralelo.

#### 4.1.2.2 Regulador de carga

El criterio para el regulador de carga será que la corriente recibida proveniente del campo generador no sea mayor a su capacidad. Así, la potencia del campo generador se obtiene sabiendo que cada panel tiene 30 watts de potencia máxima y tenemos 14 paneles; esto es, la potencia del campo generador es de 420 watts. Habiendo definido el sistema a 24 V la capacidad requerida del regulador se obtendrá mediante la expresión (1).

$$Capacidad\ requerida = \frac{Potencia}{Voltaje} \dots (1)$$

De dónde se obtiene que la capacidad requerida sea 17.5 amperios.

#### 4.1.2.3 Cálculo del número de baterías

La tabla 4.3 resume las características básicas de una batería de la marca “Solar World Green” actualmente disponible en el mercado local.

Tabla 4.3. Características de la batería

Característica	Valor
Capacidad	115 Ah
Voltaje	12 V
Eficiencia	85 %
Porcentaje de descarga	70%

Elaboración propia

Primero, se procederá a calcular la capacidad requerida del banco completo de baterías de acuerdo a la siguiente fórmula en la expresión (2).

$$Capacidad\ requerida = \frac{E \times D}{DOC \times V} \dots (2)$$

Donde:

*E* : Energía diaria requerida (kW-h)

**D** : Días de autonomía

**DOC** : Porcentaje de descarga

**V** : Voltaje del sistema (Volts)

Definimos que la cantidad de días de autonomía será de 1 día. Así, el valor calculado para la capacidad del banco de baterías es 96.28 Ah.

Debido a que la tensión a proporcionar es de 24 V necesitaremos un número de ramas de 2 baterías de 12 V conectadas en serie para generar dicha tensión. El número de ramas se calculará usando la ecuación en la expresión (3).

$$\text{Número de ramas en paralelo} = \frac{\text{Capacidad requerida del banco}}{\text{Capacidad individual de baterías}} \dots (3)$$

De esta manera, el número de ramas en paralelo es 1. Por tanto, necesitaremos solo 2 baterías.

#### 4.1.2.4 Inversor

La capacidad mínima del inversor se calcula usando la ecuación en la expresión (4).

$$\text{Capacidad del inversor} = \frac{\text{Potencia en corriente alterna}}{\text{Eficiencia del inversor}} \dots (4)$$

La potencia en corriente alterna en un hogar tal como se mostró en el capítulo 3 es de 245 W. Así, la tabla 4.4 muestra las características de un inversor de la marca “Hurricane” disponible en el mercado local

Tabla 4.4. Características del inversor

Característica	Valor
Capacidad	500 W
Voltaje	24 V
Eficiencia	85 %

Elaboración propia

Puede comprobarse que, con su eficiencia de 85%, la capacidad mínima del inversor requerida es de 288.23 W; requisito que se cumple pues su capacidad es de 500 W. Finalmente, la tabla 4.5 resume los datos de la selección realizada de todos los componentes.

Tabla 4.5. Resumen de la selección

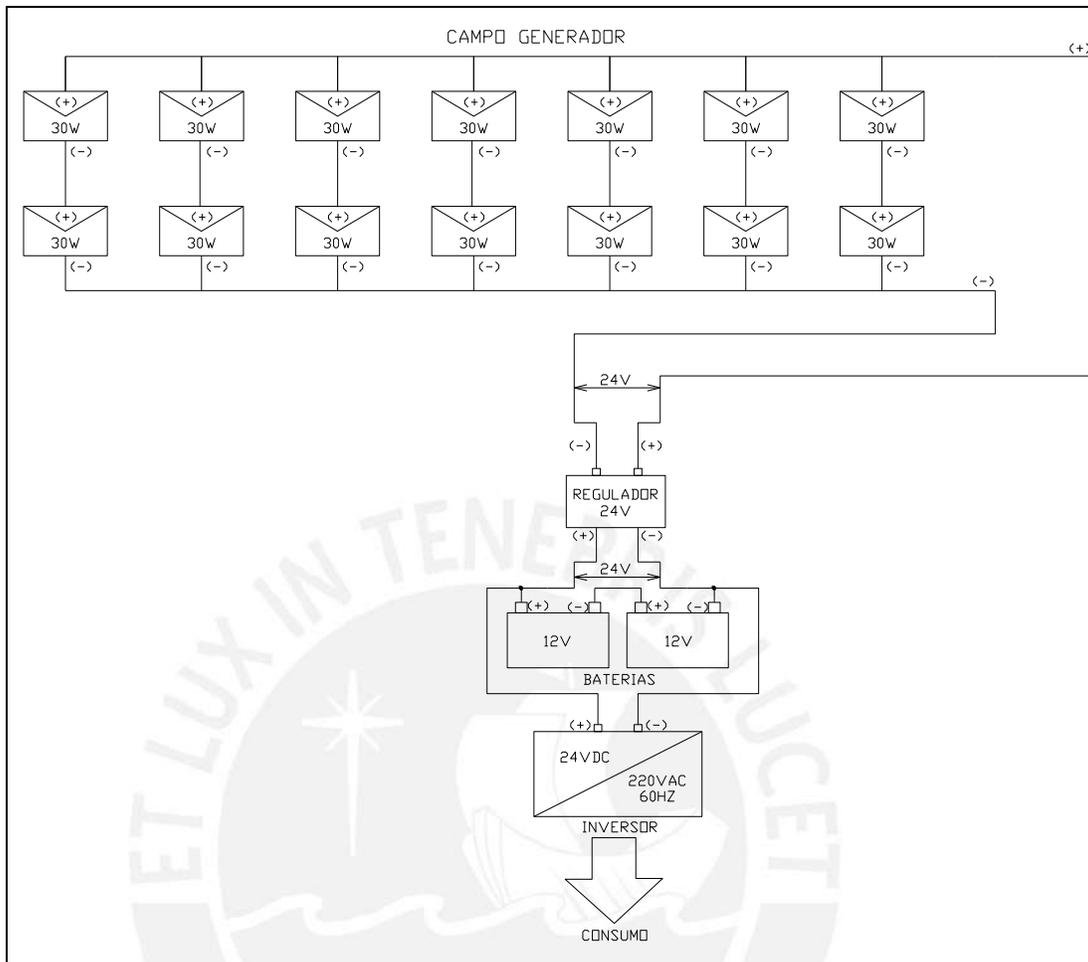
Componente	Cantidad	Capacidad mínima requerida	Capacidad seleccionada
Paneles	14	-	30.0 W
Baterías	2	96.3 Ah	115.0 Ah
Regulador <sup>11</sup>	1	17.5 A	30.0 A
Inversor	1	288.3 W	500.0 W

