

**CONSIDERACIONES PARA EL PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA
MULTIOBJETIVO DE OPTIMIZACIÓN DE POLIGENERACIÓN EN SITIO
PARA VIVIENDAS DE INTERÉS SOCIAL**

ANGÉLICA MARÍA VELA REYES
KATHERYN MARÍA DONADO MERCADO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2013

**CONSIDERACIONES PARA EL PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA
MULTIOBJETIVO DE OPTIMIZACIÓN DE POLIGENERACIÓN EN SITIO
PARA VIVIENDAS DE INTERÉS SOCIAL**

ANGÉLICA MARÍA VELA REYES
KATHERYN MARÍA DONADO MERCADO

Trabajo de Grado para optar el título de INGENIERA ELECTRICISTA

Director: MSc. GERMÁN ALFONSO OSMA PINTO

Codirector: Dr. GABRIEL ORDÓÑEZ PLATA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2013

AGRADECIMIENTOS

A Dios y la Virgen por su imperecedero amor y misericordia. Por brindarme la sabiduría espiritual para poder seguir el camino correcto hasta este punto.

A mi familia por estar siempre junto a mí brindándome su amor. Mis padres Doris y Manuel, mi hermano Manuel Ricardo y mi prima Jessica por su incondicional apoyo, confianza y ayuda.

A mi tía Teresa y mis primos José y Andrea, por hacerme sentir como en mi propio hogar.

A Manuel Domínguez por su comprensión y por compartir conmigo todo este tiempo de entrega y dedicación, haciendo mis días más felices.

Al director MS.c Germán Osma Pinto y el codirector Gabriel Ordóñez Plata por su dedicación, entrega y orientación.

A mis profesores, amigos y compañeros que permitieron mi formación académica y crecimiento personal.

A todas esas personas que de manera directa o indirecta han contribuido con la culminación de este sueño.

Katheryn María Donado Merado

AGRADECIMIENTOS

A Dios por su amor y bendiciones recibidas.

A mis padres Luis y Margy por su infinito amor y apoyo incondicional.

A mi hermana Laura por estar ahí en todo momento brindandome su cariño y amistad.

A mi tia Blanca por ser como mi segunda mamá, gracias por su apoyo y motivación permanente.

A MS.c Germán Alfonso Osma Pinto y Dr. Gabriel Ordóñez Plata por su orientación, enseñanza y dedicación para la realización de este proyecto.

A todas las personas que hicieron posible este logro.

Angélica María Vela Reyes

CONTENIDO

	<i>Pág.</i>
1. INTRODUCCIÓN.....	19
1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE INVESTIGACIÓN	21
1.1.1. Objetivo general	21
1.1.2. Objetivos específicos y alcances.....	21
1.2. ESTRUCTURA GENERAL DEL TRABAJO DE GRADO	22
1.3. CONSTRUCCIÓN SOSTENIBLE	22
2. ASPECTOS TÉCNICOS DE LAS VIS QUE INFLUYEN EN LA IMPLEMENTACIÓN DE FUENTES DE GENERACIÓN DE ENERGÍA.....	24
2.1. NORMATIVIDAD	24
2.2. ASPECTOS CONSIDERADOS EN LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES PARA LAS VIVIENDAS DE INTERÉS SOCIAL.....	26
3. SELECCIÓN DE FUENTES DE GENERACIÓN DE ENERGÍA PARA UN SISTEMA DE POLIGENERACIÓN EN VIS	32
3.1. FUENTES DE ENERGÍAS RENOVABLES PARA LA POLIGENERACIÓN EN UNA VIS.....	32
3.1.1. Preselección de las fuentes viables.....	33
3.1.2. Selección de las fuentes para el sistema de poligeneración a implementar en las VIS	35
3.2. BIOMASA.....	37
3.2.1. Principios de la digestión anaerobia.....	39
3.2.2. Biogás obtenido	39

3.2.3.	Aplicaciones del biogás.....	40
3.3.	<i>PEDAL POWER</i>	41
3.3.1.	Definición y generalidades	42
3.3.2.	Principio de funcionamiento y mecánica del sistema de generación	43
3.3.3.	El potencial humano en la generación de energía eléctrica.....	44
3.4.	ENERGÍA EÓLICA	45
3.4.1.	Generalidades de la energía eólica	45
3.4.2.	Turbina eólica	47
3.5.	ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA.....	49
3.5.1.	Módulos y células fotovoltaicas	50
3.5.2.	Rendimiento técnico.....	51
3.5.3.	Maximización y optimización de la potencia de salida	51
3.6.	ENERGÍA SOLAR TÉRMICA	52
3.6.1.	Principio y estructura del sistema de energía solar térmica.....	53
3.6.2.	Instalación fotovoltaica-térmica	55
3.7.	CONSIDERACIONES DE GENERACIÓN PARA LAS FUENTES SELECCIONADAS.....	55
4.	SELECCIÓN DE MODELOS MATEMÁTICOS	57
4.1.	CRITERIOS Y SELECCIÓN DE LOS MODELOS DE CADA UNA DE LAS FUENTES	58
4.1.1.	Modelo del sistema biomasa	59
4.1.2.	Modelo del sistema <i>pedal power</i>	61
4.1.3.	Modelo del sistema eólico	64

4.1.4.	Modelo del sistema fotovoltaico	66
4.1.5.	Modelo de sistema solar térmico	69
4.1.6.	Modelo de la batería	71
4.2.	MODELADO DE SISTEMAS HÍBRIDOS	74
4.2.1.	Criterios establecidos para la selección de modelos	74
4.2.2.	Modelos seleccionados para el sistema de energía híbrido.....	76
5.	GENERALIDADES DE LA POLIGENERACIÓN, GENERACIÓN HÍBRIDA Y GENERACIÓN DISTRIBUIDA.....	81
5.1.	POLIGENERACIÓN	82
5.1.1.	Definición de poligeneración	83
5.1.2.	Cogeneración y trigeneración.....	84
5.1.3.	Clasificación de los beneficios de la poligeneración	86
5.1.4.	Ventajas y desventajas de la poligeneración	87
5.1.5.	Sostenibilidad de los sistemas de poligeneración.....	88
5.1.6.	Tecnologías CONCERTO	89
5.1.7.	Caso estudio: proyecto POLIMED.....	90
5.2.	GENERACIÓN HÍBRIDA.....	92
5.2.1.	Sostenibilidad de un sistema híbrido de energía	95
5.2.2.	Análisis del dimensionamiento y optimización	96
5.3.	GENERACIÓN DISTRIBUIDA.....	98
5.3.1.	Tipos de generación distribuida.....	100
5.3.2.	Criterios de clasificación de la generación distribuida.....	101
5.3.3.	Ventajas y desventajas de la generación distribuida	102

5.3.4.	Micro-red (MG).....	102
5.4.	IMPORTANCIA DE LA IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMAS DE POLIGENERACIÓN Y GENERACIÓN HÍBRIDA EN VIS	105
6.	GENERALIDADES SOBRE LA OPTIMIZACIÓN EN SISTEMAS DE POLIGENERACIÓN	108
6.1.	DEFINICIÓN Y GENERALIDADES DE LA OPTIMIZACIÓN.....	109
6.1.1.	CONOCIMIENTO DE LAS VARIABLES.....	111
6.1.2.	OPTIMIZACIÓN DE UN PROBLEMA MULTIOBJETIVO.....	112
6.1.3.	PROBLEMAS DE OPTIMIZACIÓN EN LOS SISTEMAS HÍBRIDOS.....	113
6.2.	TÉCNICAS METAHEURÍSTICAS.....	114
6.2.1.	Clasificación de los métodos metaheurísticos	115
6.2.2.	Algoritmos metaheurísticos	117
6.3.	TÉCNICAS DETERMINÍSTICAS.....	118
6.3.1.	Clasificación de los métodos determinísticos	119
6.4.	TÉCNICAS DETERMINÍSTICAS Y METAHEURÍSTICAS EN SISTEMAS DE POLIGENERACIÓN.....	120
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	124
7.1.	CONCLUSIONES.....	124
7.2.	RECOMENDACIONES	127
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	128
	BIBLIOGRAFÍA.....	143
	ANEXOS.....	158

ÍNDICE DE FIGURAS

	<i>Pág.</i>
Figura 1. Descripción del contenido proyecto de grado.....	22
Figura 2. Normatividad viviendas de interés social	25
Figura 3. Esquema básico de la generación de energía eléctrica y calor por biomasa	38
Figura 4. Esquema básico de generación de energía eléctrica a partir de una bicicleta estática.	44
Figura 5. Aerogeneradores eje horizontal (izquierda) y vertical (derecha).....	48
Figura 6. Elementos de un sistema de generación fotovoltaica.....	50
Figura 7. Pasos para el dimensionamiento de un sistema PV.....	52
Figura 8. Principio de la estación de generación solar.	53
Figura 9. Criterios generales para la adopción de los modelos de las fuentes de generación.....	59
Figura 10. Criterios para la selección de los modelos de generación por biomasa. 59	59
Figura 11. Proceso de generación de la energía eléctrica a través de la biomasa. 60	60
Figura 12. Criterios para la selección de los modelos de generación por <i>pedal power</i>	61
Figura 13. Fuerza aplicada sobre el pedal de una bicicleta.....	61
Figura 14. Criterios para la selección de los modelos de energía eólica.	64
Figura 15. Criterios para la selección del modelo de generación fotovoltaica.	66
Figura 16. Criterios para la selección de los modelos de la energía solar térmica. . 69	69
Figura 17. Criterios de selección para el modelo de la batería.....	71
Figura 18. Criterios de selección para el modelo del inversor.	73
Figura 19. Criterios de selección para el modelado de sistemas híbridos.	75
Figura 20. Definición del sistema de poligeneración.	83
Figura 21. Sistema de cogeneración.....	85
Figura 22. Sistema de trigeneración.	85
Figura 23. Ventajas y desventajas de la poligeneración.....	88
Figura 24. Categorías de evaluación de sostenibilidad de procesos químicos.	89
Figura 25. Sistema de poligeneración caso POLIMED.....	91
Figura 26. Tecnologías utilizadas en el proyecto POLIMED.	91
Figura 27. Estimación de la demanda proyecto POLIMED.	92
Figura 28. Concepto de generación híbrida.	93
Figura 29. Ejemplo de la estructura del sistema híbrido de energía.	94
Figura 30. Sistema renovable de generación híbrido.	97

Figura 31. Representación gráfica de la generación distribuida.....	99
Figura 32. Comparación de Unidad central y unidad distribuida.	99
Figura 33. Tipos y tecnologías de la generación distribuida.....	100
Figura 34. MG basado en fuentes de energías renovables.....	104

ÍNDICE DE TABLAS

	<i>Pág.</i>
Tabla 1. Objetivos específicos y alcance del proyecto de grado.	21
Tabla 2. Aspectos técnicos de las VIS para la implementación de fuentes de energía	27
Tabla 3. Posibles fuentes de energía renovable para una vivienda de interés social.	34
Tabla 4. Fuentes de energía seleccionadas para un sistema de poligeneración.....	36
Tabla 5. Valores del coeficiente de Hellmann según el terreno.....	47
Tabla 6. Requerimientos de generación de las fuentes seleccionadas.	56
Tabla 7. Variables utilizadas para el modelo de las necesidades eléctricas y de agua.	76
Tabla 8. Diferentes clasificaciones de la GD.....	101
Tabla 9. Ventajas de la generación distribuida.....	102
Tabla 10. Desventajas de la generación distribuida.	102
Tabla 11. Técnicas metaheurísticas utilizadas en sistemas de poligeneración. ...	121
Tabla 12. Técnicas determinísticas utilizadas en sistemas de poligeneración. ...	122

ÍNDICE DE ANEXOS

	<i>Pág</i>
ANEXO A. GENERALIDADES DE LA ENERGÍA BIOMASA	158
ANEXO B. GENERALIDADES DE <i>PEDAL POWER</i>	163
ANEXO C. GENERALIDADES DE LA ENERGÍA EÓLICA	168
ANEXO D. GENERALIDADES DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA	174
ANEXO E. GENERALIDADES DE LA ENERGÍA SOLAR TÉRMICA.....	182
ANEXO F. MODELADO SISTEMAS DE GENERACIÓN.....	188
ANEXO G. GENERALIDADES SOBRE OPTIMIZACIÓN.....	201

RESUMEN

TÍTULO: CONSIDERACIONES PARA EL PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA MULTIOBJETIVO DE OPTIMIZACIÓN DE POLIGENERACIÓN EN SITIO PARA VIVIENDAS DE INTERÉS SOCIAL *

AUTORES: ANGÉLICA MARÍA VELA REYES
KATHERYN MARÍA DONADO MERCADO**

PALABRAS CLAVES: poligeneración, energías renovables, generación híbrida, viviendas de interés social, optimización.

Con el fin de incentivar la utilización de las fuentes de energía renovables, se establecieron consideraciones para la optimización de sistemas de poligeneración en viviendas de interés social de Bucaramanga, buscando que un proyecto de grado posterior realice la optimización e implementación del sistema; con el objetivo de solventar las necesidades energéticas de la población beneficiada.

Además, se revisaron aspectos técnicos de las viviendas de interés social que influyen en la implementación de las fuentes de generación de energía eléctrica en sitio, tales como características de diseño de la vivienda y acondicionamiento bioclimático, que permiten el ahorro de energía. También se establecieron expresiones matemáticas que permiten el planteamiento del problema de optimización multiobjetivo (maximización de potencia generada a mínimo costo).

Finalmente, se seleccionaron las fuentes de energía renovable que se propone utilizar en el proceso de optimización; atendiendo a las limitaciones y los requerimientos que tiene cada una de ellas. También se escogieron modelos matemáticos para esas fuentes, según criterios establecidos, que permiten describir su comportamiento desde la potencia eléctrica y los otros productos obtenidos. Asimismo, se identificaron las técnicas clásicas y metaheurísticas más empleadas en los problemas de optimización de sistemas de poligeneración, para contribuir con el proceso de solución del problema multiobjetivo planteado.

*Trabajo de investigación de pregrado en ingeniería eléctrica

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: MS.c. Germán Osma Pinto. Codirector: Dr. Gabriel Ordóñez Plata

ABSTRACT

TITLE: CONSIDERATIONS PROBLEM POLYGENERATION
MULTIOBJECTIVE OPTIMIZATION IN INTEREST SITE
SOCIAL INTEREST DWELLING*

KEYWORDS: Polygeneration, renewable energy, hybrid generation, social interest dwelling, optimization.

AUTHORS: ANGÉLICA MARÍA VELA REYES
KATHERYN MARÍA DONADO MERCADO**

In order to encourage the use of renewable energy sources, considerations were contemplated for the optimization of polygeneration systems in social dwelling in the city of Bucaramanga looking expecting that a future graduation project will implement this system, in order to fulfill the energy needs of this population.

Also, technical aspects of social dwelling were established that influence the implementation of the sources of power generation on-site, such as design features of the houses, and bioclimatic conditioning, allowing substantial energy savings also some aspects were established as mathematical expressions so as to be useful for the approach of multi-objective optimization problem (maximization of power output at minimum cost).

Finally, we selected the renewable energy sources to use in the optimization process according to the limitations and requirements that each one of them has, also we selected mathematical models for these sources according to established criteria, which can describe its behavior potential and other products obtained, also identified the most classics and metaheuristics techniques used in optimization problems of polygeneration systems, to contribute to the process of solving the multiobjective problem raised.

*Research work of undergraduate in electrical engineering

** Department of Physical-Mechanical Engineerings.School of Electrical, Electronic and of Telecommunications Engineering. Director: MS.c. Germán Osma Pinto. Codirector: Dr. Gabriel Ordóñez Plata.

INTRODUCCIÓN

Buscando cumplir con los derechos establecidos en la Constitución Política de Colombia, el gobierno nacional creó el plan de desarrollo VIS (viviendas de interés social) que otorga el derecho de vivienda a las personas con menos ingresos económicos [1]. De acuerdo con esta iniciativa del gobierno, el propósito de este proyecto es poner a consideración aspectos asociados a la poligeneración de energía eléctrica renovable a pequeña escala en dichas viviendas para suplir sus necesidades energéticas.

Para esto, se utilizarán las fuentes de generación alternativas más viables de acuerdo a la ubicación y factores climáticos de las VIS; teniendo en cuenta que las fuentes alternativas son recursos renovables que se obtienen de materias no contaminantes (sol, viento, desechos orgánicos, etc.). De acuerdo a esto, las energías alternativas presentan un problema en la producción de energía, ya que dependen de múltiples variables externas que deben ser consideradas.

Para la implementación del sistema de energía renovable en las viviendas de interés social, es importante tener en cuenta que una única fuente por lo general conduce a sobredimensionar el sistema, lo que aumenta los costos de funcionamiento y la vida útil. Debido a este inconveniente, la generación híbrida nace como solución puesto que combina uno o más recursos de energía mejorando así los factores de carga [2], [3].

En las últimas décadas, los avances significativos en el campo de la generación de energía a pequeña escala y su almacenamiento han implicado cambios en la manera en que la generación y distribución de energía eléctrica se ha llevado a cabo, lo que representa un nuevo impulso a la idea de la generación distribuida (DG), la cual es de manera general la generación de energía eléctrica dentro de las redes de distribución o en el lado de la red del cliente [4].

Existen numerosas estrategias para la generación de energía eléctrica a pequeña escala; en este caso, por medio de la poligeneración sería posible abastecer la demanda de energía eléctrica en sitio para las viviendas de interés social; sumando también la posibilidad de obtención de otras energías tales como gas natural y calor. Las tecnologías de poligeneración permiten la disminución del consumo de energía y recursos naturales, reduciendo los costos unitarios de los productos finales y su impacto ambiental [5].

La finalidad de este proyecto es establecer consideraciones que permitan abordar el proceso de optimización para la generación de energía por medio de un sistema híbrido o mediante la poligeneración para una vivienda de interés social en sitio. Esta investigación tiene como fin buscar información previa que permita plantear el problema de optimización de tipo multiobjetivo (maximización de generación de energía eléctrica y minimización del costo) y con base en la información que se establezca, se espera que en un trabajo de investigación posterior realice el planteamiento del problema, pudiéndose definir la función objetivo, las variables y las restricciones (inversión, operación y mantenimiento).

1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE INVESTIGACIÓN

A continuación se presentan los objetivos del trabajo propuesto y sus respectivos alcances.

1.1.1. Objetivo general

Establecer consideraciones técnicas que permitan abordar el problema de optimización de la poligeneración en viviendas de interés social.

1.1.2. Objetivos específicos y alcances

En la Tabla 1 se muestran los objetivos específicos establecidos y sus respectivos alcances en la realización y ejecución del proyecto de grado.