**Elaboración propia**

Nótese que cada componente posee una capacidad mayor a la mínima requerida. Asimismo, la tabla 4.5 no contiene la capacidad mínima requerida de los paneles porque estos fueron seleccionados con dicha capacidad con el fin de hacer flexible el dimensionamiento. Los elementos que forman parte del sistema se definieron en base a los resultados del modelo desarrollado en el capítulo 3 y los cálculos realizados en esta sección. El esquema de conexión de todos ellos se muestra en la ilustración 4.3.



<sup>11</sup> El regulador seleccionado es de la marca “Digital”, actualmente disponible en el mercado local.



**Ilustración 4.3. Esquema de conexiones eléctricas del sistema fotovoltaico.**

**Elaboración propia**

### 4.1.3 Flujo de efectivo

Habiendo definido cuáles y cuántos componentes se comprarán por hogar, en este acápite se definen los costos asociados a los equipos: su compra, instalación, la renovación de ellos a lo largo de la vida útil del sistema, su limpieza y mantenimiento.

La tabla 4.6 resume la información de los costos iniciales que corresponden a los componentes principales, otros como los referentes a cableado y los de instalación.

Tabla 4.6. Costos de los componentes

Componente	Cantidad	Costo unitario (S/)	Costo total (S/)
Paneles	14	120.0	1680.0
Baterías	2	550.0	1100.0
Regulador	1	380.0	380.0
Inversor	1	220.0	220.0
Cableado	-	-	250.0
Instalación	-	-	250.0

**Elaboración propia**

Así, queda definido que el costo inicial del sistema será de S/ 3,880. Asimismo, existen otros costos como los de mantenimiento y limpieza así como el reemplazo de las 2 baterías cada 8 años y el reemplazo del inversor y regulador cada 5 años. En la tabla 4.7 se indican dichos costos adicionales así como los periodos en los cuales se incurrirá en ellos a lo largo de 20 años que corresponden al tiempo de vida de los paneles solares.

Tabla 4.7. Costos adicionales

Costo	Monto (S/)	Periodos en que se incurre
Reemplazo de baterías	1,100	Cada 8 años
Reemplazo de controlador	380	Cada 5 años
Reemplazo de inversor	220	Cada 5 años
Limpieza	5	Cada año
Mantenimiento	30	Cada 5 años

**Elaboración propia**

Finalmente, todos los costos realizados por hogar a lo largo de los 20 años de vida del sistema se indican en las tablas 4.8 y 4.9.

Tabla 4.8. Flujo de efectivo hasta el año 10

Costo (S/)	Año										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Inversión inicial	3,880										
Limpieza		5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Mantenimiento						30					30
Reemplazo de baterías									1,100		
Reemplazo de controlador						380					380
Reemplazo de inversor						220					220

**Elaboración propia**

Tabla 4.9. Flujo de efectivo del año 11 al 20

Costo (S/)	Año									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Limpieza	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Mantenimiento					30					30
Reemplazo de baterías						1,100				
Reemplazo de controlador					380					
Reemplazo de inversor					220					

Elaboración propia

Con este flujo económico se procederá a calcular los indicadores en el acápite 4.2.

## 4.2 Análisis de indicadores

La propuesta ha sido analizada mediante 4 indicadores: técnico-económicos, económicos, sociales y ambientales.

### 4.2.1 Técnico-económicos

El indicador más usado en el análisis económico de los sistemas híbridos de energía es el *Levelized Cost of Energy* (LCE, por sus siglas en inglés) (Okinda y Odero, 2015). Este indicador es definido como el ratio entre el valor presente de todos los costos a realizar durante el tiempo de vida del sistema (inversión inicial, costo de mantenimiento, reposición de equipos, etc.) y la energía producida (Luna y otros, 2011).

IRENA (2014) presenta la metodología para el cálculo de este indicador, el cual es ampliamente usado a nivel internacional para la comparación de proyectos de electrificación a base de energías renovables. La fórmula para el cálculo se presenta en la expresión (5).

$$LCE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + M_t + F_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}} \dots (5)$$

Donde:

$I_t$  : Gastos de inversión en el año t

$M_t$  : Gastos de operación y mantenimiento en el año t

$F_t$  : Gastos en combustible en el año t

$E_t$  : Energía generada en el año t

$r$  : Tasa de descuento

$n$  : Tiempo de vida del sistema

De esta manera, la ecuación en (5) indica que el LCE es el precio al cual se podría vender la energía de manera que iguale los costos incurridos tomando en consideración el valor del dinero en el tiempo.

Para el cálculo de este indicador tomamos los costos ya definidos en las tablas 4.8 y 4.9. Asimismo, la energía generada se estima de los resultados obtenidos en este capítulo presentados en el acápite 4.1.1. La tasa de descuento fue fijada en 10 % y corresponde a la tasa usada por IRENA para sus cálculos en la región en cuestión.

Así, el valor calculado es de 0.22 \$/kW-h. Este valor puede ser comparado con la base de datos mundial que posee IRENA de los proyectos de electrificación realizados a base de fuentes renovables. El resumen de resultados de los proyectos reales se muestra en la ilustración 4.4.

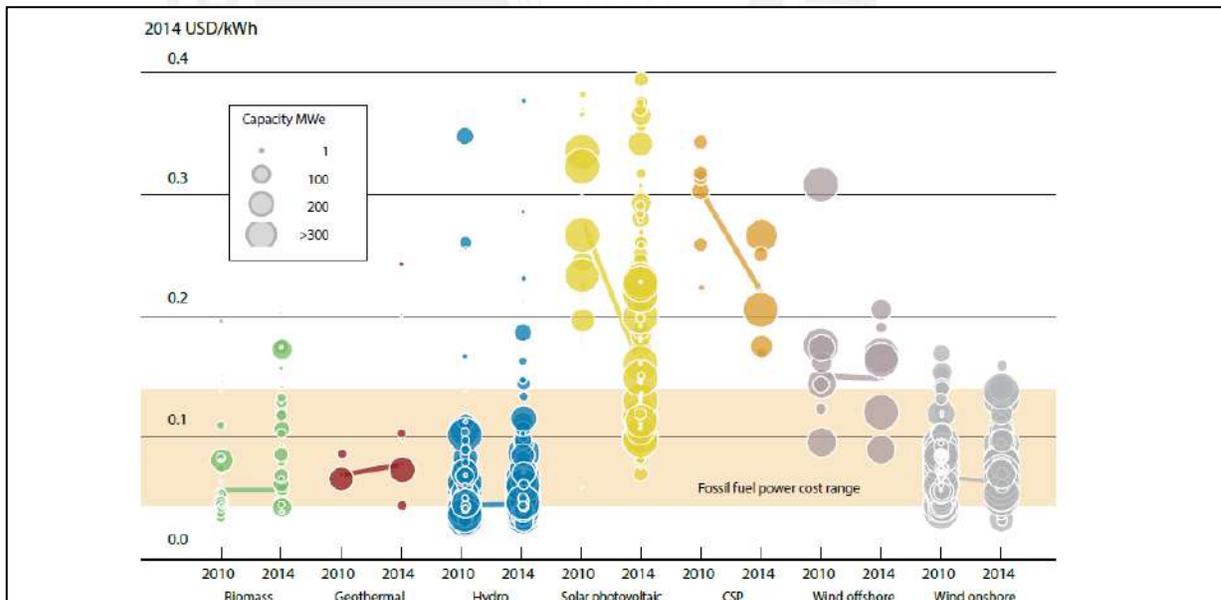


Ilustración 4.4 Comparación de LCE entre proyectos reales a nivel mundial

Fuente: IRENA. 2014

Puede observarse que el indicador calculado de la propuesta se encuentra dentro del rango de valores de proyectos llevados a cabo en todo el mundo que varía principalmente entre 0.1 y 0.4 \$/kW-h.

#### 4.2.2 Económicos

El indicador con el cual mediremos el desempeño económico de la propuesta será el VAN el cual se calculará desde el punto de vista de una ONG u organización similar que quiera llevar a cabo un proyecto de electrificación; lo cual es posible según el marco legal señalado en el capítulo 1. La electrificación se llevará a cabo en 120 hogares agropecuarios de Lomo de Corvina que, según se indicó en el capítulo 2, tienen carencia de este servicio pues no pueden acceder por sus medios. Para el análisis de los indicadores de tal caso, los montos que desembolsará la ONG por cada hogar fueron mostrados en las tablas 4.8 y 4.9. Adicionalmente, para analizar los ingresos que tendrá la ONG se tienen las siguientes consideraciones:

- a) La propuesta se analiza desde el punto de vista de la ONG quien incurrirá en la inversión inicial para 120 hogares agropecuarios. Estos le retribuirán mensualmente una cuota por el uso de la electricidad a la ONG. No obstante, el VAN a calcular será por cada hogar.
- b) Se recibe un capital por parte del estado al inicio para realizar el proyecto que corresponde a un porcentaje del monto total a gastar a lo largo de los 20 años de duración del proyecto<sup>12</sup>.

Para delimitar el rango en el cual puede variar la cuota mensual que pagarán los hogares se analizará la cuota cobrada en otros proyectos. Así, la tabla 4.10 indica las cuotas mensuales y otra información de cuatro proyectos de electrificación rural.

Tabla 4.10. Valores de referencia de tarifas mensuales para proyectos similares

Proyecto	Viviendas objeto	Costo de construcción (\$)	TIR	Tarifa (soles)
San Juan	100	120,889	12.3%	9.53
Tarapoto	45	43,825	6.3%	9.89
Yerba Buena	465	920,120	10.2%	6.47
Balsapuerto	357	806,267	11.2%	6.63

Fuente: Ministerio de Energía y Minas. 2008

<sup>12</sup> El tiempo de vida del proyecto se define en 20 años por ser el tiempo de vida de los componentes principales que son los paneles solares.

De la tabla 4.10 se observa que la cuota mensual varía en el rango de S/ 6 a S/ 10. Para definir el porcentaje de subsidio que necesita el proyecto se analizará el efecto de la variación del subsidio y la cuota (en el rango delimitado) sobre el VAN, de manera que se pueda encontrar un subsidio lo suficientemente bajo que permita obtener un VAN positivo. Para ello utilizaremos una tasa anual de 7% que corresponde a la ONG Desco.

Así, la tabla 4.11 muestra un análisis de como varía el VAN para las combinaciones de cuota mensual (fila superior, de 6 a 10 soles) y porcentaje de subsidio (columna izquierda, de 55% a 63 %).