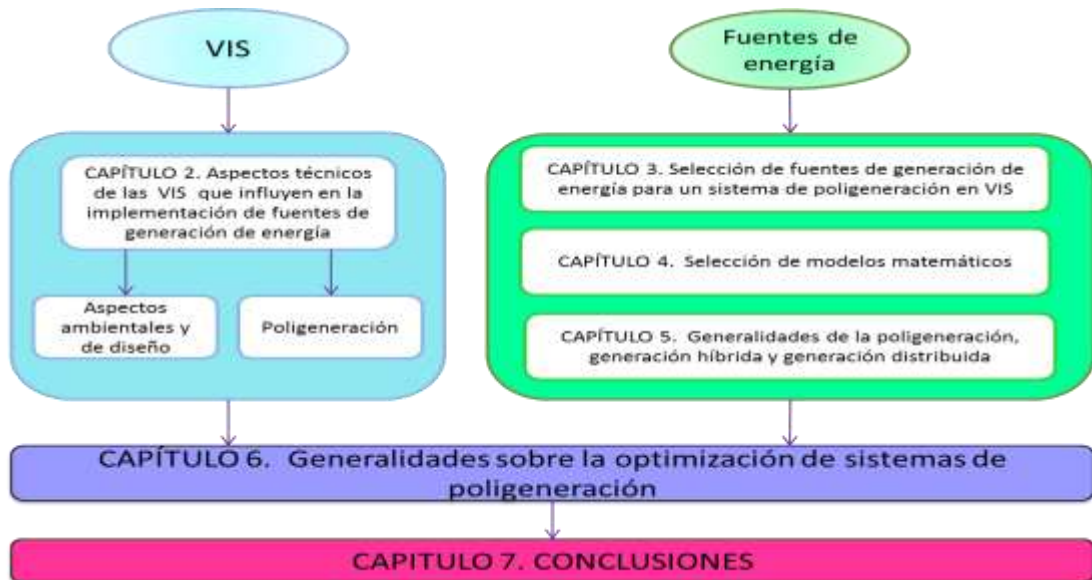
Tabla 1. Objetivos específicos y alcance del proyecto de grado.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS	ALCANCES
Identificar aspectos técnicos de las viviendas de interés social que influyan en la potencial implementación de fuentes de generación de energía eléctrica en sitio	Se realizó un estudio para la implementación de la técnica de poligeneración en las viviendas de interés social, dependiendo de características propias de éstas como la temperatura ambiente, velocidad del viento, altura sobre el nivel del mar, radiación solar, aspectos de construcción y arquitectura de las viviendas, áreas expuestas, etc. Se plantearon las consideraciones necesarias para el correcto modelamiento multiobjetivo del sistema de poligeneración que va a ser implementado.
Seleccionar las fuentes de generación de energía eléctrica en sitio a considerarse en un sistema de poligeneración para viviendas de interés social	Se seleccionaron los tipos de generación de energía eléctrica en sitio que presentan características de aplicabilidad en sistemas de poligeneración (eólica, <i>pedal power</i> , biomasa y solar fotovoltaica y térmica).
Seleccionar modelos matemáticos de los sistemas de generación considerados según revisión de publicaciones científicas (bases de datos IEEE y ELSEVIER)	Se eligió un modelamiento matemático que describe el comportamiento de los sistemas de generación considerados para viviendas de interés social en sitio, según información previamente recopilada de las bases de datos IEEE y ELSEVIER.
Realizar un estado del arte sobre la poligeneración a pequeña escala, con base en la revisión de publicaciones científicas en las bases de datos IEEE y ELSEVIER	Se estableció un estado del arte en lo referente a la poligeneración a pequeña escala, que puede ser de utilidad para la creación del modelo de optimización. Para ello, se consultaron las bases de datos de la IEEE y ELSEVIER, se identificaron las técnicas clásicas y metaheurísticas empleadas en problemas de optimización de sistemas de poligeneración.
Identificar técnicas determinísticas y metaheurísticas empleadas en problemas de optimización de sistemas de poligeneración, con base en la revisión de publicaciones científicas en las bases de datos IEEE y ELSEVIER	

1.2. ESTRUCTURA GENERAL DEL TRABAJO DE GRADO

La Figura 1 describe la estructura de este trabajo de investigación, donde se aprecia de forma clara el proceso para obtener las consideraciones del problema multiobjetivo de optimización de poligeneración de viviendas de interés social.

Figura 1. Descripción del contenido proyecto de grado.



Fuente: Autoras

1.3. CONSTRUCCIÓN SOSTENIBLE

El consumo de energía propiamente dicho no contamina de forma significativa; es sobre todo la manera de obtener dicha energía la que produce serios problemas medioambientales. Con el fin de solucionarlo surge la construcción sostenible, un concepto basado en la adecuada gestión

y reutilización de los recursos naturales y la conservación de la energía que abarca la apropiada selección de materiales y procesos constructivos, el entorno urbano y el desarrollo del mismo. La construcción sostenible es un concepto global que identifica un proceso completo en el que influyen numerosos parámetros que apoyados unos sobre otros, tienen como consecuencia productos urbanos eficientes y respetuosos con el medio ambiente [6].

Apostarle a la construcción sostenible puede traducirse en un ahorro del 40% de agua y entre 30% y 50% de energía eléctrica, además de una reducción del 35% de las emisiones de CO₂ y del 70% de los desechos. Combinar materiales ecológicos y un buen biodiseño permite crear ambientes iguales o más cómodos que los convencionales, de la misma calidad, y con un saldo positivo para el planeta y nuestra salud. Los “edificios verdes”, aquellos que se construyen siguiendo pautas y criterios que están en armonía con la naturaleza y la salud humana, son la solución a la vista [7].

2. ASPECTOS TÉCNICOS DE LAS VIS QUE INFLUYEN EN LA IMPLEMENTACIÓN DE FUENTES DE GENERACIÓN DE ENERGÍA

Los proyectos de vivienda de interés social (VIS) deben comprometerse con el uso sostenible de los recursos naturales. Por esta razón se deben adoptar prácticas que permitan reducir el consumo de energía y agua, garantizando el uso eficiente de energía; situaciones que contribuyen a la sostenibilidad de los recursos naturales y disminución de los costos de las familias, con espacios naturalmente ventilados e iluminados, evitando el uso de sistemas mecánicos de calefacción o ventilación.

En este capítulo se presentan los aspectos técnicos que influyen en la implementación de diferentes fuentes de energías renovables en viviendas de interés social con aplicación en la ciudad de Bucaramanga. Se han estimado las consideraciones necesarias para la ejecución de un sistema de poligeneración y generación híbrida por medio de energías renovables que abastecerán gran parte o la totalidad de la demanda de energía eléctrica.

2.1. NORMATIVIDAD

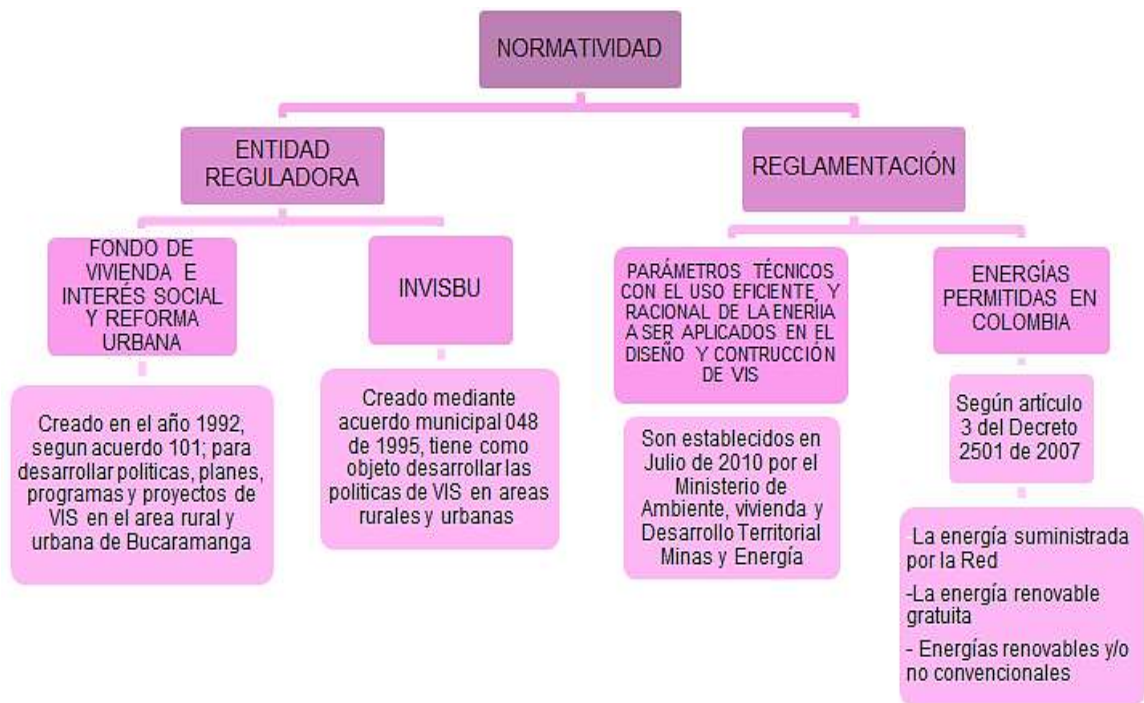
Para la implementación de energías renovables en las viviendas de interés social es necesario tener en cuenta la normatividad establecida por los entes gubernamentales, puesto que son los puntos de referencia para la adopción de buenas prácticas.

El reglamento técnico de eficiencia energética para viviendas de interés social RETEVIS elaborado por el Ministerios de Minas y Energía, y Ambiente

y Desarrollo Territorial [8], parte del siguiente concepto: Una vivienda es energéticamente eficiente si en su ciclo de vida hace uso racional y eficiente de la energía y garantiza condiciones de confort para el usuario. Con base en los reglamentos RETIE y RETILAP se dispone de requisitos básicos en materia de pérdidas de energía en las instalaciones eléctricas, así como sistemas eficientes de iluminación [1], [9].

En la Figura 2 se observa la normatividad que rige las VIS, en la ciudad de Bucaramanga, Santander.

Figura 2. Normatividad viviendas de interés social.



Fuente: (Concejo de Bucaramanga 2012).

2.2. ASPECTOS CONSIDERADOS EN LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES PARA LAS VIVIENDAS DE INTERÉS SOCIAL

Se pretende que las VIS tengan un comportamiento pasivo, por tanto conviene aplicar un enfoque de diseño bioclimático, que compare el confort de la comunidad con el microclima del lugar para plantear estrategias de adaptación que protejan la vivienda de los impactos ambientales desfavorables y aprovechen los factores climáticos favorables [11].

Es necesario tener en cuenta que el proyecto es realizado tanto para viviendas de interés social en construcción como para viviendas de interés social ya construidas. Hay gran diferencia en algunos aspectos considerados para las viviendas ya construidas debido a que no se tiene disponibilidad de área, diseño y ubicación geográfica, lo cual interviene en el análisis y la utilización de ciertos criterios. A continuación se describen cada uno de estos aspectos en la Tabla 2.

Es importante conocer que el potencial de los sistemas de poligeneración, en términos de rentabilidad, ahorro de energía y reducción de emisiones contaminantes, depende en gran medida de varios factores tales como la eficiencia, la normativa local, las condiciones arancelarias y tecnologías de referencia adoptadas para comparar los resultados [12].

Tabla 2. Aspectos técnicos de las VIS para la implementación de fuentes de energíaA.

ASPECTO	DESCRIPCIÓN	IMPORTANCIA	EXPRESIÓN
DEMANDA DE LA VIVIENDA	Varía dependiendo de factores como el clima, la función a la que se destina, el diseño de la estructura y la calidad de los materiales empleados para la construcción y el uso (comportamiento de los ocupantes). Éstos hacen que la demanda energética varíe considerablemente, tanto en la cantidad de energía como en la distribución horaria a lo largo del día. Se debe resaltar que el nivel de ingresos de una vivienda influye de manera potencial en la demanda energética consumida.	Representa la cantidad de energía que necesita ser generada al considerar los componentes del sistema para demostrar la disponibilidad eléctrica y el potencial del uso de este para los diversos tipos de cargas. Existe una implicación directa en los espacios requeridos para la ubicación de los elementos de cada sistema que varían de tamaño de acuerdo a la cantidad de potencia que deben generar. Los criterios de dimensionamiento en cuanto a la demanda de energía, es la probabilidad de que una fuente de alimentación insuficiente se produzca cuando el sistema híbrido sea incapaz de satisfacer la demanda de carga [13], [14].	$D \propto f(c, d, mc, c, i)$ <p>Donde, D es la demanda de la vivienda, c clima, d diseño, mc material de construcción, c consumo, i ingresos de los ocupantes.</p>
EFEECTO DE SOMBREADO	Cuando se cuenta con construcciones cercanas de diferente altura es necesario estudiar el factor de la sombra que estas arrojan. Además, se debe prestar especial atención considerando el caso más desfavorable de sombra del año (solsticio de invierno, 21 de diciembre). En un sistema solar se debe tener en cuenta que a mayor altura, menor sombreadamiento. Además, el difícil acceso a su instalación y mantenimiento.	El efecto de sombreado influye en la generación de energía de las fuentes renovables que son obtenidas mediante la radiación solar; en la cual debe ser considerado para lograr previsiones de rendimiento más precisas. Los módulos fotovoltaicos y colectores solares pueden ser fácilmente afectados por sombras parciales proyectadas sobre todo al amanecer y atardecer, disminuyendo su eficiencia energética (hasta en un 75%) por tener diferencias de radiación y condiciones de temperatura. Por otra parte, la generación de energía biomasa depende de la radiación solar en el proceso de la fotosíntesis [15], [16], [17].	$h_x \propto \frac{1}{s}$ $s \propto f$ <p>Donde, h_x es la altura de la vivienda, f época del año y s es el sombreadamiento debido a la diferencia de alturas</p>
CONDICIONES DEL TEJADO	La vivienda debe contar con un tejado suficientemente resistente, para soportar la turbina eólica y la configuración de paneles fotovoltaicos. Además, de las disposiciones de ordenamiento territorial de la zona de manera tal que éstas permitan la instalación de turbinas eólicas.	El tejado es donde se realiza la instalación de varios elementos de las fuentes renovables, como los paneles y colectores solares, las turbinas eólicas, etc. Un material inadecuado del tejado con alta capacidad de conducción de calor podría producir calentamiento en el panel que reduciría su eficiencia. Además, hay que tener en cuenta la inclinación que debe tener el tejado de acuerdo a la longitud y latitud de la vivienda, ya que la incidencia de los rayos solares varía de acuerdo a esta posición [18].	$R_t \gg \sum_{i=1}^n W_{si}$ <p>Donde, R_t es la resistencia del tejado, W_{si} es el peso de los componentes del sistema, i=paneles pv, colector solar, turbina y otros componentes; esto de acuerdo a la configuración a implementar.</p>

CONDICIONES CLIMÁTICAS	En contraste con las fuentes convencionales de energía, las energías renovables no son capaces de suministrar energía constante para satisfacer la demanda de energía debido a su naturaleza estocástica. Algunas fuentes son de carácter imprevisible y tienen dependencia con las condiciones meteorológicas y climáticas que varían en abundancia con la temporada o dependen de la localización del sistema a implementar.	Es posible analizar la incidencia del clima en el terreno por la dirección y velocidad de los vientos y la orientación de los rayos solares de acuerdo a la época del año, lo cual influye en la localización de la vivienda. El relieve de los valles y las montañas afectan el microclima de una zona. Durante el día los vientos serán del valle a la montaña; durante la noche a la inversa, provocando cambios fuertes en la temperatura día-noche. En Colombia los vientos alisios del noreste influyen durante el primer semestre del año en las zonas norte y oriente del país, mientras que los del sureste en el segundo semestre en las zonas sur y centro del país [19], [20].	$CG = f(t_1, t_2, ub)$ <p>Donde, t_1 es la época del año (cambia la dirección y velocidad de los vientos al igual que la orientación de los rayos solares), t_2 la hora del día (durante el día hay cambios fuertes de temperatura al igual que en la velocidad y magnitud del viento) y ub la ubicación de la vivienda.</p>
ALTURA DE LA VIVIENDA	A mayor altura las temperaturas disminuyen, ésta es una variable determinante del diseño arquitectónico.	La altura de la vivienda afecta la potencia generada por el sistema de acuerdo al tipo de fuente de energía a utilizar. Un sistema eólico ubicado a mayor altura tendrá mayor velocidad del viento, lo que supone mayor producción de energía, y en un sistema solar pv o térmico a mayor altura la radiación solar tiene menor interrupción de incidencia [18], [21].	$T \propto 1/h$ <p>Donde, T es la temperatura y h es la altura sobre el nivel del mar donde está la vivienda</p>
ÁREA OCUPADA POR LOS EQUIPOS	La disponibilidad de área supone gran importancia debido a que implica la implementación de cada uno de los elementos del sistema en una correcta ubicación para obtener un buen funcionamiento.	La implementación de fuentes de energía renovable a pequeña escala implica la instalación de algunos de sus componentes en las viviendas. En el sistema <i>pedal power</i> se debe contar con un espacio suficiente y adecuado para la bicicleta y los componentes de generación. Por otra parte los sistemas solares y eólicos, puesto que también necesitan un espacio en el tejado sin interrupción, con respecto al sistema de generación biomasa, es apreciable la existencia de un espacio apto para el biodigestor y el elemento de transformación de la energía .	$A_{disponible\ para\ el\ sistema} > \sum_1^i A_i$ <p>Donde $A_{disponible\ para\ el\ sistema}$ es el área que dispone la vivienda para la implementación de los elementos y A_i representa el área que ocupa cada uno de ellos.</p>

Fuente: (Ministerio de Ambiente Vivienda y desarrollo territorial 2011), (Torres & Valkealahti 2013), (Kontoleon 2012).

Dado que las viviendas de interés social son otorgadas a las familias con bajos recursos económicos y debido a los beneficios que un sistema de poligeneración genera en estos hogares, es de considerarse que el gobierno supla los gastos de implementación sin recargo alguno, ya que contribuye con los aspectos tanto financieros como medioambientales.

Un diseño adecuado de la vivienda garantiza el uso eficiente de energía, aportando a la solución de optimización del problema multiobjetivo (maximización de la potencia a un mínimo costo) [1]. Las viviendas de interés social pueden instituir una serie de condiciones de diseño que ayudan a la reducción del consumo energético. Estas condiciones son las citadas a continuación:

- Analizar la viabilidad de la implementación del sistema de poligeneración en la VIS. Para esto se deben tener en cuenta factores como el tipo de servicio que se desea obtener a partir de este sistema; además de contar con fácil acceso, tanto para la instalación como el mantenimiento del sistema de poligeneración en la vivienda.
- La utilización de un sistema implementado con energías renovables por medio de la poligeneración, hace necesario tener en cuenta los requerimientos de recursos que solicita cada una de las diferentes formas de generación para su correcto funcionamiento en el lugar de instalación específico, para obtener la mejor combinación de ellas.
- La guadua ofrece una solución ideal para la construcción sostenible; esta tiene la capacidad de absorber CO₂. En cuanto a sus propiedades arquitectónicas, a la guadua se le conoce como el “acero vegetal” por su gran resistencia, ser liviana, flexible, con características sismo resistentes, y un costo mucho menor que los materiales tradicionales.