Tabla 4.11. Valores del VAN para cada combinación de subsidio (columna) y cuota (fila) dentro del rango objetivo

		CUOTA (S/)								
		6.00	6.50	7.00	7.50	8.00	8.50	9.00	9.50	10.00
SUBSIDIO	55%	-635.1	-563.3	-491.6	-419.8	-348.0	-276.3	-204.5	-132.7	-60.9
	56%	-554.1	-482.3	-410.6	-338.8	-267.0	-195.3	-123.5	-51.7	20.1
	57%	-473.1	-401.3	-329.6	-257.8	-186.0	-114.3	-42.5	29.3	101.1
	58%	-392.1	-320.3	-248.6	-176.8	-105.0	-33.3	38.5	110.3	182.1
	59%	-311.1	-239.3	-167.6	-95.8	-24.0	47.7	119.5	191.3	263.1
	60%	-230.1	-158.3	-86.6	-14.8	57.0	128.7	200.5	272.3	344.1
	61%	-149.1	-77.3	-5.6	66.2	138.0	209.7	281.5	353.3	425.1
	62%	-68.1	3.7	75.4	147.2	219.0	290.7	362.5	434.3	506.1
	63%	12.90	84.67	156.44	228.21	299.98	371.74	443.51	515.28	587.05

Elaboración propia

En la tabla 4.11 se muestran los valores en azul con un VAN negativo. Se puede observar que para una cuota de S/ 6 un subsidio del 63% asegura un VAN positivo, mientras que para una cuota de S/ 10 basta con un 56% de subsidio. Es conveniente también analizar el subsidio necesario para una cuota de S/ 35 porque este es el valor de la cuota mensual que pagan actualmente los hogares en Lomo de Corvina para conseguir una conexión clandestina. Así la tabla 4.12 resume estos tres escenarios.

Tabla 4.12. Indicadores económicos de la propuesta

Alternativa	Cuota(S/)	Subsidio (%)	Subsidio (S/)	VAN (S/)
1	6.0	63.0%	612,360	12.9
2	10.0	56.0%	544,320	20.1
3	35.0	12.0%	116,640	44.5

Elaboración propia

Finalmente, analizaremos si el subsidio total recibido por el gobierno va acorde a los proyectos de electrificación en el que este invierte. Para ello, la tabla 4.13 muestra un ratio de soles invertidos por vivienda electrificada que es calculado para los cuatro proyectos reales.

Tabla 4.13. Cálculo del ratio soles invertidos por vivienda para proyectos reales

Proyecto	Viviendas objeto	Costo de construcción (\$)	S/ por vivienda
San Juan	100	120,889	4,231.1
Tarapoto	45	43,825	3,408.6
Yerba Buena	465	920,120	6,925.3
Balsapuerto	357	806,267	7,904.6

**Elaboración propia**

De la tabla 4.13 se puede observar que para estos cuatro proyectos el ratio entre monto invertido y número de viviendas suele ir desde 3,400 a 7,900 soles por vivienda electrificada. Para comparar si las alternativas propuestas se encuentran dentro de ese rango la tabla 4.14 muestra el ratio para cada una de ellas.

Tabla 4.14. Cálculo del ratio soles invertidos por vivienda para las tres alternativas

Proyecto	Viviendas objeto	Subsidio (S/)	S/ por vivienda
Alternativa 1	120	612,360	5,103
Alternativa 2	120	544,320	4,536
Alternativa 3	120	116,640	972

**Elaboración propia**

De la tabla 4.14 puede notarse que las alternativas 1 y 2 se encuentran dentro del rango deseado. La alternativa 3 tiene un ratio menor pero a costa de ser un caso extremo con una tarifa mensual muy elevada por lo que se descarta. Así, las alternativas 1 y 2 no exceden el rango del ratio calculado; sin embargo, se selecciona la alternativa 1 por tener la tarifa más baja. Así, la tabla 4.15 resume los indicadores calculados para la propuesta seleccionada.

Tabla 4.15. Indicadores económicos de la propuesta.

Indicador	Valor (S/)
Tarifa mensual para cada hogar	6.0
Subsidio del Estado	612,360.0
Soles invertidos del Estado por hogar	5,103.0
VAN	12.9

**Elaboración propia**

Así, la tabla 4.15 muestra los indicadores de la propuesta de tal manera que se alcanza una tarifa mensual a los hogares y un ratio de monto invertido del Estado por vivienda dentro del rango de valores de proyectos reales y, al mismo tiempo, alcanzando un VAN positivo lo que indica que la propuesta puede ser tomada en cuenta para un proyecto de electrificación.

#### **4.2.3 Sociales**

La Universidad del Pacífico (UP) (2013) ha realizado una consultoría denominada “Determinación de la metodología de cálculo de los beneficios sociales de la electrificación rural y que calcule su valor monetario actualizado” en la cual se muestran diversos estudios realizados para cuantificar los beneficios de la electrificación rural en el Perú. Los resultados dan una estimación de los beneficios que tendrán los hogares beneficiados por la propuesta en valor monetario.

##### **4.2.3.1 Horas adicionales de estudio**

En el estudio en mención se presenta un cálculo de los beneficios indirectos en la educación a través de las horas de estudio en casa por parte de niños en edad escolar. Para ello, se realizó una “evaluación de impacto cuasi experimental ex ante”, que consiste en una comparación de observaciones para un mismo período de tiempo de hogares con y sin conexión a electricidad. Los resultados se muestran en la tabla 4.16.

Tabla 4.16. Horas adicionales de estudio para escolares y equivalencia monetaria por región.

Región	Horas adicionales de estudio diarias	Equivalencia monetaria al año (S/)
Costa	2.70	69.12
Sierra	1.04	26.60
Selva	1.26	32.25

**Fuente: UP. 2013**

#### 4.2.3.2 Acceso a radio y televisión

Para estimar los beneficios directos de la radio y televisión gracias a la electricidad, se utilizó el enfoque de sustitución de costos. Este consiste en estimar los desembolsos o gastos que el hogar rural evita o deja de asumir al dejar de emplear fuentes tradicionales de energía (como por ejemplo, pilas y baterías de auto) por tener electricidad. La tabla 4.17 presenta sus resultados.

Tabla 4.17. Beneficio económico del uso de radio y televisión mensual para hogares rurales por región.

Región	Beneficio económico (S/)
Costa	9.52
Sierra	5.30
Selva	10.84

Fuente: UP. 2013

#### 4.2.3.3 Acceso a la iluminación

La metodología usada para poder calcular los beneficios directos de la iluminación eléctrica es utilizar el enfoque del excedente del consumidor, que consiste en suponer una función de demanda y encontrar el cambio en el excedente del consumidor al reemplazar las fuentes de energía tradicionales (por ejemplo, leña y carbón) por una fuente de energía moderna, como por ejemplo la energía eléctrica. La tabla 4.18 resume los resultados.

Tabla 4.18. Beneficio económico de la iluminación eléctrica mensual para hogares rurales por región.

Región	Beneficio económico(S/)
Costa	45.68
Sierra	55.62
Selva	43.14

Fuente: UP. 2013

#### 4.2.4 Ambientales

La propuesta presentada usa fuentes limpias; es decir, al producir energía usando el sistema propuesto no se generarán emisiones de CO<sub>2</sub>, lo que representa una ventaja frente al uso de fuentes de energías fósiles. La tabla 4.19 muestra una aproximación de las emisiones de CO<sub>2</sub> para tres de las fuentes fósiles más comunes.

Tabla 4.19. Emisiones de CO<sub>2</sub> por kilowatt hora

Fuente fósil	Emisión de CO <sub>2</sub> (kg)
Gas Natural	0.18
Carbón	0.33
Gasoil	0.29

Fuente: CEMAER. 2016

Con estos datos, se procede a estimar la cantidad de kilogramos CO<sub>2</sub> que se dejan de emitir a lo largo de 20 años que corresponden al tiempo de vida del proyecto de acuerdo a la energía demandada diaria que se calculó en el capítulo 3 que equivale a 1.1 kW-h. Así, la tabla 4.20 muestra dichos resultados para 8,030 kW-h producidos.

Tabla 4.20. Ahorro de emisiones de CO<sub>2</sub>

Fuente fósil	Emisión de CO <sub>2</sub> (kg) en 20 años
Gas Natural	1,445.4
Carbón	2,649.9
Gasoil	2,328.7

Elaboración propia

Puede notarse que de haberse usado una propuesta a base de gas natural se hubiesen emitido 1,444.5 kilogramos de CO<sub>2</sub> a la atmósfera y en el caso del Carbón dichas emisiones habrían aumentado a 2,649.9 kilogramos. Asimismo, se pueden comparar las emisiones con otra fuente convencional como lo es la electrógena, la cual es la más usada en electrificación rural (Ortega, 2000). Hualpa (2006) realiza la comparación estimando la cantidad de galones de gasolina mediante la fórmula en la expresión (6).

$$\text{Volumen de combustible} = \frac{\text{Energía demandada}}{\text{Eficiencia} \times \text{Poder calorífico gasolina}} \dots (6)$$

Tanto el valor de la eficiencia de un grupo electrógeno y el poder calorífico de la gasolina son tomados como referencia del trabajo citado y corresponden a 15% y 39.8 kilowatts hora por galón, respectivamente. Reemplazando dichos datos en (6) se obtiene que a lo largo de 20 años se requerirían 1,345.06 galones de gasolina de 84 octanos que equivalen a 5,091.05 litros (1 gal = 3.785 litros).

Finalmente, sabiendo que cada litro de combustible quemado libera 0.6862 kg de CO<sub>2</sub> tenemos que el ahorro total corresponde a 3,493.48 kg de CO<sub>2</sub> por cada hogar que equivalen a 419.2 toneladas a nivel de todos los hogares beneficiados.

## CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El presente trabajo tuvo como objetivo optimizar el dimensionamiento de un sistema híbrido de generación de electricidad a base de fuentes renovables de energía para los hogares de Lomo de Corvina en Villa El Salvador. A continuación se presentan las conclusiones y recomendaciones.

### 5.1 Conclusiones

1. Aplicando un análisis de Pareto ponderado se identificó que el problema principal de los habitantes de Lomo de Corvina era la carencia de electricidad lo cual afectaba al 86 % de hogares y les hacía incurrir en un gasto mensual de S/ 35 en caso de requerir una conexión clandestina durante un mes. Asimismo, empleando el diagrama de Ishikawa, matriz Probabilidad-Impacto y el método *why-why* se concluye que las causas raíces son tres: la inhabilitación de la zona, el uso de las fuentes convencionales de energía y la falta de atención a las necesidades de los pobladores por parte de las autoridades. Finalmente, se proponen alternativas de solución y se evaluaron usando la matriz FACTIS, obteniéndose que usar autogeneración de electricidad en esta comunidad es la mejor opción.
2. El modelo presentado permite seleccionar entre las tecnologías a usar tomando en cuenta los costos relevantes tanto fijos como variables. Para ello, usa variables binarias y enteras constituyendo un modelo MILP. Esto tiene como ventaja que se incorporen en la decisión los costos de mantenimiento y limpieza que varían entre los distintos tipos de tecnología, lo cual no había sido tomado en cuenta en la literatura revisada. Asimismo, al igual que en los modelos presentados por Zaatri y Allab (2012) y Kusakana et. al. (2012), el modelo propuesto constituye un método rápido y confiable para dimensionar sistemas híbridos. No obstante, ninguno de esos dos modelos consideran restricciones de espacio, variables enteras para el número de módulos ni costos de mantenimiento y limpieza.
3. Los resultados que se obtienen al ejecutar el modelo MILP señalan que la mejor alternativa es solo usar la energía fotovoltaica y que el sistema generador de energía estará compuesto por 14 módulos fotovoltaicos con un porcentaje de utilización del espacio disponible por los hogares es de 56%. Asimismo, asumiendo un comportamiento uniforme de los componentes, la producción de

electricidad es suficiente para abastecer la demanda de electricidad de los hogares con bastante holgura en los meses de Enero a Abril y de Septiembre a Diciembre. Sin embargo, en el periodo de Junio a Agosto la holgura se acorta debido a que la irradiación disminuye por cuestiones climatológicas; siendo en Julio donde la holgura es la menor de todo el año.