- La implementación de la tecnología de techos verdes, produce oxígeno, reduce el nivel de ruido, regula el clima local y la temperatura en el interior de la vivienda.
- Se recomienda que las paredes del interior de las viviendas tengan colores claros, con el fin de aprovechar la luz solar evitando la utilización de la energía.
- La transferencia de calor a través de superficies transparentes es claramente diferente a la transferencia de calor a través de superficies opacas. Debido a su transparencia, las fachadas acristaladas transmiten la radiación solar directamente en el edificio.
- La vegetación tipo enredadera contribuye a mejorar el comportamiento energético de la edificación y refrescar el aire por el vapor emitido por evo-transpiración de las hojas; además sirve también como filtro al exceso de claridad natural, generando luz difusa que atenúa los efectos de reverberación o encandilamiento gracias a la presencia de sombra.
- A la hora de ampliar la construcción, hay que hacerlo siempre a lo largo, siguiendo eje este - oeste; con un ángulo de inclinación particular dependiendo de las condiciones atmosféricas del lugar. Es aconsejable también utilizar barreras de aislamiento para equilibrar la temperatura en caso de excesivo calor en verano o mucho frío en invierno [1].
- Dado el caso en el que la implementación de las energías renovables se realice para un grupo de viviendas, la ejecución de estas necesita un espacio adecuado, limpio, accesible y cerca de la carga de manera que

no se presenten pérdidas en la transmisión de la energía generada; además de una persona a su cuidado. La planificación de este tipo de sistemas es un problema importante que consiste en justificar los patrones de asignación de los recursos energéticos y servicios, la formulación de políticas locales sobre el consumo de energía, el desarrollo económico y la estructura de la energía, y el análisis de las interacciones entre los costos económicos, la fiabilidad del sistema y la energía [24], [25].

3. SELECCIÓN DE FUENTES DE GENERACIÓN DE ENERGÍA PARA UN SISTEMA DE POLIGENERACIÓN EN VIS

Implementar fuentes de energía renovable brinda beneficios a la sociedad, de los cuales la disminución de las emisiones de contaminantes a la atmósfera que representa el más importante. En este aspecto (considerando una mejora ambiental y dependiendo de la rentabilidad de las fuentes en el sitio específico de su instalación) dichas fuentes pueden ser incorporadas al sistema; que desafortunadamente en la actualidad no son implementadas debido al alto costo de inversión de los equipos (principalmente las nuevas tecnologías).

Hay gran variedad de fuentes renovables posibles de implementar en una VIS, pero no todas son viables, ya que la factibilidad de éstas depende de las condiciones meteorológicas del lugar, aspectos de construcción de la vivienda y costos de inversión. Debido a esto, es necesario seleccionar las más viables adquiriendo criterios propios de este caso particular. De acuerdo a las fuentes de energías seleccionadas se mostrará información concreta para la futura implementación del sistema de poligeneración en VIS.

3.1. FUENTES DE ENERGÍAS RENOVABLES PARA LA POLIGENERACIÓN EN UNA VIS

La toma de decisiones juega un papel importante en el diseño de sistemas de energía que combina aspectos técnicos, financieros, sociales y ambientales. A continuación se muestra la selección de las fuentes alternativas a ser implementadas en las VIS para la optimización de un sistema de poligeneración. El proceso consta de dos decisiones, la primera

representa la viabilidad de las fuentes de acuerdo a las limitaciones del medio y la segunda a su aplicación al sistema de poligeneración.

3.1.1. Preselección de las fuentes viables

La Tabla 3 menciona algunos aspectos de gran importancia de las energías renovables a estudiar para una posterior selección. En esta se establece la posible viabilidad de funcionamiento en una vivienda de interés social. Los aspectos seleccionados son descritos a continuación:

- Descripción: Define la forma de conversión de cada una de las fuentes alternativas de modo general [26].
- Requerimientos: Describe los elementos necesarios para la viabilidad de la generación de la energía en sitio ya que cada una de las fuentes requiere diferentes recursos para su implementación.
- Limitaciones: Expresa los factores que pueden llegar a causar el mal funcionamiento del sistema o la nula generación de energía.
- Costo de implementación: Categoriza los costos de producción de energía eléctrica y demás productos, esta se representa numéricamente (1-8) del mínimo al máximo costo respectivamente. Esta categorización es tomada de las referencias [27], [28], las cuales son de México y España respectivamente y se contrastaron los valores de cada una de estas para verificar que a pesar de que son países con condiciones diferentes tuviesen la misma relación de costo, teniendo en cuenta que es una clasificación a gran escala.
- Criterio: Enuncia la selección de las fuentes de generación alternativas viables para implementarse en las VIS.

Tabla 3. Posibles fuentes de energía renovable para una vivienda de interés social.

FUENTE	DESCRIPCIÓN	REQUERIMIENTOS	LIMITACIONES	COSTO DE IMPLEMENTACIÓN	CRITERIO
GEOTÉRMICA	Aprovecha la energía calorífica que existe en el interior de la tierra, para obtener energía eléctrica	Temperatura del interior de la tierra	Capacidad de campo incierto	7	No
BIOMASA	Convierte la energía química que se obtiene de productos y residuos animales y vegetales obtenida por fotosíntesis, en energía eléctrica y calorífica	Desechos orgánicos	Eficiencia, disponibilidad materia prima	6	Si
EÓLICA	Convierte la energía del viento en energía eléctrica	Viento	La presencia de árboles y edificaciones, disminuyen el potencial del viento.	5	Si
FOTOVOLTAICA	Convierte la energía de la radiación solar en energía eléctrica	Radiación solar	La ausencia de radiación solar, en días nublados disminuye su generación, así como los objetos que generan sombra a los paneles	1	Si
TÉRMICA	Captación de energía de radiación solar en formación de calor	Radiación solar	La ausencia de radiación solar, impide su potencial funcionamiento.	3	Si
MINI-HIDRÁULICA	Aprovecha la energía potencial del agua y la transforma en energía eléctrica	Agua	Potencial de recurso hidráulico	4	No
MAREMOTRIZ	Convierte la energía potencial que contienen las mareas, en energía eléctrica	Agua	Disponibilidad de las mareas cerca de las viviendas.	2	No
PEDAL POWER	Convierte la energía producida por el ser humano en la utilización de la bicicleta de spinning en energía eléctrica	Fuerza humana	La no realización de actividad física, hace nula la generación de energía.	8	Si

Fuente: (Bazmi & Zahedi 2011).

El resultado de la preselección de las fuentes renovables de energía para implementar en las VIS según los criterios establecidos en la Tabla 3, arroja como posibles las siguientes fuentes de generación: Energía eólica, energía solar fotovoltaica, energía solar térmica, *pedal power* y biomasa. Sin embargo, las fuentes de energía mareomotriz, mini-hidráulica y geotérmica no se consideraron viables para la optimización en un sistema de

poligeneración, debido a factores como la disponibilidad de recurso en la ubicación de las viviendas y las limitaciones mostradas en la Tabla 3.

3.1.2. Selección de las fuentes para el sistema de poligeneración a implementar en las VIS

Una vez estudiadas las fuentes de energías renovables posibles para las VIS, es necesario realizar un análisis para seleccionar las fuentes de energías más prometedoras para implementar un sistema de poligeneración en sitio, con el objetivo de contribuir a la optimización. Para la selección de las energías a ser implementadas, en la Tabla 4 se muestran criterios que permiten resumir de manera práctica las características importantes de cada una de ellas. La selección de cada criterio y su importancia se describen a continuación:

- Disponibilidad horaria de generación: Establece la disponibilidad de la fuente de generación respecto a un día, se seleccionó debido a que todas las fuentes son regidas por diferentes materias primas, lo que establece horarios dispares en el funcionamiento de cada una de ellas.
- Capacidad de generación: Describe la cantidad de energía generada por cada una de las fuentes, teniendo en cuenta los factores que influyen en la eficiencia de cada una de éstas.
- Espacio e implementación: La utilización de las diferentes fuentes de energía requiere de un área determinada para la ubicación de los elementos responsables de la generación y su respectivo proceso de instalación.

- Madurez de la tecnología: Define que tan avanzada se encuentra la fuente de generación respecto a su evolución. Una fuente poco avanzada simboliza cambios y mejoras continuas con implicación monetaria.
- Mantenimiento: Supone un costo adicional a cada energía además de la colaboración por parte de los usuarios de la vivienda para realizarlo.
- Tipos posibles de generación: Muestra las energías y recursos posibles de obtener de cada fuente alternativa para el proceso de poligeneración.

Tabla 4. Fuentes de energía seleccionadas para un sistema de poligeneración.

ASPECTOS VS TECNOLOGÍA	BIOMASA	PEDAL POWER	EÓLICA	PV	TÉRMICA
DISPONIBILIDAD HORARIA DE GENERACIÓN	Disponibilidad de materia prima	Disponibilidad de personal	Aleatorio, horas de buen viento	horas solares (6:00 am-6:00 pm)	horas solares (6:00 am-6:00 pm)
CAPACIDAD DE GENERACIÓN	Media	Media	Alta	Alta	Alta
ESPACIO DE IMPLEMENTACIÓN	Lugar para el biodigestor	Lugar para la ubicación de las bicicletas y la adaptación de sus partes	Disponibilidad para ubicar la turbina a una altura dada	Capacidad del techo para soportar paneles como la orientación adecuada de los mismos	Espacio para la ubicación de los colectores solares
MADUREZ DE LA TECNOLOGÍA	Baja	Media	Alta	Alta	Media
MANTENIMIENTO	Mantenimiento del biodigestor y demás componentes del sistema	Mantenimiento rutinario de una bicicleta estática y revisión esporádica de los elementos de generación	Chequeo anual de la turbina y los demás elementos de generación	Limpieza sencilla periódica al panel para evitar la acumulación de polvo	Limpieza sencilla periódica al panel para evitar la acumulación de polvo
TIPOS POSIBLES DE GENERACIÓN	Energía eléctrica, calor, biogás, hidrógeno.	Energía eléctrica	Energía eléctrica	Energía eléctrica	Energía eléctrica, calor y/o frío.

Dentro de las fuentes viables para el sistema de generación a pequeña escala en las VIS, se consideraron las que tienen más posibilidad para un

sistema de poligeneración teniendo en cuenta que el sistema será posteriormente optimizado. Las fuentes seleccionadas son: Eólica, solar térmica, solar fotovoltaica, *pedal power* y biomasa (que representan la totalidad de las fuentes expuestas en la Tabla 4).

En cuanto a las energías seleccionadas, eólica y solar fotovoltaica se consideran las de mayor capacidad de generación de energía eléctrica dentro del sistema (a pesar de su alto costo de implementación), además de contar con las ventajas de no requerir intervención humana para su generación (solo mantenimiento) y ser energías con gran utilización a nivel mundial a pequeña escala (lo que representa mayor experiencia del sistema). La generación térmica tiene la ventaja de reemplazar la calefacción y el aire acondicionado.

Debido a los factores de disponibilidad de la energía generada por las fuentes de energía eólica y solar fotovoltaica (limitaciones mostradas en la Tabla 3), se hace necesario la inclusión al sistema de las energías *pedal power* y biomasa, las cuales sirven como sistema de respaldo y almacenamiento de energía. Además de contar con ventajas como que la biomasa por medio del biogás también permite la generación de calor para calefacción y cocción de alimentos, y que *pedal power* no cuenta con limitaciones medio ambientales.

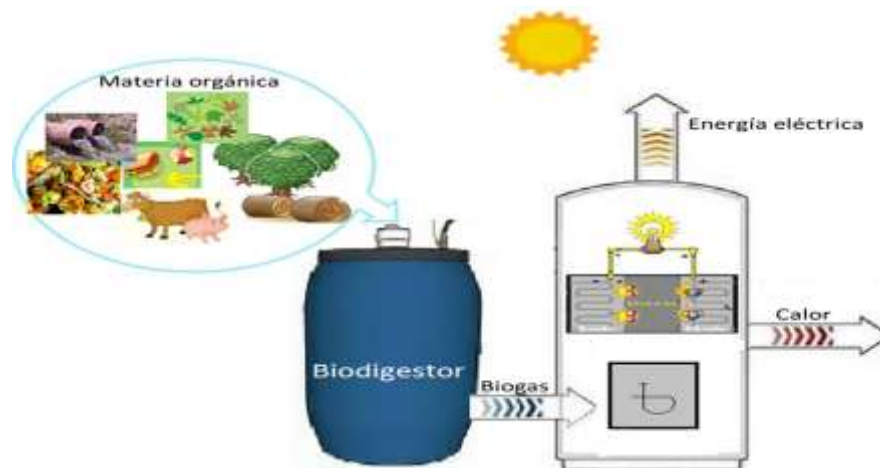
3.2. BIOMASA

La energía a partir de biomasa es una de las opciones más eficientes y eficaces entre las fuentes de energía alternativas disponibles en la actualidad. La digestión anaerobia de la biomasa requiere menos capital de inversión y costo de producción por unidad en comparación con otras fuentes

de energía renovables, además de estar disponible como un recurso interno en las áreas rurales que no está sujeto a fluctuaciones de los precios mundiales o las incertidumbres de suministro a partir de combustibles importados y convencionales [30].

La biomasa se describe como una fuente de energía renovable que comprende la captura de la energía solar y carbono que se convierte en bioenergía o se utiliza directamente como una fuente de calor y energía eléctrica. Esta, comprende toda la materia viva presente en la tierra (residuos animales, plantas de tratamiento de aguas residuales o aguas residuales industriales, vertederos, etc.). Su recurso son las materias orgánicas en las que la energía solar se almacena en los enlaces químicos [30]. En la Figura 3 se observa el esquema básico de generación de energía eléctrica y calor por biomasa.

Figura 3. Esquema básico de la generación de energía eléctrica y calor por biomasa.



Fuente: (<http://www.fisica.uh.cu/bibvirtual/vidaytierra/Detritus-biogas/Detritus-biogas-electricidad.htm> 2013).

3.2.1. Principios de la digestión anaerobia

La digestión anaerobia es una degradación bioquímica microbiana, que transforma un complejo de material orgánico a compuestos orgánicos simples y nutrientes disueltos. Inicialmente, la descomposición aeróbica tiene lugar donde se consume oxígeno formando dióxido de carbono, agua y calor. Tras el agotamiento del oxígeno, la descomposición anaeróbica se caracteriza por una producción constante de biogás; este proceso es realizado por medio de un equipo/dispositivo llamado biodigestor [30], [32], [33], [34].

3.2.2. Biogás obtenido

El biogás se genera a través de la digestión anaeróbica de la biomasa. El interés en su utilización como combustible se deriva en gran parte de su alto contenido de metano, estado renovable, costo relativamente bajo como materia prima y el aumento de potencial de recursos (debido al crecimiento de la población). Una forma de evaluar el potencial de recursos de biogás es examinar las emisiones de metano procedentes de las diversas fuentes de residuos [32], [33], [35].

El uso de biogás es muy versátil ya que [32]:

- i) Su energía química se puede convertir en energía mecánica por los procesos de combustión controlados en motores estacionarios, que a su vez ponen en movimiento los generadores para promover una conversión directa en energía eléctrica.
- ii) Puede ser utilizado para cogeneración de energía térmica, la generación de agua caliente y vapor con altas temperaturas por medio de un motor.

- iii) Se puede quemar para generar energía térmica en las calderas.
- iv) Se puede aplicar como combustible para motores de automoción y estacionarios.

3.2.3. Aplicaciones del biogás

Aunque hay varios tipos de aplicaciones, las nuevas alternativas de biogás necesitan ser explotados de manera estratégica para consolidar su potencial de generación de energía. Una posibilidad prometedora es la obtención de H_2 a partir del biogás para su uso en pilas de combustible de carga. El H_2 tiene la capacidad de alta energía, con la mayor cantidad de energía por unidad de masa que cualquier otra sustancia conocida (121.000 kJ / kg) [32].

- **Células de combustible**

El mejor uso de la energía del H_2 obtenido a partir del biogás tiene lugar en las células de combustible. Estas células transforman la energía química de las moléculas de energía del H_2 en energía eléctrica a través de reacciones electroquímicas que mantienen combustible y el oxidante separado; sin combustión y con las emisiones contaminantes más bajos que los equipos/técnicas convencionales. Tienen eficiencias eléctricas altas (mayor que 50% en algunos casos de ciclo simple y mayor que 70% en algunos ciclos híbridos) [32], [36].

- **Microturbinas accionadas con biogás**

El metano tiene un impacto de gases de efecto invernadero en la atmósfera que es 21 veces mayor que la del dióxido de carbono; así que la mejor solución ambiental es el uso de estos gases residuales para generar energía renovable, lo cual por medio de microturbinas se puede lograr de

forma limpia y económica, ya que pueden quemar limpiamente gases residuales para generar energía renovable y calor [37]. Estas tienen una potencia de 30 kW-200 kW y pueden ser fácilmente combinadas para satisfacer los requisitos de carga específicos [38].

- **Motores Stirling**

Son motores de combustión externa específicos distintos de los combustibles que requieren muy poco mantenimiento. Para las unidades de hasta 100 kW, con eficiencias eléctricas y térmicas son 24% y 72% respectivamente, lo que hace la utilización del calor atractivo [38].

- **Cocción de alimentos**

El biogás se utiliza a menudo para la cocina, lo cual ayuda a propiciar una excelente limpieza sin riesgo para la salud y una mejor calidad de vida. Para esto, se requieren estufas especialmente diseñadas de las que se han alcanzado eficiencias alrededor del 20% al 60% (cifras que se ven fuertemente afectadas por las condiciones de operación y diseño de la estufa). En las zonas rurales de los países en desarrollo se ha considerado la quema de biogás con una llama azul y estufas limpias como la mejor manera de explotarlo [39–41].

3.3. *PEDAL POWER*

La energía humana en general se ha utilizado a través de los brazos, espalda y manos. Con la invención de la bicicleta, las piernas se consideraron como un medio de desarrollo de la potencia de los músculos humanos. Una persona puede generar más energía (alrededor de cuatro

veces) por pedaleo que por manivela con mucho menos esfuerzo y fatiga [42].

Por otra parte, los avances tecnológicos han hecho la vida del hombre menos desgastante físicamente, por lo que para mantener un cuerpo sano se han buscado nuevas formas como el ejercicio, por medio de aparatos que pueden ser considerados como fuente de generación de energía eléctrica. Este modo de generación y auto-alimentación ha sido diseñado mediante la integración de la energía verde con el funcionamiento de la bicicleta estática. Se basa principalmente el aprovechamiento de la energía de la potencia ejercida al pedalear una bicicleta, debido a la conversión de la energía mecánica en energía eléctrica [43–45].

Los usuarios pueden poner a prueba sus límites físicos y observar su velocidad de pedaleo, el tiempo y la frecuencia cardíaca en cualquier momento. Además del ejercicio, este sistema puede ser utilizado para mejorar la función cardiopulmonar con eficacia, y fortalecer los músculos de la pierna, disminuir grasa corporal y mejorar la constitución física [44].

3.3.1. Definición y generalidades

El potencial humano se define como la energía eléctrica generada a partir de los músculos humanos y se debe estudiar como un sistema de respaldo para los sitios en la red, como fuente de alimentación inicial en las zonas rurales, o para actuar como un sistema de respaldo de emergencia para cargas críticas; sin embargo, no pretende ser la única fuente de alimentación en lugares de alto consumo de energía eléctrica [46].