4. La tarifa mensual de los hogares se reduce de S/ 35 a S/ 6 y para la ONG que se encargue de la compra de los sistemas y suministrárselos a la población se tiene un VAN de S/ 12.9. Por otro lado, la inversión del estado por hogar es de S/ 5,103 lo cual se encuentra dentro de un rango aceptable tras hacer una comparación con proyectos reales de electrificación rural. Asimismo, el costo al cual se obtiene la energía es de \$ 0.22/ kW-h, lo que se encuentra aceptable al encontrarse dentro del rango de valores de proyectos reales a nivel mundial.
5. La propuesta también tiene beneficios sociales y ambientales. Así, para cada hogar se espera un incremento en las horas de estudio, acceso a radio y televisión y un aprovechamiento de la iluminación cuyo beneficio económico mensual se estima en S/ 69.12, S/ 9.52 y S/ 45.68 respectivamente. Asimismo, electrificar los 120 hogares usando la propuesta señalada no implica la emisión de CO<sub>2</sub> mientras que si se usara un grupo electrógeno, que es la energía convencional más usada en estos casos, las emisiones a lo largo de 20 años corresponden a 419.2 toneladas lo que indica el impacto ambiental negativo en el que se está dejando de incurrir.

## **5.2 Recomendaciones**

1. El modelo obtenido puede ser aplicado en hogares de otras poblaciones donde además existan más tipos de fuentes de energías renovables. Por ejemplo, en el trabajo de Kusakana et. al. (2012) se incluye la energía mini-hidráulica. Asimismo Zaatri y Allab (2012) sugieren que se puede considerar la biomasa como fuente alternativa de energía. Para hacer esto con el modelo propuesto, el único requerimiento es que la energía producida por cada tipo de fuente se pueda expresar linealmente en términos del área de sus módulos.

2. Para posteriores trabajos es posible desarrollar un modelo con enfoque “*bottom-up*” que tome en consideración detalles más técnicos en las restricciones que no se han tomado en cuenta como: la reducción de la energía producida por el efecto de la sombra, variaciones en los parámetros físicos (irradiación, velocidad del viento, velocidad del agua, etc.) durante el día y la reducción de la producción de energía en los módulos fotovoltaicos por el ángulo de inclinación de los mismos.
3. Además de los métodos de optimización usando programación lineal, existen otros métodos para optimizar el dimensionamiento de un sistema híbrido de generación de electricidad tales como el uso de la simulación estocástica presentada por Valizadeh, Hakimi y Moghaddas (2010). Asimismo, se puede hacer uso de un software para simular específicamente sistemas con componentes electrónicos como SCADA, el cual se usa en el trabajo desarrollado por Dulau y Abrudean (2015). La ventaja de estos métodos sobre el método propuesto es que toman en consideración la interacción entre los componentes del sistema.
4. Cabe mencionar que la autogeneración de energía no solo funciona para autoconsumo. En el caso puntual de un sistema que funcione con generación distribuida (conectado a la red) que es el caso de otros países los modelos de Programación Lineal toman en cuenta otras consideraciones tales como el ingreso por la generación de la electricidad que es vendida al sistema eléctrico nacional. No obstante, las aplicaciones aisladas de red eléctrica no se limitan al consumo de los hogares sino que abarcan el bombeo de agua e instalaciones para comunicaciones y señalización lo cual resulta interesante de investigar para posteriores trabajos por los posibles beneficios que puede tener para el país Enríquez Harper (2014).

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ackermann, T., Andersson, G., & Söder, L. (2001). Distributed Generation: a Definition. *Electric Power System Research*, 57(2001), 195-204.
- Agencia Peruana de Noticias. (24 de Junio de 2015). Perú: sector agrario creció 3,2% en los últimos 4 años y es la actividad que mueve al país. *América Economía*. Recuperado de <http://www.americaeconomia.com/negocios-industrias/peru-sector-agrario-crecio-32-en-los-ultimos-4-anos-y-es-la-actividad-que-mueve>
- Akella, A. K., Sharma, M. P., & Saini, R. P. (2007). Optimum utilization of renewable energy sources in a remote area. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(5), 894-908.
- Alabert, A., Somoza, A., Graells, M., & De la Hoz, J. (4-8 Abril del 2016). "A general MILP model for the sizing of islanded/grid-connected microgrids". Ponencia llevada a cabo en IEEE International Energy Conference (ENERGYCON) 2016, Leuven, Bélgica.
- Aliexpress. (20 de Agosto de 2016). Aliexpress. Obtenido de <https://es.aliexpress.com/item/S-700-MI-24v-Wind-Generator-Turbines-Mini-Wind-Energy-For-Homes-Boats/32716789602.html?spm=2114.43010208.4.119.ShvhDQ>
- André, F. J., De Castro, L. M., & Cerdá, E. (2009). Las energías renovables en el ámbito internacional. *Cuadernos Económicos de ICE*, 83, 11-36.
- Arias, J. (2009). Estudio de la utilización de energía Eólica para la generación de electricidad en un asentamiento humano de San Juan de Marcona (tesis de pregrado). Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú.
- Boyle, G. (2004) Solar photovoltaics. En *Renewable Energy* (pp. 66-106). Londres: Oxford University Press.
- Centro de Estudios en Medio Ambiente y Energías Renovables. (14 de Mayo de 2016). Obtenido de <http://www.gstriatum.com/energiasolar/blog/2008/05/19/cuanto-co2-se-ahorra-con-la-energia-solar/>
- Chinese, D. (2008). Optimal Size and layout planning for district heating and cooling network with distributed generation options. *International Journal of Energy, Section Management*, 2(3), 385-419.
- Comité de operación del Sistema Interconectado Nacional (COES). (29 de Noviembre de 2016). COES SINAC. Obtenido de <http://www.coes.org.pe/Portal/portalinformacion/demanda>
- Comunidad Urbana Autogestionaria de Villa El Salvador (CUAVES). (1984). Un pueblo, una realidad: Villa El Salvador. Lima.