Como beneficios, el acondicionamiento físico a partir de bicicletas estáticas permite un mejoramiento en el metabolismo, en el sistema cardiovascular y respiratorio, una quema significativa de calorías, aumento en la tonicidad y masa muscular de la cadera, glúteos, abdomen y pantorrillas [47].

3.3.2. Principio de funcionamiento y mecánica del sistema de generación

El funcionamiento mecánico de la bicicleta requiere un impulso a un par de pedales con las piernas. Este esfuerzo puede regularse a partir de un sistema de fricción manual, como puede observarse en la Figura 4 (regulador de resistencia). Para evitar la condición de pedaleo en vacío estas bicicletas tienen un freno. Poseen una rueda de inercia, para facilitar el pedaleo suave y que para efectos del sistema a diseñarse, es la parte de contacto a partir de la cual se transmitirá energía de la bicicleta al generador eléctrico [47].

La estructura principal del sistema está constituido por sistemas de señal mecánica, y eléctrica. El sistema mecánico contiene un sistema de cambio de engranajes seleccionados en un grado que permitan pedalear libremente. El sistema de alimentación contiene un dínamo con el uso de las funciones de control que puede acumular la energía en la batería para varias cargas. El principio de la generación de energía es que la unidad de pedaleo se une mediante una cadena al sistema de engranajes para ejecutar el dínamo [44].

Para determinar el comportamiento de la variable potencia eléctrica generada en función de la velocidad desarrollada por el tripulante, se deben

conocer: La curva de potencia, la velocidad característica del generador y la relación entre las velocidades del eje del generador y del volante. La curva de potencia-velocidad se obtiene a partir de la ficha técnica del generador; mientras que, la relación entre las velocidades exige el conocimiento de los diámetros de las partes involucradas; asimismo el comportamiento de la velocidad de pedaleo del tripulante [47].

Figura 4. Esquema básico de generación de energía eléctrica a partir de una bicicleta estática.



Adaptada de la fuente: (Gibson 2011).

3.3.3. El potencial humano en la generación de energía eléctrica

Los niveles de potencia que un ser humano puede producir a través de pedalear depende de lo fuerte que sea y de cuánto tiempo puede realizarlo. Cuando la alimentación es continua durante horas, 75 W de potencia mecánica es generalmente considerado como el límite más grande de un deportista sano. Una persona más pequeña y peor alimentada, pero no enferma, produce menos, la estimación de esa persona probablemente debería ser de 50 W para el mismo tipo de producción de energía durante un período prolongado [42].

Al mirar la investigación kinesiológica en términos de potencial humano, hay tres factores importantes a tener en cuenta: a) La potencia máxima sostenible de los músculos humanos, b) El número de calorías que quema una persona en una determinada actividad, y c) La forma en la eficiencia de la actividad, la cual se ve afectada por la adición del dispositivo [46].

3.4. ENERGÍA EÓLICA

Entre los diversos recursos renovables, la energía eólica por ser una energía limpia, abundante, libre, sostenible y respetuosa con el medio ambiente experimenta mayor tendencia de crecimiento; ha sido ampliamente recibida y utilizada por la sociedad, la industria y la política con aproximadamente el 2% de la generación mundial de energía eléctrica. Contribuyendo con los beneficios de un futuro mejor, especialmente con problemas ambientales asociados con fuentes de energía convencionales [49].

Una de las desventajas más grandes de la energía eólica es que el comportamiento físico del viento muestra una gran variabilidad temporal y espacial. En meteorología, el viento es aire en movimiento, cuya fuerza motriz es el calentamiento y enfriamiento desigual de la superficie de la tierra y como resultado, la predicción del viento es muy difícil debido al cambio al azar tanto en la dirección como en magnitud de la velocidad [49].

3.4.1. Generalidades de la energía eólica

Debido a que el viento es causado por la diferencia de presión del aire, temperaturas y densidades producidas a partir de los efectos de

calentamiento de sol en diferentes zonas de la tierra, la energía eólica puede ser considerada como una forma de energía solar empleada para la generación de energía eléctrica. Hay varios métodos de medición para evaluar el rendimiento de la energía eólica tales como el factor de capacidad, disponibilidad, tiempo de conexión, tiempo de vida, fiabilidad y producción específica [50].

La selección del sitio conveniente es importante y necesario, ya que en la superficie de la tierra hay muchos obstáculos (rocas, construcciones, arboles) que interrumpen el viento y lo hacen más suave, disminuyendo la eficiencia. La energía eólica cambia de velocidad con el tiempo y no es continua en la misma zona durante todo el año. Además, la radiación solar, la topografía, la presión, la temperatura y la humedad varían el efecto de la velocidad del viento físicamente [49].

Es importante evaluar de manera histórica la intensidad del viento y la densidad de potencia (W/m^2) para acceder a la viabilidad económica de un sitio, teniendo en cuenta las variaciones en el clima local. En la práctica, el potencial explotable es mucho menor, ya que depende en gran medida de un número de factores geográficos, orográficos, medioambientales, técnicos y financieros [51], [52].

La velocidad del viento varía con la altura, siguiendo aproximadamente una ecuación de tipo estadístico, conocida como ley exponencial de Hellmann, de la forma:

$$V(h) = V_o \left(\frac{h}{h_o} \right)^\alpha \quad (3.1)$$

Donde $V(h)$ es la velocidad buscada del viento a la altura h , V_0 es la velocidad del viento conocida a una altura h_0 (por lo general 10 metros) y α es el exponente de Hellmann que varía con la rugosidad del terreno cuyos valores se indican en la Tabla 5 [52].

Tabla 5. Valores del coeficiente de Hellmann según el terreno.

Lugares llanos con hielo o hierba	$\alpha = 0.08 - 0.12$
Lugares llanos (mar, costa)	$\alpha = 0.14$
Terrenos poco accidentados	$\alpha = 0.13 - 0.16$
Zonas rústicas	$\alpha = 0.2$
Terrenos accidentados o bosques	$\alpha = 0.2 - 0.26$
Terrenos muy accidentados y ciudades	$\alpha = 0.25 - 0.4$

Adaptada de la fuente: (Simo 2006)

3.4.2. Turbina eólica

Las turbinas eólicas son utilizadas como medio para convertir la energía del viento (hasta un 35%-40% de eficiencia de conversión de turbinas existentes) en energía mecánica rotativa [50], estas, dan la posibilidad de generación de energía eléctrica, en intervalos de velocidades de viento de aproximadamente 3 a 25 m/s [53]. La función principal del diseño de turbinas eólicas es producir energía eléctrica al menor costo posible. Por lo tanto, los aerogeneradores están diseñados para extraer la máxima energía del viento y obtener la potencia de salida máxima [49].

La capacidad de extracción de la energía del viento es una función variable de tres factores principales, entre ellos, la disponibilidad de energía eólica, la curva de potencia de la máquina y la capacidad para responder a las fluctuaciones del viento [49]. En cuanto a la turbina, la producción de

energía eléctrica es aproximadamente proporcional al área del rotor y a la altura de la torre, dependiendo del tipo de turbina que se utilice [51], [54].

Las turbinas eólicas, pueden ser de tipo de eje horizontal y vertical. Las de eje horizontal, son aquellas con mayor desarrollo tecnológico y uso. En cuanto a las turbinas de viento de eje vertical, no tienen que ser orientadas en dirección al viento y sus partes mecánicas y eléctricas son fácilmente accesibles [51]. La Figura 5 muestra la comparación física de ambas turbinas.

Una aplicación importante de las turbinas eólicas son los aerogeneradores de pequeña escala (50 W a 1000 W de potencia nominal), producen energía eléctrica a mayor costo que las grandes y medianas turbinas de viento, sobre todo en sitios pobres de viento y en aplicaciones autónomas que requieren un alto nivel de fiabilidad. Sin embargo, cuando el tamaño es adecuado y se utiliza en condiciones óptimas de trabajo, las turbinas eólicas a pequeña escala representan una fuente de energía fiable y producen energía socioeconómicamente valiosa [55].

Figura 5. Aerogeneradores eje horizontal (izquierda) y vertical (derecha).



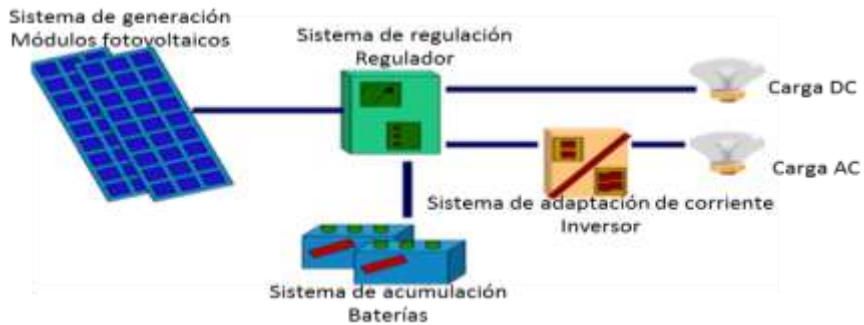
Adaptada de la fuente: (Sesto & Casale 1998)

3.5. ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

La energía solar fotovoltaica es un recurso energético renovable, siendo la energía solar más limpia, abundante, inagotable y respetuosa con el clima hasta la fecha. El efecto fotovoltaico es la conversión directa de luz solar en energía eléctrica sin la interferencia de ningún motor térmico, esta, es una de las mejores formas de aprovechar la energía solar. Cabe resaltar que la capacidad fotovoltaica instalada ha crecido a un ritmo del 40% durante la última década [56]. Los elementos que componen un sistema de energía solar fotovoltaico se pueden observar en la Figura 6.

A medida que la industria ha crecido, los precios de los módulos fotovoltaicos se han reducido, sin embargo, el precio de una unidad de energía generada a partir de un sistema fotovoltaico es de un orden de magnitud superior al de las energías convencionales. Las oportunidades de reducción de costos tecnológicos incluyen mejoras en la eficiencia de los distintos tipos de células; que dependen principalmente de los paneles fotovoltaicos, las condiciones climáticas, y de forma no lineal del nivel de irradiación y la temperatura [56], [57].

Figura 6. Elementos de un sistema de generación fotovoltaica.



Fuente: (<http://www.sfe-solar.com/calculo-sistemas-fotovoltaicos-aislados-autonomos/> 2013).

3.5.1. Módulos y células fotovoltaicas

La luz al chocar en una célula fotovoltaica, imparte suficiente energía para algunos electrones elevando su nivel energético hasta ser liberados. Una barrera de potencial construida en la célula actúa sobre los electrones liberados y produce una tensión, utilizada para conducir corriente a través de un circuito, produciendo así energía eléctrica.

Una célula solar es un dispositivo no lineal que requiere un material absorbente de luz. Actualmente en el mercado están constituidas por semiconductores de silicio debido a su disponibilidad ilimitada [59]. Las células están agrupadas en unidades más grandes denominadas módulos fotovoltaicos, que están interconectadas en una configuración serie-paralelo para formar generadores con mayor magnitud de tensión o corriente [56]. El generador convierte la energía solar en corriente continua, lo cual depende directamente de las condiciones de funcionamiento y factores de campo, la radiación solar, temperatura y las características del panel.

3.5.2. Rendimiento técnico

Una técnica para evaluar el rendimiento de los sistemas de energía es el análisis de la energía neta, que compara la cantidad de energía suministrada con la energía total requerida para encontrar, extraer, procesar, entregar, y de otra manera convertir esa energía a una forma socialmente útil. El Retorno de la Inversión de la Energía (EROI) es la relación entre la energía suministrada y los costos de energía. Es una extensión correspondiente de la EPBT que es el tiempo que toma el sistema fotovoltaico para generar la cantidad de energía igual a la usada en su producción, y se estima como sigue [57].

$$EROI = \frac{E_{out}}{E_{in}} \quad (3.2)$$

Si la relación es menor que uno, el sistema fotovoltaico no es útil ya que la cantidad de energía suministrada es menor que la energía total requerida para producirla [57].

3.5.3. Maximización y optimización de la potencia de salida

Mediante la adopción del principio de la maximización, la capacidad productiva del sistema se extiende, independientemente de las necesidades de los usuarios finales. Esto exige que el diseño del sistema se estructure de modo que el suministro de energía cumpla con la demanda de toda la vida útil del proyecto; o podría también conseguir la inversión económica más útil (sin reducir al mínimo las emisiones de CO₂) [59].

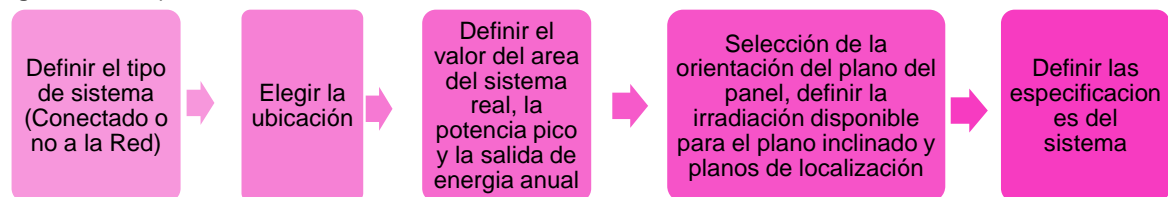
La generación por medio del panel es función del producto de la tensión y la corriente; y mediante la variación de alguno de ellos, es posible maximizar la potencia entregada por medio de un dispositivo que sigue la dirección del sol. El dispositivo seguidor del punto de máxima potencia (MPPT) asegura que sea extraída en cualquier instante de tiempo la máxima potencia

generada, de manera que pueda ser suministrada siempre a diferentes condiciones ambientales [56].

Es necesario el uso de baterías para almacenar la energía eléctrica generada, para esto se utiliza un controlador responsable de prevenir la sobrecarga o sobredescarga. En los sistemas donde la tensión del módulo corresponde con la tensión de la batería, el uso de la electrónica MPPT generalmente se considera innecesaria, ya que la tensión de la batería es lo suficientemente estable para proporcionar la potencia máxima del módulo [56].

La optimización de las aplicaciones fotovoltaicas integradas, es una función de una serie de variables que tienen gran influencia en el funcionamiento del sistema. Estas variables son: Construcción, métodos, materiales, tecnología, módulo de fabricación, niveles y orientación de la insolación, costos eléctricos, etc. [59]. Para el dimensionamiento de un sistema PV, son necesarios una serie de pasos que se muestran en la Figura 7.

Figura 7. Pasos para el dimensionamiento de un sistema PV.



Adaptada de la fuente: (Cucchiella, Adamo, Gastaldi, & Koh 2012).

3.6. ENERGÍA SOLAR TÉRMICA

De todas las fuentes de energía renovables disponibles, la energía solar térmica es la más abundante y está disponible tanto en forma directa como

indirecta. La generación directa de vapor (GDV) es una tecnología prometedora para la producción de energía eléctrica a partir de energía solar [60].

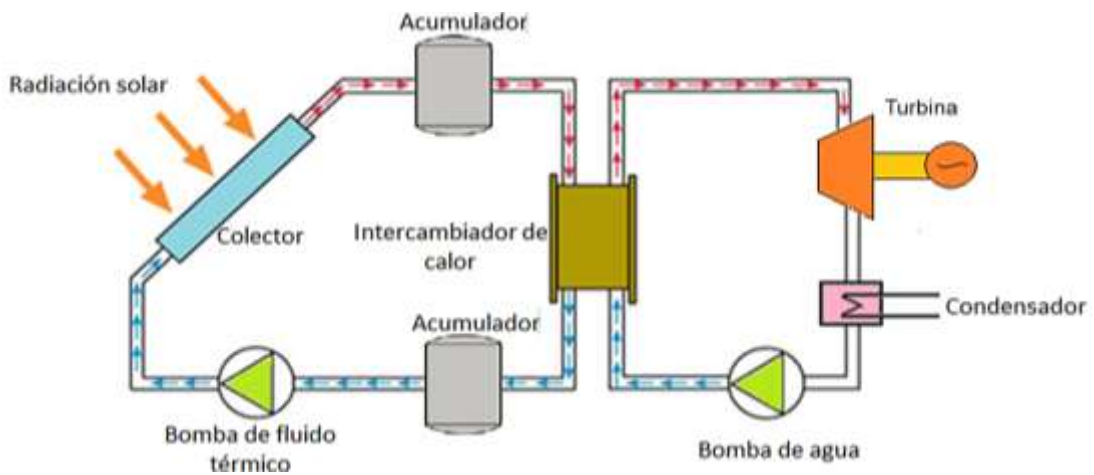
El aprovechamiento de la energía solar para la producción de energía eléctrica por medio de un sistema térmico, conlleva un largo proceso con características específicas donde la eficiencia de cada uno de los elementos que participan disminuye su producción. Los elementos del sistema pueden variar de acuerdo a las necesidades específicas de la carga y la cantidad de radiación solar incidente [61].

3.6.1. Principio y estructura del sistema de energía solar térmica

El canal de concentración del sistema de energía solar térmica se centra en la luz del sol a través de una gran área del reflector del canal que lo refleja a tubos colectores, el portador de calor calienta el agua u otro medio en vapor. A continuación, el vapor de agua consigue a través del intercambiador de calor obtener alta presión y alimenta a la turbina para generar energía eléctrica [61].

El principio habitual del canal de concentración central de energía solar térmica se muestra en la Figura 8 e incluye principalmente: Concentrador, receptor, intercambiador de calor, almacenamiento de energía y la generación de partes [61].

Figura 8. Principio de la estación de generación solar.



Adaptada de la fuente: (Fan, Zhang, & Cui 2012).

La función del colector y partes del receptor es lograr la conversión de la luz en calor. Los colectores recogen la luz directa, utilizando el dispositivo de rastreo y el sistema de control correspondiente, a continuación, los tubos colectores con recubrimiento y absorción selectiva generan alta temperatura para calentar el fluido de transferencia de calor interno [61].

El rendimiento del receptor del canal solar está directamente relacionado con la eficiencia de generación y el costo de la energía eléctrica de la totalidad de los sistemas [61]. La tendencia de desarrollo del tubo es principalmente:

- (1) Mejorar la temperatura de trabajo.
- (2) Garantizar la estabilidad del recubrimiento a alta temperatura.
- (3) Asegurarse del grado de vacío.
- (4) Optimizar la estructura y reducir el costo.

Debido a la intermitencia e inestabilidad de la energía solar, el sistema de concentración para la generación de energía solar térmica debe tener un

dispositivo de almacenamiento de calor, que es generalmente un tanque; se utilizan dos, uno de alta temperatura y otro de baja temperatura [61].

Para hacer que el concentrador y colector tengan el mejor rendimiento, se necesita un sistema de seguimiento. Existen principalmente tres modos de seguimiento: doble dimensión, orientación este-oeste, orientada al sur-norte. Estos sistemas no se encuentran en su óptimo desarrollo, por lo cual, se debe mejorar la precisión del dispositivo para hacer un seguimiento del sol, mejorar la eficiencia del sistema y mejorar la eficiencia de la central indirectamente [61].

3.6.2. Instalación fotovoltaica-térmica

El componente principal de una instalación fotovoltaica/térmica (PVT) es el módulo PVT, que es una combinación de panel fotovoltaico integrado a un colector de energía solar térmica. Estos, tienen la capacidad de generar más energía por unidad de superficie en los paneles fotovoltaicos y colectores solares térmicos a un menor costo de producción e instalación [62]. Tienen ventajas de tipo energético y estético, y pueden utilizarse en la fachada y el techo inclinado, además la superficie trasera de los módulos fotovoltaicos, tienen protección térmica de pérdidas ya que el aumento de temperatura en la célula se convierte en pérdidas en la eficiencia eléctrica [63].

3.7. CONSIDERACIONES DE GENERACIÓN PARA LAS FUENTES SELECCIONADAS

La Tabla 6 presenta requerimientos para la capacidad de generación de cada una de las fuentes seleccionadas. Estos datos fueron obtenidos de

literatura consultada en: [47], [64], [65], [66], [67], [68], [69], [70], [71], [72], [73], [74], [75].

Tabla 6. Requerimientos de generación de las fuentes seleccionadas.

FUENTE	REQUERIMIENTO
BIOMASA	Para 5kW – 15m ³
PEDAL POWER	Para 270 W-400 W -1 h
EÓLICA	3 m/s de velocidad de viento.
SOLAR TÉRMICA Y FOTOVOLTAICA	1000 W/m ²

Fuente: (Núñez & Flórez 2011), (UPME 2003), (Rodríguez 2010), (ZED factory ltd 2013), (Christensen & Nordic Folkecenter for renewable energy 2012), (PRESEID SOLAR), (TAGEX & TASOL) (SunMaxx Product Documents 2003), (FAGOR 2009), (ALTERNATE ENERGY TECHNOLOGIES LLC 2005), (<http://www.windturbinestar.com/10kwh-aeolos-wind-turbine.html> 2013), (<http://www.allsmallwindturbines.com/> 2013), (<http://www.hopefulenergy.com/category/horizontal-axis-wind-turbine.html> 2013).

4. SELECCIÓN DE MODELOS MATEMÁTICOS

La creciente demanda de energía y las limitaciones de los recursos de combustibles fósiles impulsan a los diseñadores de sistemas de energía a realizar diseños óptimos. Estos problemas son generalmente complejos y en conflicto con objetivos múltiples. Un ejemplo de este tipo de problemas es el modelado de los sistemas híbridos de energía [76].

Para el diseño de un sistema híbrido con un número de variables características dependientes del tiempo, espacio y otros aspectos muy versátiles (debido a la naturaleza aleatoria de las fuentes de energía alternativas, perfil de carga eléctrica y la respuesta no lineal de los componentes del sistema), es necesario seleccionar modelos que sean de gran ayuda al momento de optimizar un sistema híbrido de energía eléctrica [76], [77].

Es importante tener en cuenta que para modelar un sistema híbrido, los componentes individuales deben ser modelados primero y luego la mezcla se puede evaluar para satisfacer la demanda adecuadamente. Cada posible condición de funcionamiento del sistema se considera junto con los valores de los costos unitarios de cada componente. Si la predicción de la potencia de salida a partir de estos componentes individuales es lo suficientemente precisa, entonces la combinación resultante suministra potencia al menor costo [24], [25].

En este capítulo se seleccionan modelos capaces de describir matemáticamente los sistemas de energía a implementarse en las VIS según criterios de elección; se escogen modelos para cada energía alternativa que

cumplan con los criterios establecidos (en algunos casos se observan dos modelos para lo cual se recomienda al lector enfocarse en el Modelo 1 ya que es el que se considera más completo y estructurado).

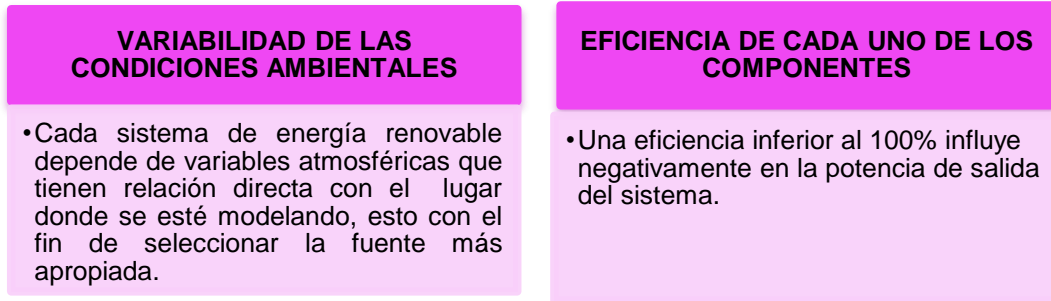
4.1. CRITERIOS Y SELECCIÓN DE LOS MODELOS DE CADA UNA DE LAS FUENTES

Los modelos utilizados en la actualidad son modelos dinámicos y su exactitud debe ser alta, de acuerdo a las necesidades de cada sistema. Un enfoque óptimo del dimensionamiento es muy necesario con el fin de evitar el sobre-dimensionamiento de tales sistemas sin disminuir la fiabilidad del suministro en todas las condiciones posibles, incluyendo la variabilidad de las condiciones meteorológicas o la evolución de la demanda de energía [25].

Cada modelo está diseñado en función de variables que pueden tener mayor o menor influencia en un sistema de acuerdo a los criterios establecidos. De cada sistema en estudio se tienen diferentes modelos obtenidos de publicaciones científicas según las bases de datos de IEEE y ELSEVIER. Para seleccionar el que mejor se adapta a estos se analiza cada variable seleccionada y su influencia. En caso de que ningún modelo se adapte a los criterios seleccionados se procederá a la búsqueda de un nuevo modelado.

Todos los modelos de las fuentes de generación deben tener en cuenta los criterios establecidos en la Figura 9.

Figura 9. Criterios generales para la adopción de los modelos de las fuentes de generación.

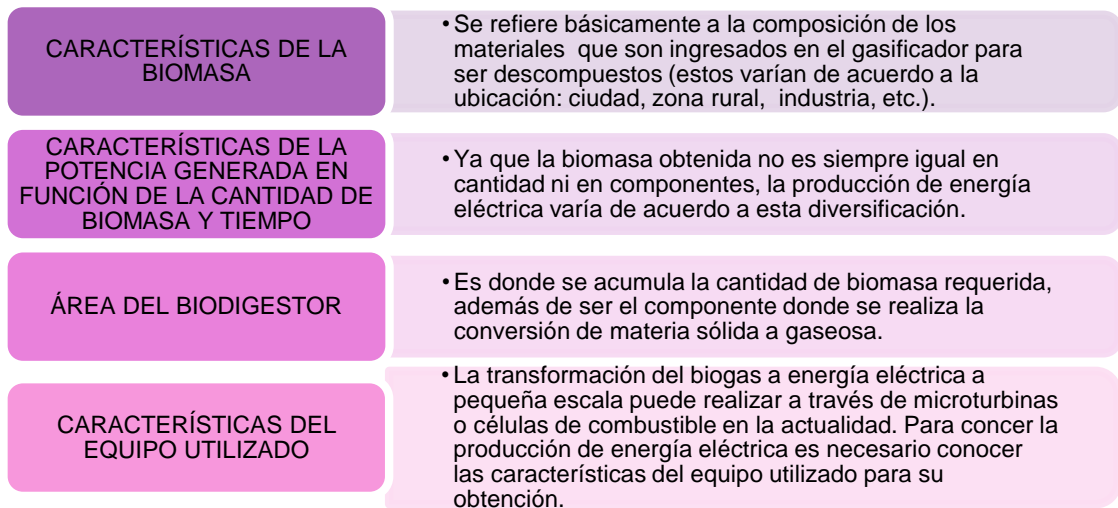


Fuente: Autoras

A continuación se presentan los criterios propios de cada fuente de generación de energía que se deben tener en cuenta para seleccionar el modelo además de los criterios mostrados en la Figura 9.

4.1.1. Modelo del sistema biomasa

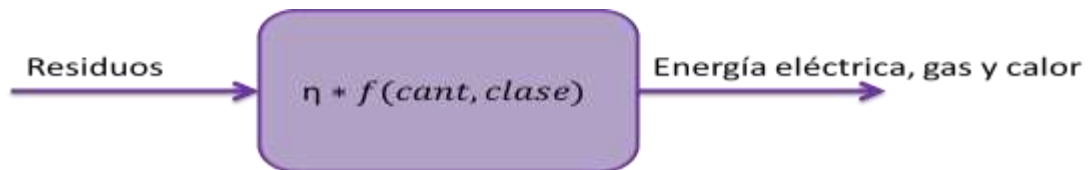
Figura 10. Criterios para la selección de los modelos de generación por biomasa.



Fuente: Autoras

El modelo presentado en la Figura 11 toma como base una eficiencia representativa que simboliza el proceso bioquímico dentro del material hasta llegar al generador de energía (microturbina o célula de combustible); la formulación del proceso bioquímico experimentado por la biomasa no se encuentra en este documento ya que su esencia no es prioridad de este trabajo de grado.

Figura 11. Proceso de generación de la energía eléctrica a través de la biomasa.



Fuente: Autoras

$$P_{gen} = \eta * f(Cant, Clase) \quad (4.1)$$

Donde, P_{gen} es la potencia eléctrica generada por el sistema de biomasa, η es la eficiencia representativa mencionada anteriormente, $f(cantidad, clase)$ representa una función de la cantidad y clase de residuos ingresados al biodigestor, ya que hay relación directa de la producción de biogás y por lo tanto de energía, con cantidad de residuos; además, la clase de estos influye en el tiempo de duración del proceso de transformación de estado sólido a gaseoso (obtención de biogás).

4.1.2. Modelo del sistema *pedal power*

Figura 12. Criterios para la selección de los modelos de generación por *pedal power*.

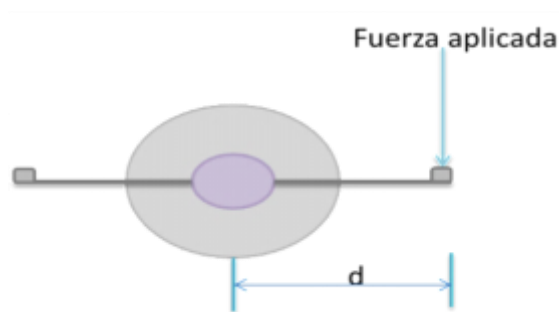
CARACTERÍSTICAS DEL GENERADOR UTILIZADO	• Estas características son propias de cada generador y se dan en función de: las revoluciones por minuto entregadas al generador y la potencia eléctrica, tensión y corriente obtenidas.
TORQUE NECESARIO	• Transmite la potencia al generador de acuerdo a las rpm.
CARACTERÍSTICAS DE LA BICICLETA	• Relaciona el tamaño, diámetro del disco, largo de la biela.
FUNCIÓN DE LA FUERZA APLICADA POR LA PERSONA	• Relaciona la velocidad y la resistencia para la generación de energía, depende de la persona.

Fuente: Autoras

A continuación, según los criterios establecidos en la Figura 12 se seleccionó el modelo siguiente para el sistema *pedal power*.

La fuerza aplicada sobre el pedal de la bicicleta estacionaria y su dinámica se muestra en la Figura 4.5 [43].

Figura 13. Fuerza aplicada sobre el pedal de una bicicleta.



Adaptada de la fuente: (Osorio 2007).

Modelo 1.

El par generado por esta fuerza está dado por:

$$T = F * d \quad (4.2)$$

Independientemente de la relación entre la longitud y el tamaño de la manivela, un brazo de palanca largo permite desarrollar niveles más altos de energía para un empuje dado y para una frecuencia de pedaleo dado:

$$P_m = T * \omega = F * d * \omega \quad (4.3)$$

Donde, ω es la velocidad angular [rad/s], T [Nm] (el par de torsión ejercido sobre la rueda) está dada por el producto de la fuerza F [N] ejercida por el sujeto del pedal de la longitud de la biela d [m].

Esta fórmula simplificada se aplica para una fuerza vertical aplicada a sólo una manivela horizontal [78]. El par efectivo neto T_N [Nm] sobre la manivela resulta de la fuerza hacia la derecha F_R y hacia la izquierda F_L del pedal [78].

$$T_N = (F_L \sin(\alpha + \beta - \gamma)d_L) + (F_R \sin(\alpha + \alpha - \gamma)d_R) \quad (4.4)$$

Donde, α es el ángulo entre la manivela y la vertical, β es el ángulo entre el eje del pedal y la vertical y γ es el ángulo entre el vector fuerza aplicada y el pedal [78].

La tensión en terminales del rectificador y la corriente demandada por el acumulador se miden por medio de un multímetro; con estos valores se puede calcular la potencia eléctrica [W] de la siguiente manera [43]:

$$P_e = VxI \quad (4.5)$$

La eficiencia está dada por:

$$N = \frac{P_e}{P_m} \quad (4.6)$$

La fuerza promedio que pueden aplicar los adultos, sin distinción de sexo es, de 294,3 N; por lo tanto el par es: 58,86 Nm. De acuerdo con la ecuación 4.2, si se logra una velocidad angular de una rps o 6,2832 rad/s, la potencia alcanzada sería 0,5 HP (370W) [47].

Observación: Es necesario tener en cuenta que el modelo no presenta la relación entre la potencia eléctrica a la salida del generador y la potencia mecánica desarrollada que entra, ya que este parámetro está dado por las características del fabricante y varían de acuerdo a la clase y diseño del mismo.

De acuerdo con los criterios establecidos en la Figura 12 para el modelado de energía *pedal power*, las variables de gran influencia del sistema se encuentran incluidas en los modelos seleccionados. Estos, por encima de los modelos que no se seleccionaron (que se pueden encontrar en el Anexo F) cuentan con los criterios establecidos en su totalidad describiendo así un alto grado de fiabilidad. Las variables mencionadas son: torque, características de la bicicleta y función de la fuerza aplicada por la persona. Cumpliendo además, con los criterios generales para todos los sistemas de energía.

4.1.3. Modelo del sistema eólico

Figura 14. Criterios para la selección de los modelos de energía eólica.

CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS DE LA TURBINA EÓLICA	• Se refiere a la cantidad de energía posible generada de acuerdo a la turbina seleccionada (curva de potencia).
FACTOR DE CAPACIDAD DE LA TURBINA	• Dimensiones del sistema (e. g. área de barrido) que influyen en la potencia de salida del aerogenerador.
MAGNITUD DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO	• Influye de manera directa en la generación de la energía, dependiendo a su vez de la altura de medición y la dirección del mismo.

Fuente: Autoras

A continuación, según los criterios establecidos en la Figura 14 se seleccionaron dos modelos para el sistema eólico:

Modelo 1.

La potencia de salida de las turbinas eólicas en un sitio específico depende de la velocidad del viento al cubo a una altura específica y de las características de la velocidad de la turbina. La velocidad del viento a una altura dada se puede calcular utilizando la siguiente ecuación [24].

$$V_z = V_j \left[\frac{Z}{Z_j} \right]^\alpha \quad (4.7)$$

Donde, V_z es la velocidad del viento a una altura Z y V_j es la velocidad de referencia a una altura Z_j de referencia y α es el exponente de potencia de Hellman que varía con la rugosidad del terreno y se puede obtener de acuerdo a la Tabla 5.

La potencia de salida P_w (kW/m²) a partir de la turbina eólica se puede calcular con la siguiente expresión [24], [79]:

$$\begin{cases} P_w = 0 & v < v_{ci} \\ P_w = av^3 - bP_r & v_{ci} < v < v_r \\ P_w = P_r & v_r < v < v_{co} \\ P_w = 0 & v > v_{co} \end{cases} \quad (4.8)$$

Los parámetro a y b se calculan como [79].

$$\begin{cases} a = P_r/(v_r^3 - v_{ci}^3) \\ b = V_{ci}^3/(v_r^3 - v_{ci}^3) \end{cases} \quad (4.9)$$

En estas ecuaciones, P_w es la medición de potencia en la turbina [kW/m²], P_r es la potencia nominal de la turbina [kW/m²], V_r es la velocidad relacionada con la potencia nominal [m/s], V es la velocidad del viento [m/s], V_{ci} es la velocidad de corte de entrada [m/s] y V_{co} es la velocidad de corte de salida [m/s] [24], [79].

La potencia del sistema disponible a partir de la turbina eólica [W] es:

$$P = P_w A_w \eta \quad (4.10)$$

Donde, A_w es el área total de barrido [m²], η es la eficiencia del generador de la turbina eólica y convertidores correspondientes [24].

Modelo 2.

La producción de energía eólica, está dada por la siguiente expresión:

$$P_w = n_t \cdot n_g \cdot 0.5 \cdot \rho_a C_p \cdot A \cdot V_r^3 \quad (4.11)$$

Donde V_r la velocidad del viento [m/s], ρ_a la densidad del aire [kg/m³], C_p el coeficiente de potencia de la turbina eólica que depende del diseño, A es el área de barrido rotor de la turbina eólica [m²], η_t , η_g la eficiencia de la turbina eólica y del generador respectivamente, que se pueden obtener a partir datos de los fabricantes [80].

De acuerdo con los criterios establecidos en la Figura 14 para el modelado de energía eólica, las variables de gran influencia del sistema se encuentran incluidas en los modelos seleccionados. Estos, por encima de los modelos que no se seleccionaron (que se pueden encontrar en el Anexo F) cuentan con los criterios establecidos en su totalidad describiendo así un alto grado de fiabilidad. Las variables mencionadas son: velocidad del viento, características eléctricas y de diseño del aerogenerador, eficiencia de los componentes, condición atmosférica. Cumpliendo además, con los criterios generales para todos los sistemas de energía.

4.1.4. Modelo del sistema fotovoltaico

Figura 15. Criterios para la selección del modelo de generación fotovoltaica.

<p>CARACTERÍSTICAS TENSIÓN – CORRIENTE DE LA CÉLULA FOTOVOLTAICA</p>	<ul style="list-style-type: none"> • La célula muestra las características de potencia de salida del sistema de generación de energía eléctrica.
<p>RADIACIÓN SOLAR INCIDENTE EN EL PANEL (COMO FUNCIÓN DEL TIEMPO)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • La potencia generada depende directamente de este valor, se deben tener datos históricos en función del lugar según datos meteorológicos.
<p>ÁREA DE LOS PANELES FOTOVOLTAICOS</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Influye de manera directa en la cantidad de la captación de la radiación solar.

Fuente: (Torres & Valkealahti 2013), (Kontoleon 2012), (Deshmukh & Deshmukh 2008).

A continuación, según los criterios establecidos en la Figura 15 se seleccionan los dos modelos siguientes:

Modelo 1.

La energía de entrada al sistema de PV es la radiación solar y la radiación solar total sobre una superficie inclinada se estima como:

$$I_T = I_b R_b + I_d R_d + (I_b + I_d) R_r \quad (4.12)$$

Donde, I_b e I_d son las radiaciones solares normal directa y difusa, R_b y R_r son factores de inclinación de parte de la radiación solar difusa y reflejada. La radiación solar depende de la posición del sol en el cielo, el cual varía mes a mes [24].