- Congreso de la República. (1992). Decreto de ley N° 25844. Ley de concesiones eléctricas. Lima.
- Congreso de la República. (2002). Ley N° 27744. Ley de electrificación rural y de localidades aisladas y de frontera. Lima.
- Congreso de la República. (2005). Ley N° 28546. Ley de promoción y utilización de recursos energéticos renovables no convencionales en zonas rurales, aisladas y de frontera del país. Lima.
- Congreso de la República. (2010). Decreto Legislativo N° 1002. Decreto legislativo de promoción de la inversión para la generación de electricidad con el uso de energías renovables. Lima.
- Diez, J. (22 de Noviembre de 2015). DESCO. Obtenido de [http://www.desco.org.pe/sites/default/files/quehacer\\_articulos/files/11\\_Diez\\_Qh184.pdf](http://www.desco.org.pe/sites/default/files/quehacer_articulos/files/11_Diez_Qh184.pdf)
- Ding, J., & Somani, A. (15-16 Abril del 2010). "A long-term investment planning model for mixed energy infrastructure integrated with renewable energy". Ponencia llevada a cabo en Green Technologies Conference, Texas, Estados Unidos de América.
- Dulau, I., & Abrudean, M. (11-12 Junio del 2015). "Simulation of a Power System with Renewable Energy Sources Considering Load Profiles". Ponencia llevada a cabo en el 13th International Conference of Engineering of Modern Electric Systems. Faculty of Electrical Engineering and Information Technology University of Oradea. Nueva York, Estados Unidos de América.
- EMPRESA EMARESA. (s.f.). Paneles solares fotovoltaicos. Obtenido de Emaresa: <http://www.emaresa.cl/energia/index.php/energia-solar/paneles-solares-fotovoltaicos>
- Enríquez, G. (2014). Instalaciones y sistemas fotovoltaicos. México: Limusa.
- Ferrer-Martí, L., Domenech, B., García-Villoira, A., & Pastor, R. (2012). A MILP model to design hybrid wind–photovoltaic isolated rural electrification projects in developing countries. *European Journal of Operational Research*, 126(2), 293-300.
- Ferrer-Martí, L., Pastor, R., Capó, M., & Velo, E. (2011). Optimizing microwind rural electrification projects. A case study in Peru. *Journal of Global Optimization*, 50(1), 127-143.
- HOMER ENERGY. (15 de Marzo de 2016). Products. Obtenido de Homer Pro: <http://www.homerenergy.com/software.html>

- Hualpa, H. (2006). Estudio de factibilidad de sistemas híbridos eólico–solar en el departamento de Moquegua (tesis de pregrado). Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú.
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2012). IV Censo Nacional Agropecuario. Lima.
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2007). Censos Nacionales 2007: XI de Población y VI de Vivienda. Sistema de Consulta de Principales Indicadores demográficos, sociales y económicos. Lima.
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2012). Resultados Definitivos: IV Censo Nacional Agropecuario 2012. Lima.
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2015). Perú: Estimaciones y Proyección por sexo según departamento, provincia y distrito, 2000-2015. Lima.
- International Renewable Energy Agency (IRENA). (2014). Renewable Power Generation Costs. Bonn: IRENA. Obtenido de IRENA [https://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA\\_RE\\_Power\\_Costs\\_2014\\_report.pdf](https://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_RE_Power_Costs_2014_report.pdf)
- Jaramillo, O. (2012). Energía eólica, implementación de proyectos aplicando sistemas híbridos. Ciudad de México, Distrito Federal, México. Obtenido de <http://chrome-extension://gbkeegbaiigmenfmjfcldgdpimamgkj/views/app.html>
- Javer, F., & Arshad, N. (2008) On the Use of Linear Programming in Optimizing Energy Costs. *Computer Science*. 5343(1), 303-310.
- Kusakana, K., Vermaak, H.J., & Numbi, B. (9-13 Julio de 2012) “Optimal sizing of a hybrid renewable energy plant using linear programming”. Ponencia llevada a cabo en Power Engineering Society Conference and Exposition in Africa. Johannesburgo, Sudáfrica.
- La República. (21 de Noviembre de 2015). Luces y sombras en Villa El Salvador. La República Perú. Recuperado de: <http://larepublica.pe/09-11-2007/luces-y-sombras-en-villa-el-salvador>
- Lucian, J., & Abrudean, M. (11-12 Junio de 2015). “Simulation of a Power System with Renewable Energy Sources Considering Load Profiles”. Ponencia llevada a cabo en 13th International Conference on Engineering of Modern Electric Systems. IEEE. Nueva York, Estados Unidos de América.
- Luna-Rubio, R., Trejo-Perea, M., Vargas-Vázquez, D., & Ríos-Moreno, G.J. (2012). Optimal sizing of renewable hybrids energy systems: A review of methodologies. *Solar Energy*, 86(4), 1077-1088.

- Lyzwa, W., Wierzbowski, M., & Olek, B. (2015). MILP formulation for energy mix optimization. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 11(5), 1166-1178.
- Medina, A. (2016). Nota de campo de la recolección de datos de los precios de los comerciantes de paneles solares. Lima.
- Ministerio de Energía y Minas. (2008). Estudio del Plan Maestro de Electrificación Rural con Energía Renovable en la República del Perú. Informe Final. Lima.
- Ministerio de Energía y Minas. (2016). Consejos para ahorrar energía eléctrica en el hogar. Lima.
- Ministerio de Trabajo (MINTRA). (2009). Información local para la gestión pública: Modelo el Distrito de Villa el Salvador. Lima. Obtenido de [http://www.mintra.gob.pe/archivos/file/estadisticas/peel/estadisticas/presentacion\\_estrategia\\_creecer.pdf](http://www.mintra.gob.pe/archivos/file/estadisticas/peel/estadisticas/presentacion_estrategia_creecer.pdf)
- Minitab 17. (2017). Quality Tools. Obtenido de Soporte de Minitab 17: <http://support.minitab.com/es-mx/minitab/17/topic-library/quality-tools/quality-tools/what-is-a-cause-and-effect-diagram/>
- Municipalidad de Villa El Salvador (MUNIVES). (s.f.). Aspectos Urbanos. Lima. Obtenido de <http://www.munives.gob.pe/VillaElSalvador/Diagnostico/ASPECTO%20urbano.pdf>
- Municipalidad de Villa El Salvador (MUNIVES). (s.f.). Capítulo IV. Características de los barrios marginales de Lima. Lima. Obtenido de [http://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4\\_uibd.nsf/B5BB9C6DBA9AF49A05257DC50081492E/\\$FILE/40\\_pdfsam\\_720450WP0SPANI0s0Lima0Metropolitana.pdf](http://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/B5BB9C6DBA9AF49A05257DC50081492E/$FILE/40_pdfsam_720450WP0SPANI0s0Lima0Metropolitana.pdf)
- Municipalidad de Villa El Salvador(MUNIVES). (2005). Diagnóstico de Villa El Salvador. Lima.
- Mureddu, M., Caldarelli, G., Chessa, A., Scala, A., & Damiano, A. (2015). Green Power Grids: How Energy from Renewable Sources Affects Networks. *PlosOne*, 10(9), 1-15.
- Okinda, V., & Odero, N. (2015). A review of techniques in optimal sizing of hybrid renewable energy systems. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 4(1), 153-163.
- Oktay, A., Isen, E., Kocaman, C., & Kekezoglu, B. (2015). Wind energy potential of Marmara region in Turkey. *International Journal of Energy and Environment*, 6(1), 17-26.