La potencia de salida por hora de un sistema PV, con una superficie A_{PV} (m^2) en un día promedio del mes j , cuando la radiación solar total I_T (kWh/m^2) es incidente en la superficie fotovoltaica, está dada por la expresión [24]:

$$P_{sj} = I_{Tj} \eta A_{PV} \quad (4.13)$$

Donde, η es la eficiencia del sistema y está dado por:

$$\eta = \eta_m \eta_{pc} P_f \quad (4.14)$$

La eficiencia del módulo está dada por:

$$\eta_m = \eta_r [1 - \beta(T_c - T_r)] \quad (4.15)$$

Donde η_r es la eficiencia de referencia del módulo, η_{PC} es la eficiencia de acondicionamiento de potencia, P_f es el factor de empaquetado, β es el coeficiente de temperatura de la eficiencia matriz, T_r es la temperatura de

referencia para la eficiencia de la célula en °C y T_c es la temperatura de la celda promedio mensual en °C [24].

La temperatura de las células depende de la temperatura ambiente y la radiación solar recibida por el panel. Se puede determinar de la siguiente manera:

$$T_c = T_a + G_h \cdot (NOCT - T_{a,NOCT}) / G_{NOCT} \quad (4.16)$$

Donde, T_a es la temperatura ambiente, NOCT es la temperatura nominal de las células. $T_{a,NOCT} = 20$ °C, y $G_{NOCT} = 800$ W / m² [24].

Modelo 2.

La energía generada por los módulos fotovoltaicos se puede calcular utilizando la expresión [79]:

$$P_{pv}^t = S_{pv} n_{pv} P_f n_{pc} G^t \quad t = 0, \dots, T - 1 \quad (4.17)$$

Donde, S_{pv} es el área de conjunto de células solares [m²], n_{pv} es la eficiencia de referencia del módulo, P_f es el factor de embalaje, n_{pc} es la eficiencia de acondicionamiento de energía y G^t es la irradiancia hora prevista [kWh/m²], que es predicha por algunos modelos meteorológicos y por lo tanto, estas predicciones son confiables [79].

De acuerdo con los criterios establecidos en la Figura 14 para el modelado de energía solar fotovoltaica, las variables de gran influencia del sistema se encuentran incluidas en los modelos seleccionados. Estos, por encima de los modelos que no se seleccionaron (que se pueden encontrar en el Anexo F) cuentan con los criterios establecidos en su totalidad describiendo así un alto grado de fiabilidad. Las variables mencionadas son: característica tensión

corriente de la célula, radiación solar y área de los paneles. Cumpliendo además, con los criterios generales para todos los sistemas de energía.

4.1.5. Modelo de sistema solar térmico

Figura 16. Criterios para la selección de los modelos de la energía solar térmica.

CAPACIDAD DE CALENTAMIENTO Y/O ENFRIAMIENTO	<ul style="list-style-type: none"> • Constituye la temperatura de entrada y salida del colector solar
ÁREA DE LOS COLECTORES SOLARES	<ul style="list-style-type: none"> • Representa la cantidad de radiación captada por los paneles que puede ser expresada en términos de potencia
RADIACIÓN SOLAR INCIDENTE EN LOS COLECTORES	<ul style="list-style-type: none"> • La potencia generada depende directamente de este valor, se deben tener datos meteorológicos en función del lugar con registros históricos.
CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO	<ul style="list-style-type: none"> • Cantidad de energía calorífica para poder ser utilizada en ausencia de radiación solar.

Fuente: (Torres & Valkealahti 2013), (Kontoleon 2012), (Deshmukh & Deshmukh 2008).

A continuación, según los criterios establecidos en la Figura 16, se seleccionan dos modelos para el sistema solar térmico:

Modelo 1.

La energía térmica útil extraída del colector de agua depende de la radiación instantánea solar incidente, el área de la placa, y su eficiencia se puede obtener de acuerdo a la siguiente expresión [79]:

$$E_{fpc}^t = \eta_{fpc} A_{fpc} G^t \Delta t \quad t = 0, \dots, T - 1 \quad (4.18)$$

Donde, η_{fpc} es la eficiencia del colector solar de placa plana, A_{fpc} [m^2] es el área y G^t es la radiación solar hora prevista, la cual es predicha por algunos modelos meteorológicos y por lo tanto se consideran predicciones seguras [79].

Modelo 2.

El calentamiento de un volumen de agua exige elevación de temperatura (es decir, un aumento de energía). Para fines domésticos, la cantidad de energía está vinculada a los hábitos individuales de cada ocupante de una vivienda. Los datos registrados según [52] muestran que, en promedio, cada miembro de una familia utiliza aproximadamente 100 L de agua al día. La cantidad de energía utilizada para calentar el agua cada mes se calcula como:

$$L = NP(100)(T_w - T_m)\rho_w C_p \quad (4.19)$$

Donde, L es la energía utilizada para el calentamiento del agua, N el número de días por mes, P el número de personas, T_w es la temperatura mínima aceptada para el agua caliente ($60^\circ C$), T_m es la temperatura ambiente del agua y $\rho_w C_p$ densidad y calor específico del agua respectivamente [52].

De acuerdo con los criterios establecidos en la Figura 16 para el modelado de energía solar térmica se establecieron dos modelos diferentes, energía eléctrica y agua caliente; las variables de gran influencia del sistema se encuentran incluidas en los modelos seleccionados. Estos, por encima de los modelos que no se seleccionaron (que se pueden encontrar en el Anexo F) cuentan con los criterios establecidos en su totalidad describiendo así un alto grado de fiabilidad. Las variables mencionadas son: área de los colectores,

radiación solar, capacidad de calentamiento y enfriamiento. Cumpliendo además, con los criterios generales para todos los sistemas de energía.

4.1.6. Modelo de la batería

Figura 17. Criterios de selección para el modelo de la batería.

FUNCIÓN DE SU CARGA Y DESCARGA MÁXIMA	• Cantidad de potencia que se puede obtener y almacenar en la batería.
CAPACIDAD DE LA BATERÍA Ah	• Cantidad de energía que puede almacenar en un tiempo determinado.

Fuente: (Deshmukh 2008), (Ashok 2007), (Mohammadi, Hosseinian & Gharehpetian 2012).

A continuación, según los criterios establecidos en la Figura 17, se seleccionan dos modelos para la batería:

Modelo 1.

La capacidad de almacenamiento de una batería se mide en términos de amperes-hora (Ah) o watt-hora (Wh). Una variable de decisión relacionada con banco de baterías es la capacidad de la batería. La fórmula que relaciona la tensión del terminal del banco de baterías con la capacidad de almacenamiento y la temperatura ambiente es [81]:

$$V_{bt}(t-1) = Nbs \left[2 + 0.148 \left(\frac{E_B(t-1)}{E_{Bmax}} \right) \right] [1 - 0.001(T_A - 25)] \quad (4.20)$$

La Ecuación 4.20 indica la forma de cálculo de la tensión en los bornes de banco baterías, es de gran importancia ya que en cada momento esta debe ser monitoreada para evitar que la batería se sobrecargue o descargue. Por

lo tanto, es esencial tener en cuenta estas limitaciones en la ecuación de tensión de la batería [81].

Estados de la batería:

El estado de carga de la batería se puede calcular a partir de las siguientes ecuaciones:

Descarga de la batería [80]:

$$P_b(t) = P_b(t - 1) \cdot (1 - \sigma) - \left(\frac{P_h(t)}{\eta_i} - P_l(t) \right) \quad (4.21)$$

Carga de la batería [80]:

$$P_b(t) = P_b(t - 1) \cdot (1 - \sigma) + (P_h(t) - P_l(t)/\eta_i) \cdot \eta_b \quad (4.22)$$

Donde, $P_b(t-1)$ y $P_b(t)$ son la energía de la batería al principio y el final del intervalo de tiempo t respectivamente; $P_l(t)$ la demanda de carga en el tiempo t , $P_h(t)$ es la energía total generada por las fuentes de energía renovable en el tiempo t , σ el factor de auto-descarga y η_b , η_i son la eficiencia de la carga de la batería y la eficiencia del inversor respectivamente, lo cual se puede obtener a partir de los datos de los fabricantes [80].

Modelo 2.

Para describir el proceso de carga y descarga de la batería, se presenta el siguiente modelo:

$$Q = I\Delta t \quad (4.23)$$

$$I_N = \frac{C_N}{t_N} \quad (4.24)$$

$$C = \frac{1.67C_N}{1 + 0.67 \left(\frac{I(t)}{I_N} \right)^{0.9}} (1 + 0.005\Delta T) \quad (4.25)$$

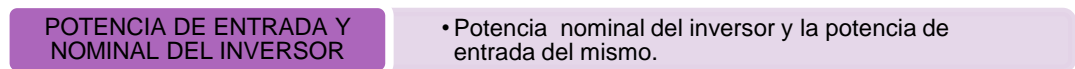
$$SOC = \frac{Q}{C} \quad (4.26)$$

Donde, Q es la cantidad de carga de la batería (A-h), I es la corriente de la batería (A), Δt es el momento en el que la batería adquiere la carga (h), I_N es la corriente nominal (A), C_N es la capacidad de almacenamiento nominal (A-h), t_N el régimen nominal de carga y descarga de la batería (h), ΔT es el acumulador de calefacción (posiblemente idéntica para todos los elementos) en comparación con la temperatura ambiente (°C) y SOC es el estado de carga.

4.1.7. Modelo del inversor

De acuerdo a las energías seleccionadas, el inversor deberá poder admitir la potencia máxima generada por las energías: solar fotovoltaica, térmica, eólica, biomasa y *pedal power* (esto se debe realizar haciendo un análisis de diversificación de potencial de generación).

Figura 18. Criterios de selección para el modelo del inversor.



Fuente: (<http://sichel.org/index.php> 2013).

A continuación, según los criterios establecidos en la Figura 18, se selecciona el siguiente modelo:

La potencia de salida del inversor se modela de acuerdo a [82]:

$$P_{INV} = P_{in} n \left(\frac{P_{in}}{P_N} \right) \quad (4.27)$$

Donde, P_{in} es la potencia de entrada, n es la eficiencia en función de la potencia de entrada y P_N es la potencia nominal del equipo [82].

4.2. MODELADO DE SISTEMAS HÍBRIDOS

Después de la evaluación de los modelos de los componentes individuales, se debe evaluar la mezcla de ellos para satisfacer la demanda y lograr un sistema fiable, de esta manera, este suministrará la potencia a menor costo si la combinación es lo suficientemente precisa.

Como enfoque básico, se puede modelar teniendo en cuenta que el nivel base de la demanda de carga se puede suministrar por algunos componentes del sistema híbrido, mientras que los otros componentes se emplean para el seguimiento del resto de la demanda. Sin embargo, este tipo de procedimiento de dimensionamiento garantiza sólo la fiabilidad del suministro sin considerar los aspectos económicos [25]. Es por esto que la selección del modelo debe realizarse de manera detallada teniendo en cuenta el cumplimiento de los objetivos planteados por el sistema.

4.2.1. Criterios establecidos para la selección de modelos

En la Figura 19 se muestran una serie de criterios propuestos para realizar la selección de los modelos de energías renovables consideradas en el estudio. Estos criterios tienen como objetivo la selección del modelo más óptimo, con ellos obteniendo una maximización de energía, así como una relación costo-beneficio.

La demanda de la vivienda es variante en todo momento, su conocimiento es fundamental ya que en base a esto se realiza el dimensionamiento; por lo tanto se recomienda asumir un sistema de generación capaz de tener controlada la entrega y demanda de energía en todo momento. La función del controlador es: determinar la energía disponible de cada uno de los componentes del sistema. Por medio de este, se pueden obtener los costos de producción, la demanda, las pérdidas de carga y el funcionamiento de la batería. Además, se pueden conocer las energías no satisfechas.

Figura 19. Criterios de selección para el modelado de sistemas híbridos.

ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD

El análisis de confiabilidad de la energía es generalmente considerado como un paso importante en cualquier proceso de diseño del sistema; se expresa normamente en términos de la probabilidad de pérdida de la energía eléctrica.

COSTOS DEL SISTEMA

Los sistemas deben incluir el análisis de costos por componente. Tener una relación costo-beneficio. Existen varios criterios económicos en términos generales, como el costo actual neto, costo nivelado de energía y el coste del ciclo de vida.

PROBABILIDAD DE PÉRDIDA DE CARGA (LOLP)

Se establece para medir las condiciones del sistema. Aporta al conocimiento de la viabilidad y la economía de las fuentes de alimentación.

FACTOR DE LAS BATERÍAS

Un sistema híbrido requiere por lo menos una fuente controlada de energía. Se debe conocer el número de días de utilización mínimo de reserva de la batería además de la capacidad de estas.

Fuente: (Deshmukh & Deshmukh 2008), (Dagdougui, Minciardi, Ouammi, Robba & Sacile 2012).

4.2.2. Modelos seleccionados para el sistema de energía híbrido

Los modelos seleccionados para el sistema de energía híbrido son los siguientes:

- **Modelo para suplir necesidades térmicas, eléctricas y de agua**

La energía horaria que se puede utilizar en intervalo de tiempo para la calefacción, E_h^t es expresada en la siguiente ecuación:

$$E_h^t = \sum_{y=1}^N E_{y,h}^t + E_{net,h}^t + CH_h^t \quad (4.28)$$

La energía eléctrica por hora, que se puede utilizar en intervalo de tiempo se expresa por la siguiente expresión:

$$E_e^t = \sum_{y=1}^N E_{y,e}^t + E_{net,e}^t + CH_e^t \quad (4.29)$$

Tabla 7. Variables utilizadas para el modelo de las necesidades eléctricas y de agua.

VARIABLE	DESCRIPCIÓN
E_h^t	Energía horaria que se puede utilizar en intervalo de tiempo para la calefacción
$E_{y,h}^t$ y $E_{net,h}^t$	Energía calorífica proporcionada por los sistemas de energías renovables y la red eléctrica. Donde y representa las diferentes fuentes de generación y net la red.
$E_{y,e}^t$	Energía eléctrica proporcionada por los sistemas de energías renovables y la red eléctrica. Donde y representa las diferentes fuentes de generación; y net la red.
CH_e^t y CH_h^t	Energía proporcionada desde el sistema de alimentación (e) y de calefacción (h).
\tilde{E}_{net}^t	Total de la energía inyectada a la red por la turbina eólica y el panel solar
$E_{wt,net}^t$	Energía inyectada a la red por la turbina eólica
$E_{pv,net}^t$	Energía inyectada a la red por los paneles solares
\hat{E}_{net}^t	Total de la energía inyectada tomada de la red
$E_{wt,p}^t$	Energía del sistema de energía eólica y la red para el bombeo de agua
$E_{wt,e}^t$	Energía prevista por la fuente de energía eólica y la red
$E_{wt,st}^t$	Energía de la turbina eólica que es enviada al sistema de almacenamiento
$E_{pv,st}^t$	Energía fotovoltaica que es enviada al sistema de almacenamiento
$E_{pv,e}^t$	Energía prevista por la fuente del sistema fotovoltaico y la red
$E_{pv,p}^t$	Energía del sistema fotovoltaico y la red para el bombeo de agua

Fuente: Autoras

- **Unidad de tamaño**

El algoritmo numérico iterativo es utilizado para el tamaño del sistema híbrido, minimizando los costos de capital de las 2^n-1 combinaciones de fuentes renovables. La disponibilidad oportuna de los recursos, el equilibrio entre oferta y demanda, y los límites de funcionamiento de las unidades son las restricciones básicas. Cuando se presenta el caso de fuentes de energía eólica y otras fuentes de generación con densidad superior a la de un solo módulo PV, se fijan como uno cada uno de ellos y se incrementa el número de módulos PV hasta equilibrar el sistema [80].

Se determina la estrategia óptima de funcionamiento y los costos anuales del ciclo de vida de la configuración. Estos pasos se repiten de forma incremental, y el mismo procedimiento para las demás combinaciones [80].

La unidad de tamaño de una combinación híbrida se reduce a su mínimo costo de capital total C_{mc} dado por:

$$C_{mc} = \sum_{a=1}^{Na} C_a + \sum_{b=1}^{Nb} C_b + \sum_{c=1}^{Nc} C_c + \sum_{d=1}^{Nd} C_d + \sum_{e=1}^{Ne} C_e \quad (4.30)$$

Donde, N_a, N_b, N_c, N_d, N_e es el número total de unidades tipo de cada fuente de energía utilizada en el sistema híbrido incluyendo la batería y el generador diesel en caso de que se utilicen; y C_a, C_b, C_c, C_d, C_e son los costos de capital correspondientes [80].

La estrategia de operación por hora de las diferentes configuraciones híbridas se determina utilizando la optimización con restricciones no lineales de energía que no sean suficientes para satisfacer la carga. Las limitaciones en fuentes de energía renovables son tales que se deben utilizar tanto como

sea posible. La estrategia de operación óptima para una combinación de la energía con el fin de minimizar el costo de operación anual C_{oa} calculado basado en el costo de operación para el intervalo t en un día muestra a continuación [80]:

$$C_{ot} = \sum_1^{365} \left\{ \sum_{t=1}^{24} (C_{oa}(t) + C_{ob}(t) + C_{oc}(t) + C_{od}(t) + C_{oe}(t)) \right\} \quad (4.31)$$

- **Probabilidad de pérdida de carga LOLP**

El LOLP está dado por:

$$LOLP = \frac{\sum_{i=1}^n \text{horas}(I_{suministrada}(t) < I_{necesitada}(t))}{n} \quad (4.32)$$

Donde:

$$I_{necesitada}(t) = \frac{L(t) - P_{n1}(t) - P_{n2}(t) - \dots - P_{nn}(t)}{V_{Li}} n(I_{bateria}(t)) \quad (4.33)$$

$$I_{suministrada}(t) = \text{mínimo} \left(I_{\text{-max}} = \frac{0.2SOC}{\Delta t}, \frac{SOC(t)\sigma - SOC_{min}}{\Delta t} \right) \quad (4.34)$$

Y $I_{necesitada}(t)$ es la corriente necesaria para la carga en el tiempo t , $I_{suministrada}(t)$ es la corriente suministrada por el sistema híbrido en el tiempo t , $L(t)$ son los requisitos de carga eléctrica en la hora t , $P_{n1}(t)$ es la potencia generada por la fuente de generación 1, $P_{n2}(t)$ es la potencia generada por la fuente de generación 2, $P_{nn}(t)$ es la potencia generada por la fuente de generación n . Se puede observar que el diseñador puede obtener el valor del LOLP asumiendo condiciones de carga y atmosféricas (para la generación de la potencia). Si el LOLP es bajo, entonces el resultado es alto costo del sistema y viceversa [24].

4.2.3. Modelado sistema híbrido fotovoltaico-eólico

Se muestra el modelo de la generación de energía a través de un sistema híbrido fotovoltaico-eólico debido a que este es el sistema de poligeneración base para el sistema a ser implementado en la VIS. Teniendo las condiciones climáticas, el sistema híbrido eólico-solar necesita una estrategia de operación para integrar la salida de ambos sistemas. Sin embargo, el sistema híbrido funciona como un sistema separado antes del amanecer y después del atardecer, y funciona como un sistema PV independiente si el viento está moderado durante el día [83].

La energía que se envía a la red eléctrica está compuesta por el excedente producido por la turbina de viento y el excedente producido por los módulos fotovoltaicos, se muestra en la siguiente expresión [79]:

$$\tilde{E}_{net}^t = E_{wt,net}^t + E_{pv,net}^t \quad t = 0, \dots, T - 1 \quad (4.35)$$

La energía que se toma de la red está dada por la siguiente expresión [79]:

$$\hat{E}_{net}^t = E_{net,h}^t + E_{net,e}^t + E_{net,p}^t \quad t = 0, \dots, T - 1 \quad (4.36)$$

Las producciones de energía de la turbina eólica y los paneles fotovoltaicos en cada intervalo de tiempo se pueden utilizar para diferentes propósitos: Abastecer la demanda eléctrica, la demanda de calefacción, la demanda de agua, ser enviada al sistema de almacenamiento o vendida a la red. Las ecuaciones utilizadas para el modelo de este proceso son [79]:

$$E_{wt}^t = E_{wt,h}^t + E_{wt,e}^t + E_{wt,p}^t + E_{wt,net}^t + E_{wt,st}^t \quad t = 0, \dots, T - 1 \quad (4.37)$$

$$E_{pv}^t = E_{pv,h}^t + E_{pv,e}^t + E_{pv,p}^t + E_{pv,net}^t + E_{pv,st}^t \quad t = 0, \dots, T - 1 \quad (4.38)$$

Energía híbrida total generada en cualquier momento t [80]:

$$P(t) = \sum_{n=1}^{Nh} P_i \quad (4.39)$$

Donde P_i es la potencia generada por cada uno de los sistemas de energía renovable que componen el sistema de generación híbrido.

5. GENERALIDADES DE LA POLIGENERACIÓN, GENERACIÓN HÍBRIDA Y GENERACIÓN DISTRIBUIDA

La energía eléctrica debe ser producida en el momento en que se necesita. No obstante, cuando hay exceso de energía generada en los sistemas, se procede a almacenarla, lo que se traduce como alto costo de inversión. Por otra parte es posible y a su vez más sostenible con el medio ambiente generar la energía eléctrica por medio de dos o más fuentes primarias con sistemas de control adicionales para evitar la producción excesiva de energía; lo que se conoce como generación híbrida [84].

Los sistemas híbridos se ven mejorados potencialmente cuando la producción de energía es eficaz y se aprovechan todas las formas de generación posibles de obtener mediante los recursos naturales utilizados; y es de aquí donde nace el interés en la poligeneración como un medio prometedor que atiende la necesidad de conseguir un desarrollo sostenible desde el punto de vista económico, social y ambiental. Normalmente la poligeneración hace alusión a un sistema de suministro que emplea diversas fuentes para entregar simultáneamente más de una forma de energía a un usuario final. [85], [86].

Aprovechando los beneficios brindados por los sistemas híbridos y de poligeneración, y como alternativa de solución al modelo centrado tradicional, en la cual la generación de energía se realiza a una distancia considerable del usuario final (lo que genera pérdidas importantes en el transporte de la energía), aparece la generación distribuida que desplaza los centros de generación a los puntos de consumo de ésta, haciendo uso también de los recursos renovables.

5.1. POLIGENERACIÓN

Las energías renovables proponen una economía diferente: El costo de la energía renovable es nulo, pero su baja densidad y naturaleza transitoria requieren una captación costosa y una tecnología de almacenamiento para satisfacer las necesidades de las sociedades con altos estándares de vida.

Teniendo en cuenta lo anterior, los sistemas de poligeneración incluyen la integración de procesos necesarios para alcanzar un doble objetivo, aumentar significativamente la eficiencia de los recursos naturales, minimizando su impacto ambiental [5], ya que puede producir dos o más productos comercializables tales como productos químicos, energía eléctrica, combustible e hidrógeno; a partir de una mezcla de recursos naturales con una eficiencia energética y materiales potencialmente mayores que las prácticas autónomas actuales [87].

De hecho, es interesante hacer frente a los beneficios de poligeneración de las energías renovables, ya que la eficiencia de la recolección y el almacenamiento de la energía se podría mejorar si las ofertas y demandas son integradas [88].

Hay una variedad de tecnologías de poligeneración y sistemas disponibles. Sin embargo, el sistema adecuado se debe seleccionar en función del tipo de comunidad donde se va a implementar el sistema y los recursos locales de ésta. La ambición de los expertos es el diseño de un sistema eficiente, que cubra las necesidades globales de energía y, al mismo tiempo, minimice el uso de recursos primarios. Siguiendo este enfoque, las tecnologías de poligeneración se deben usar para generar las energías que suplan las necesidades a nivel local [89].

5.1.1. Definición de poligeneración

La poligeneración se define como la producción combinada de dos o más servicios de energía que buscan aprovechar al máximo el potencial termodinámico de los recursos consumidos y minimizar la generación de residuos [5], [90]. Dichos productos pueden ser energía eléctrica, calor, frío y en algunos casos, productos químicos. Entre las fuentes de entrada, las fuentes renovables juegan un papel importante [91].

Asimismo, los sistemas de poligeneración requieren la integración de procesos de energía apropiada para su síntesis y diseño. Respecto a esto, en el proceso se requieren técnicas de integración y optimización, lo que se puede combinar con técnicas termodinámicas [5].

La Figura 20 muestra un proceso integrado generalizado que define la poligeneración, con la obtención de dos o más productos energéticos a partir de uno o más recursos naturales.

Figura 20. Definición del sistema de poligeneración.



Adaptada de la fuente: (http://circe.cps.unizar.es/polimed/poligeneracion/poli_caso.htm 2013).

5.1.2. Cogeneración y trigeneración

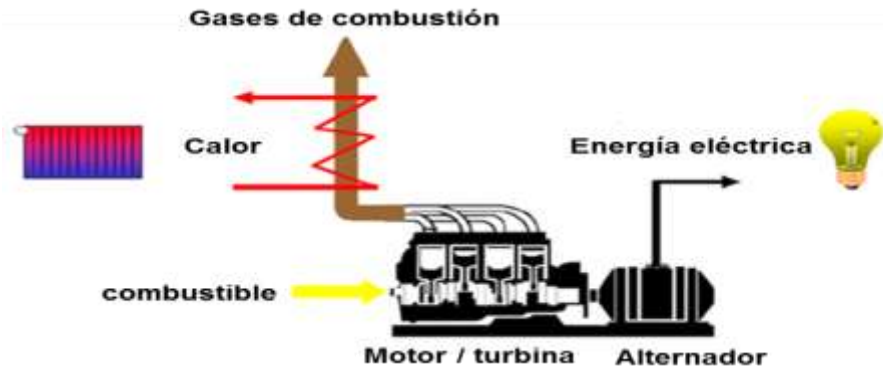
Los sistemas de cogeneración y trigeneración pueden representar tecnologías eficaces para obtener ahorro de energía, reducción de emisiones de CO₂, suministro de energía fiable y reducción de pérdidas en la red. La rentabilidad económica de estos sistemas depende de los precios de la energía y las características del mercado [93], [91]; sin embargo, la diferencia esencial entre la cogeneración y la trigeneración, es que en ésta última se puede utilizar energía térmica y/o eléctrica para proporcionar enfriamiento, ya sea con fines industriales o climatización [85].

- **Cogeneración**

Los sistemas de cogeneración CHP (*Combined Heat and Power*), se definen como la generación simultánea combinada de energía eléctrica y energía térmica útil, a partir de la misma fuente de energía; son métodos muy eficientes, limpios y confiables que proporcionan un notable ahorro energético. La eficiencia de la cogeneración se basa en el aprovechamiento y recuperación del calor residual que se desecha de un proceso de producción de energía eléctrica [85], [94].

El calor residual se aprovecha para producir energía térmica útil, permitiendo principalmente ahorrar energía comparado con los sistemas convencionales. A través de la recuperación del calor residual, se pueden lograr eficiencias eléctricas efectivas de 70% a 90% en comparación con un sistema de producción de calor y energía eléctrica por separado. La Figura 21 ilustra el proceso de cogeneración [85], [94], [95].

Figura 21. Sistema de cogeneración.

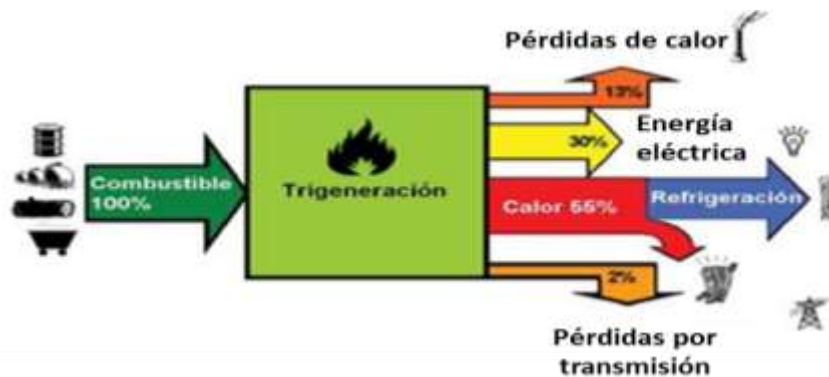


Fuente: (<http://edu-energia.wikispaces.com/Cogeneraci%C3%B3n> 2013).

• Trigeneración

La trigeneración CCHP (*Combined Cooling Heat and Power*) es la combinación de calor, refrigeración y energía eléctrica. Una planta de trigeneración en su estructura más general puede ser vista como la combinación de un lado de cogeneración y un lado de enfriamiento. Representa una opción clave para el desarrollo de sistemas integrados de energía de alta eficiencia y costo. La complejidad de los sistemas de plantas posibles exige la adopción de modelos generales de manejo de múltiples componentes interconectados y flujos de energía de varias tipologías. La Figura 22 ilustra un proceso de trigeneración [93], [97], [93].

Figura 22. Sistema de trigeneración.



Fuente: (<http://www.infortel.es/eficiencia.htm> 2013).

5.1.3. Clasificación de los beneficios de la poligeneración

El principal beneficio de la poligeneración es salvar las fuentes de energía primaria, por ejemplo, utilizando activamente el calor de residuo del proceso de generación de energía. Los impactos de la poligeneración se clasifican en: impactos medio ambientales, económicos y sociales, como se puede observar a continuación [92]:

5.1.3.1. Impactos medio ambientales

- Permite la reducción de emisiones de CO₂ y NO_x provocadas por las instalaciones de generación necesarias, además de un consumo responsable y sostenible [92].
- Es factible la posibilidad de utilización de energías renovables como fuentes energéticas en el caso de un sistema autónomo o de apoyo si se utilizan combustibles convencionales [92].
- Con sistemas totalmente autónomos se minimizan los impactos generados por el tendido de redes eléctricas en zonas especialmente sensibles. Si dichas instalaciones se conectan a la red, permitirían aumentar la calidad de las redes existentes, ya que aumentaría el porcentaje de generación distribuida con respecto a la producida en grandes unidades de generación [92].

5.1.3.2. Impactos económicos

- Ahorro sustancial de energía primaria obtenida, lo que supone un ahorro anual significativo en la operación de la instalación integrada elegida [92].

- La creación de un sector específico en la rama del mantenimiento industrial no existente hasta ahora que incluya personal especialista en la reparación y mantenimiento de las instalaciones de producción de agua, calor, frío y energía eléctrica [92].
- La inclusión de tecnologías renovables permitirá la extensión de pequeñas empresas de producción e instalación de sistemas y componentes relacionados con el sector, así como centros de investigación que estudien la solución al problema de la aleatoriedad de las energías renovables [92].

5.1.3.3. Impactos sociales

- La inclusión de un sistema de autoabastecimiento sostenible para suministro de agua y energía [92].
- El mantenimiento de las instalaciones integradas de poligeneración implica la formación continua del personal en las tecnologías involucradas en la integración de la producción energética e hídrica [92].

5.1.4. Ventajas y desventajas de la poligeneración

A continuación, en la Figura 23 se muestran las principales ventajas y desventajas de la implementación de un sistema de poligeneración [5], [90]:

Figura 23. Ventajas y desventajas de la poligeneración.



Fuente: (Serra, Lozano, Ramos, Ensinas & Nebra 2009), (Coronas 2008).

5.1.5. Sostenibilidad de los sistemas de poligeneración

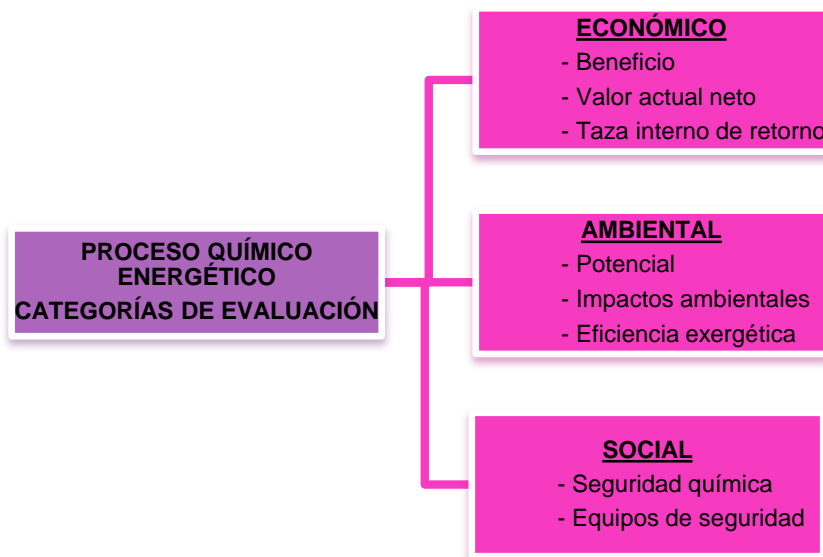
La sostenibilidad es ahora una fuerza impulsora clave para las industrias de todo el mundo, incluido el sector de la energía y la química. Esta requiere limitar el consumo de materiales y energía y la búsqueda de formas menos derrochadoras de la satisfacción de las necesidades mediante el aumento de la eficiencia energética, la reutilización de materiales y el uso de tecnologías sostenibles [87].

Los sistemas de poligeneración son estructuralmente muy complejos en comparación con los sistemas tradicionales. Los diseños basados en criterios técnico-económicos por sí solos no son suficientes desde el punto de vista de la sostenibilidad industrial [87].

Categorías de evaluación de la sostenibilidad

En el desarrollo sostenible, la medición de los impactos ambientales y sociales de una actividad económica a través de indicadores específicos es muy importante. La Figura 24 muestra las sub-categorías consideradas en cada una de las dimensiones [87].

Figura 24. Categorías de evaluación de sostenibilidad de procesos químicos.



Adaptada de la fuente: (Gangadharan, Zanwar, Zheng, Gossage & Lou 2012).

5.1.6. Tecnologías CONCERTO

La Unión Europea ha adoptado una política energética que tiene por objeto no sólo impulsar la competitividad y la seguridad del abastecimiento

energético, sino también aumentar la eficiencia energética de manera significativa, para ahorrar energía y promover las fuentes de energía inocuas para el clima [89].

La Comisión Europea propuso la iniciativa CONCERTO, cuyo propósito es hacer frente a los retos de la creación de un futuro más sostenible para las necesidades energéticas de Europa mediante la aplicación de un enfoque integrado de medidas de eficiencia energética junto con el mayor uso de fuentes de energía renovables a nivel local [89].

El principal beneficio de CONCERTO es la maximización de la eficiencia global del sistema integrado cerca del punto de uso. La poligeneración combinada con calefacción y refrigeración puede proporcionar beneficios adicionales para una comunidad amplia. Los beneficios secundarios pueden incluir la mejora de la fiabilidad de las redes de suministro y distribución, derivados de una mejor interacción entre productores y distribuidores [89].

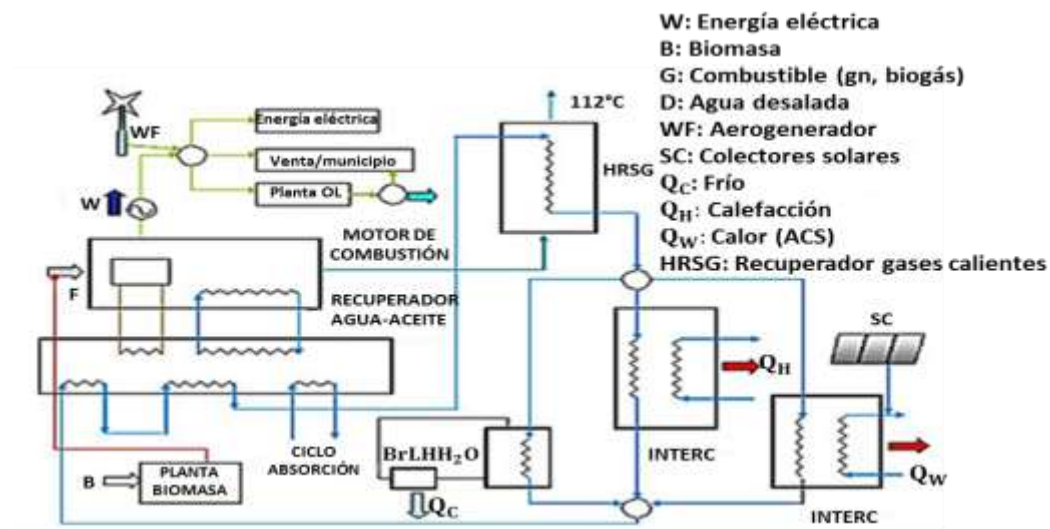
5.1.7. Caso estudio: proyecto POLIMED

En el caso del proyecto POLIMED, el concepto de poligeneración se considera en la producción combinada y simultánea de energía eléctrica, calor, frío y agua (desalada o reutilizada) para el sector turístico, que puede incluir una única fuente de energía primaria en dicho proceso integrado, o bien varias fuentes primarias (gas natural, EERR, gas a partir de biomasa, etc) [92]. La Figura 25 muestra un esquema del tipo de poligeneración utilizada.

La optimización del diseño que permite fijar la capacidad de los equipos de la instalación, es del tipo mixto entera, ya que incorpora la posibilidad de la elección de las diversas tecnologías para producir las cuatro demandas,

gracias a una serie de restricciones de operación, ahorro energético, impacto ambiental y costo que adjudican el equipo más adecuado y su tamaño óptimo. La función objetivo en este caso es de tipo económico, ya que la prioridad es obtener una rentabilidad por su instalación [92].

Figura 25. Sistema de poligeneración caso POLIMED.

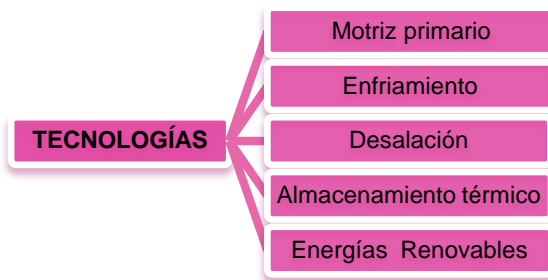


Adaptada de fuente: (http://circe.cps.unizar.es/polimed/poligeneracion/poli_caso.htm 2013).