- Opalux. (16 de Noviembre de 2016). Productos. Obtenido de Empresa Opalux:  
<http://www.opalux.com.pe/?product=sy-30m-panel-solar-monocristalino-30w>
- Organismo Superior de la Inversión en Energía y Minería (OSINERGMIN). (2015).  
 Información comercial FOSE. Lima.
- Ortega, M. (2000) Energía solar fotovoltaica. En Energías Renovables (pp. 109-157).  
 Madrid: Paraninfo.
- Perales, T. (2012) Procedimiento fotovoltaico. En El universo de las energías renovables  
 (pp. 81-109). Barcelona: Marcombo.
- Practical Action. (2015) Energía para los hogares. En Panorama energético de los pobres  
 2014. (pp. 3-16). Lima: Soluciones prácticas.
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). (2014). Informe sobre  
 Desarrollo Humano 2014. Sostener el progreso Humano: reducir  
 vulnerabilidades y construir resiliencia. Washington.
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. (2009). Cuánto tenemos, cuánto nos  
 falta: unidad del Informe sobre Desarrollo Humano. Cartilla I: 'Las brechas en el  
 territorio'. Lima.
- Puga, M. (Octubre de 2015). Los cinco Por Qué's. Praga, Chile.
- Ramakumar, R., Sudhakara, P., & Ashenayi, K. (1986). A Linear Programming Approach  
 to the Design of Integrated renewable Energy Systems for Developing  
 Countries. IEEE Transactions on energy Conversion, 1(4), 18-24.
- Ramírez, D., & Riofrío, G. (2006). Formalización de la propiedad y mejoramiento de  
 barrios: bien legal, bien informal. Lima: Desco. Obtenido de  
<http://urbano.org.pe/formalizacion-de-la-propiedad-y-mejoramiento-de-barrios-bien-legal-bien-marginal/>
- Robbins, S., & Coulter, M. (2014). Administración. México: Pearson.
- Ruangpattana, S., Klabjan, D., & Arinez, J. (20-13 Marzo del 2011). "Optimization of On-  
 site Renewable Energy Generation for Industrial Sites". Ponencia llevada a cabo  
 en IEEE Power systems conference and exposition. Arizona, Estados Unidos de  
 América.
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). (2003). Atlas de  
 Energía Solar. Lima. Obtenido de <http://dger.minem.gob.pe/atlassolar/>
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). (2016). Parámetros  
 climatológicos solicitados. Lima.
- Taylor, J., & Love, B. (2012). "Proof-of-concept for a green energy linear program for  
 optimizing deployments". Ponencia llevada a cabo en Mathematics Faculty

Proceedings & Presentations. University of Nebraska. Nebraska, Estados Unidos de América.

TODOPRODUCTIVIDAD. (s.f.). Sobre el diseño de aplicaciones con turbinas eólicas. Obtenido de <http://todoproductividad.blogspot.pe/2010/02/sobre-el-diseno-de-aplicaciones-con.html>

Universidad del Pacífico. (2013). Determinación de la Metodología de Cálculo de los Beneficios Sociales de la Electrificación Rural y que calcule su Valor Monetario Actualizado. Lima. Obtenido de [http://www.peru.gob.pe/docs/PLANES/13414/PLAN\\_13414\\_2014\\_Inf\\_final\\_BBS\\_S\\_ER.pdf](http://www.peru.gob.pe/docs/PLANES/13414/PLAN_13414_2014_Inf_final_BBS_S_ER.pdf)

Universidad Nacional de Ingeniería. (2011). Microzonificación sísmica del distrito de Villa El Salvador. Lima. Obtenido de [http://eudora.vivienda.gob.pe/OBSERVATORIO/Documentos/EstudiosyAsistencia/Estudios/MicrozonificacionSismicaLima/ves/INFORME\\_MICROZONIFICACION\\_SISMICA\\_ves.pdf](http://eudora.vivienda.gob.pe/OBSERVATORIO/Documentos/EstudiosyAsistencia/Estudios/MicrozonificacionSismicaLima/ves/INFORME_MICROZONIFICACION_SISMICA_ves.pdf)

Valiadeh, H. (14-17 Junio del 2010). "Optimal Sizing of a Hybrid Power System Considering Wind Power Uncertainty Using PSO-Embedded Stochastic Simulation". Ponencia llevada a cabo en 11th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems. IEEE. Singapur.

Vera, R. (2016). Dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos. Lima: Tecsup.

Villanueva, S. (2012). Diagnóstico local participativo del consumo de drogas en el distrito de Villa el Salvador 2006. Lima. Obtenido de [http://www.cicad.oas.org/fortalecimiento\\_institucional/savia/PDF/diagnosticofinal/Diagnostico\\_Final\\_VillaElSalvador.pdf](http://www.cicad.oas.org/fortalecimiento_institucional/savia/PDF/diagnosticofinal/Diagnostico_Final_VillaElSalvador.pdf)

Yang, Y., Zhang, S., & Yunhan, X. (2015). An MILP (mixed integer linear programming) model for optimal design of district-scale distributed energy resource systems. *Energy*, 90(2), 1901-1915.

Zaatri, A., & Allab, K. (2012). Analysis of PV / Wind systems by integer linear programming. *Revue Des Energies Renouvelables*, 15(1), 111-120