5.1.7.1. Tecnologías del sistema de poligeneración

Las principales tecnologías de un sistema de poligeneración se muestran en la Figura 26.

Figura 26. Tecnologías utilizadas en el proyecto POLIMED.

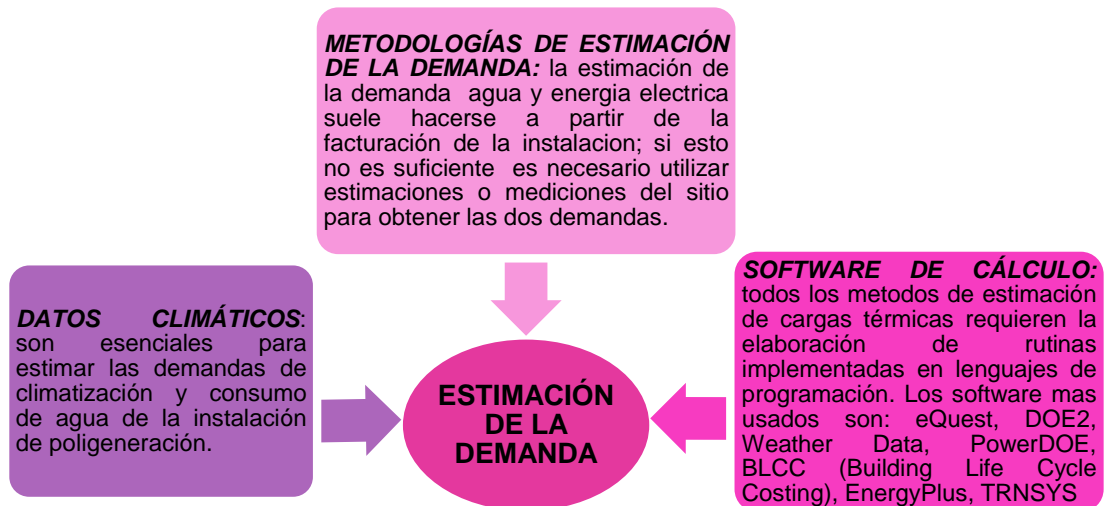


Adaptada de fuente: (http://circe.cps.unizar.es/polimed/poligeneracion/poli_caso.htm 2013).

5.1.7.2. Estimación de la demanda

Para realizar la estimación de la demanda se requiere de una serie de aspectos a tener en cuenta, los cuales harán posible la estimación de la demanda de una manera adecuada, como se observa en la Figura 27 [92].

Figura 27. Estimación de la demanda proyecto POLIMED.



Adaptada de fuente: (http://circe.cps.unizar.es/polimed/poligeneracion/poli_caso.htm 2013).

5.2. GENERACIÓN HÍBRIDA

Mediante la adición de fuentes no tradicionales de energía, como la generación de energía renovable y productos como combustibles para el transporte, los sistemas de energía híbridos son una estrategia prometedora para lograr la seguridad energética mediante la diversificación y la integración de las carteras de energía. De esta manera se pueden resolver no sólo las condiciones económicas indeseables, sino también las preocupaciones ambientales.

Los sistemas de energía híbridos se han construido para generar energía eléctrica y son llamados híbridos ya que incluyen más de una fuente de energía con el fin de cubrir una carga eléctrica determinada, normalmente cargas eléctricas de corriente alterna (CA) [99]; sin embargo, también puede alimentar cargas eléctricas en corriente continua (DC) o los dos al mismo tiempo. Combinan dos o más tecnologías de generación de energía renovable para hacer el mejor uso de sus características de funcionamiento y así obtener una mayor eficiencia a la que podría ser obtenida de una sola fuente de alimentación; esto se puede observar en la Figura 28 [100].

Figura 28. Concepto de generación híbrida.



Adaptada de fuente: (http://circe.cps.unizar.es/polimed/poligeneracion/poli_caso.htm 2013).

Es importante mencionar que las fuentes de energía se pueden dividir en dos grupos: fuentes controladas y fuentes no controladas. De acuerdo a esto,

las fuentes controladas expresan fuentes de energía primaria que dan lugar a la posibilidad de controlar la producción de energía eléctrica. Debido a que la generación de energía a partir de fuentes no controladas es impredecible e independiente de la acción humana, un sistema híbrido necesita por lo menos una fuente controlada, o en su defecto un sistema de almacenamiento o conexión a la red; de esta manera, la debilidad de algunas fuentes de energía se complementa con las fortalezas de las otras. [84]

En su mayoría, los sistemas de generación híbrida están conectados a la red eléctrica, pero también pueden trabajar de forma independiente como receptores, de uno o varios hogares, pequeñas plantas industriales y grandes comunidades locales; teniendo como objetivo principal suministrar energía a comunidades remotas aisladas, donde los costos de conexión de transmisión y distribución a larga distancia son demasiado altos [84]. Estos pueden abordar las limitaciones en términos de flexibilidad de combustible, eficiencia, fiabilidad, emisiones de contaminantes y economía [100].

Un sistema de energía híbrido podría ser integrado como se muestra en la Figura 29. En ésta, se muestra la estructura potencial de un sistema híbrido fotovoltaico-eólico-térmico para alimentar una vivienda.

Figura 29. Ejemplo de la estructura del sistema híbrido de energía.



Adaptada de la fuente: (Paska, Biczal & Klos 2009).

5.2.1. Sostenibilidad de un sistema híbrido de energía

Con el fin de reducir la contaminación y la dependencia del petróleo, una estrategia energética coordinada puede aspirar a obtener energía eléctrica a partir de fuentes de energía limpia y producir combustibles para el transporte de los recursos regionales de carbono (por ejemplo, gas natural, carbón y biomasa). Los niveles más altos de penetración de las fuentes renovables en la cartera actual de energía son tanto un objetivo deseable como un medio para alcanzar una mejor utilización de los recursos y la sostenibilidad ambiental [100].

Buscando cuantificar los criterios para la evaluación de la sostenibilidad de cualquier diseño del sistema de energía, se definen tres indicadores: económicos, medio ambientales y sociales. A este respecto, la eficiencia del uso de los recursos y el desarrollo de la tecnología son de importancia fundamental, ya que este es un enfoque a corto plazo que puede brindar beneficios en un futuro próximo. En algunos casos será necesario el ajuste social respectivo con el fin de cumplir con los requisitos de las nuevas fuentes de energía [84].

La sostenibilidad del sistema de suministro de energía no puede ser vista simplemente sobre la base de su impacto ambiental, sino que también debe tener en cuenta la necesidad de asegurar que el sistema tenga la capacidad de cumplir con los requisitos establecidos por los consumidores, no sólo en términos de potencia instalada, y disponibilidad, sino en lo más importante que es la capacidad de utilizar diferentes fuentes primarias, autóctonas e importadas [84].

5.2.2. Análisis del dimensionamiento y optimización

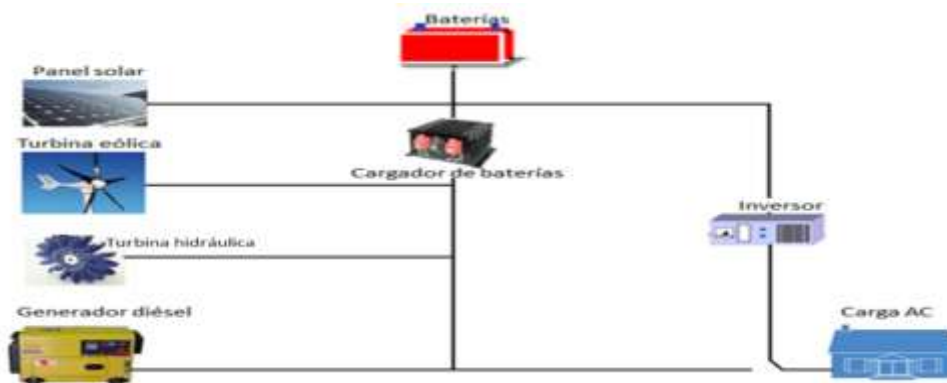
En la optimización de un sistema híbrido de energía renovable se lleva a cabo el proceso de selección de los mejores componentes y su tamaño, con la estrategia de obtener un funcionamiento adecuado para proporcionar un servicio económico, eficiente, confiable y rentable [3]. Se ha reconocido que la vida útil de los elementos y subsistemas no es igual. A este respecto, la selección óptima del ciclo de vida para los elementos y subsistemas puede dar lugar al procedimiento de adaptación que reflejará la necesidad de la aplicación del criterio sostenible [84].

Es también importante al momento de optimizar un sistema híbrido la reducción del exceso de energía para minimizar el costo de la misma. El exceso de energía se cuenta como parte del costo de producción de la energía total contra la reducción de la demanda de carga específica que significa la reducción del costo [3].

La configuración de un sistema híbrido debe ser determinada teniendo en cuenta un análisis técnico-económico que por lo general busca el menor costo del kilowatt-hora (kWh), de la energía producida por los componentes

del sistema. HOMER es un modelo de optimización híbrida para las energías renovables, que consiste en encontrar la relación óptima del costo dimensionamiento y minimizar el costo con la demanda de carga específica. Esta optimización se realiza con base de una carga teórica en una ubicación remota y los datos locales de tasa de flujo de velocidad del viento, radiación solar y agua. Una combinación híbrida, mejorará los factores de carga y ayudará a disminuir el costo de mantenimiento [3].

Figura 30. Sistema renovable de generación híbrido.



Adaptada de la fuente: (Razak 2009).

Un caso específico de un sistema híbrido se puede observar en la Figura 30. Este sistema consta de una turbina hidráulica, una turbina eólica y paneles solares fotovoltaicos (PV). Es de gran importancia observar la

inclusión de los demás elementos de respaldo y almacenamiento del sistema, los cuales ofrecen control sobre la producción de energía, estos son: el generador diésel, la batería y el inversor [3].

5.3. GENERACIÓN DISTRIBUIDA

En las últimas décadas, los avances significativos en el campo de la generación de energía a pequeña escala y el almacenamiento de energía eléctrica han implicado cambios en la manera en la que se ha llevado a cabo la generación y distribución, lo que representa un nuevo impulso a la idea de la generación distribuida (DG) [69].

No hay una definición concreta para la generación distribuida; sin embargo, la definición más destacada dentro de la literatura se refiere a la generación distribuida como "una fuente de alimentación eléctrica conectada directamente a la red de distribución o en el sitio del cliente" [101]. Es importante resaltar que el IEEE define la generación distribuida como la generación de energía eléctrica por las instalaciones que son suficientemente menores que las plantas generadoras de centrales con el fin de permitir la interconexión en casi cualquier punto en un sistema de energía [102].

La Figura 31 muestra un esquema de la generación distribuida que permite reforzar su concepto, a pesar de ser claro que las numerosas definiciones de la generación distribuida permiten una amplia gama de esquemas de generación posibles. Algunas definiciones permiten la inclusión de unidades de cogeneración a gran escala o los grandes parques eólicos conectados a la red de transporte; otros ponen el foco en las unidades de generación a pequeña escala conectadas a la red de distribución [102].

Figura 31. Representación gráfica de la generación distribuida.



Adaptada de la fuente: (http://www.escuelaendesa.com/pdf/1_introduccion_a_la_generacion_distribuida.pdf 2013).

La utilización de la generación distribuida se da principalmente cuando la red nacional y el sistema de transmisión tienen un problema y puede ser la sustitución de la red para la preparación y producción de energía eléctrica [104]. Las tecnologías adoptadas comprenden pequeñas turbinas de gas, micro-turbinas, pilas de combustible, el viento, la energía solar, la biomasa, etc. [101].

Sin embargo, cuando se utiliza la generación distribuida con presencia de las redes eléctricas, su planificación requiere la definición de varios factores, tales como: Utilización de la mejor tecnología, el número y la capacidad de las unidades, la mejor ubicación, el tipo de conexión de red, etc. Para su uso se pretende una evaluación adecuada de las características de funcionamiento del sistema, tales como las pérdidas eléctricas, perfil de la tensión, estabilidad y fiabilidad [105].

Figura 32. Comparación de Unidad central y unidad distribuida.



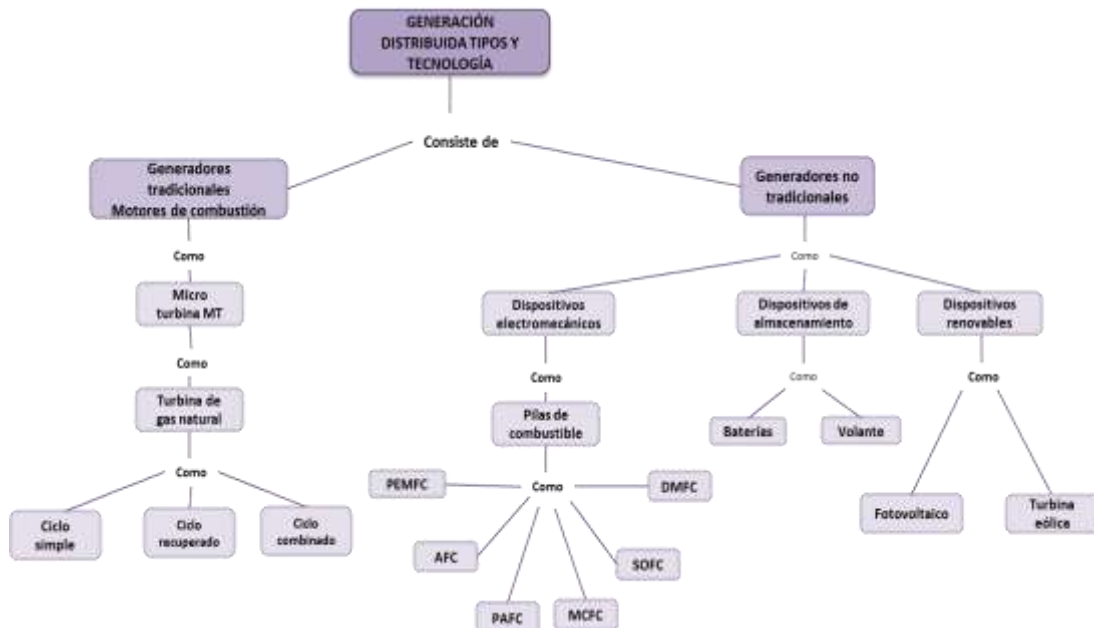
Adaptada de la fuente: (Viral & Khatod 2012).

Los críticos de las operaciones de energía eléctrica a gran escala cuestionan de la generación distribuida sus costos, las vulnerabilidades de seguridad, los impactos ambientales y los residuos en la generación y transmisión, y abogan por una industria más descentralizada compuesta por un mayor número de instalaciones de generación de menor escala y más localizada [105]. La Figura 32 muestra diferencia entre el sistema centralizado que se maneja actualmente y el sistema distribuido que se pretende manejar [101].

5.3.1. Tipos de generación distribuida

Hay diferentes tipos de DG desde los puntos de vista constructivos y tecnológicos como se muestra en la Figura 33. Estos tipos de DG deberán ser comparados entre sí para tomar la decisión con respecto a qué tipo es el más conveniente elegir en diferentes situaciones [106].

Figura 33. Tipos y tecnologías de la generación distribuida.



Adaptada de la fuente: (El-Khattam & Salama 2004).

5.3.2. Criterios de clasificación de la generación distribuida

Por lo general, la generación distribuida se clasifica en función de sus diferentes tipos y tecnologías de operación. Sin embargo, es más conveniente clasificarla desde el punto de vista eléctrico para estudiar sus efectos. Los sistemas de generación distribuida producen generalmente entre 1 kW y 5 MW, los medianos y grandes pueden producir más de 5 MW hasta 300 MW de potencia; aunque existe cierta controversia sobre si estos sistemas más grandes realmente pueden clasificarse como unidades de generación distribuida. Por lo tanto se proponen las siguientes categorías de clasificación de la DG, en la Tabla 8 [101]:

Tabla 8. Diferentes clasificaciones de la GD.

CLASIFICACION DE LA GENERACION DISTRIBUIDA	
Categorías	Valores
GD micro	1W<5kW

GD pequeño	5kW<5MW
GD medio	5MW<50MW
GD grande	50MW<300MW

Adaptada de la fuente: (Viral & Khatod 2012).

5.3.3. Ventajas y desventajas de la generación distribuida

Los beneficios más importantes de la DG incluyen la mejora de la seguridad del abastecimiento, la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, la reducción de la capacidad, la disminución de las pérdidas de energía de transporte y una mayor flexibilidad en las inversiones. En la Tabla 9 se muestran las ventajas principales otorgadas a la generación distribuida [107]:

Tabla 9. Ventajas de la generación distribuida.

VENTAJAS
Contribuye a la calidad, fiabilidad y seguridad en el suministro de energía en zonas difíciles
Reduce la cantidad de energía que debe ser transmitida reduciendo las pérdidas
Capacidad de uso pico, menores costos de operación debido a la neutralización de picos
El uso de energías renovables reduce el consumo de combustible fósil y emisión de gases de efecto invernadero

Adaptada de la fuente: (Abou, Allam, & Shatla 2010).

En cuanto a las desventajas, estas se pueden observar en la Tabla 10.

Tabla 10. Desventajas de la generación distribuida [107].

DESVENTAJAS
Desviación en la tensión y frecuencia del sistema
Cambio de flujos de energía y potencia bidireccionales
Potencia reactiva inferior
Altos armónicos

Adaptada de la fuente: (Abou, Allam & Shatla 2010).

5.3.4. Micro-red (MG)

Hoy en día el uso de sistemas de generación distribuida que utiliza una fuente de energía renovable ha experimentado un rápido desarrollo. Además, su naturaleza intrínseca intermitente se puede superar usando sistemas

híbridos que combinan más fuentes de energía [90], [108]. En el desarrollo del sector de las energías renovables, el concepto de energía sostenible y el uso de tecnologías para la generación distribuida han centrado la atención en las micro-redes [109].

La interconexión de la generación modular pequeña y el almacenamiento de energía a los sistemas de distribución de baja o media tensión forman un sistema de potencia, llamado micro-red; que se define como el modo de transmisión de energía que utiliza diferentes fuentes y la tecnología de la energía distribuida que ofrece confiabilidad eléctrica. Se compone de diferentes tipos de energía distribuida, todo tipo de carga eléctrica y/o de calor; el control y dispositivos de protección relacionados [59], [101], [87].

Las fuentes de energía en una micro-red pueden ser renovables, convencional in situ o la red eléctrica. Su funcionamiento se basa en la gestión del suministro de energía desde el control de la demanda y la generación, que permite: mitigar el impacto sobre el medio ambiente dando prioridad a la generación renovable de la generación convencional, para reducir los picos de consumo de energía de la red mediante el uso de la generación local, mejorar la eficiencia de los sistemas y aumentar la confiabilidad del suministro de energía para evitar el efecto de las interrupciones en las redes de transmisión. Además pueden satisfacer la demanda en lugares remotos donde se hace imposible la expansión de la red o no tiene justificaciones económicas [82], [111], [112].

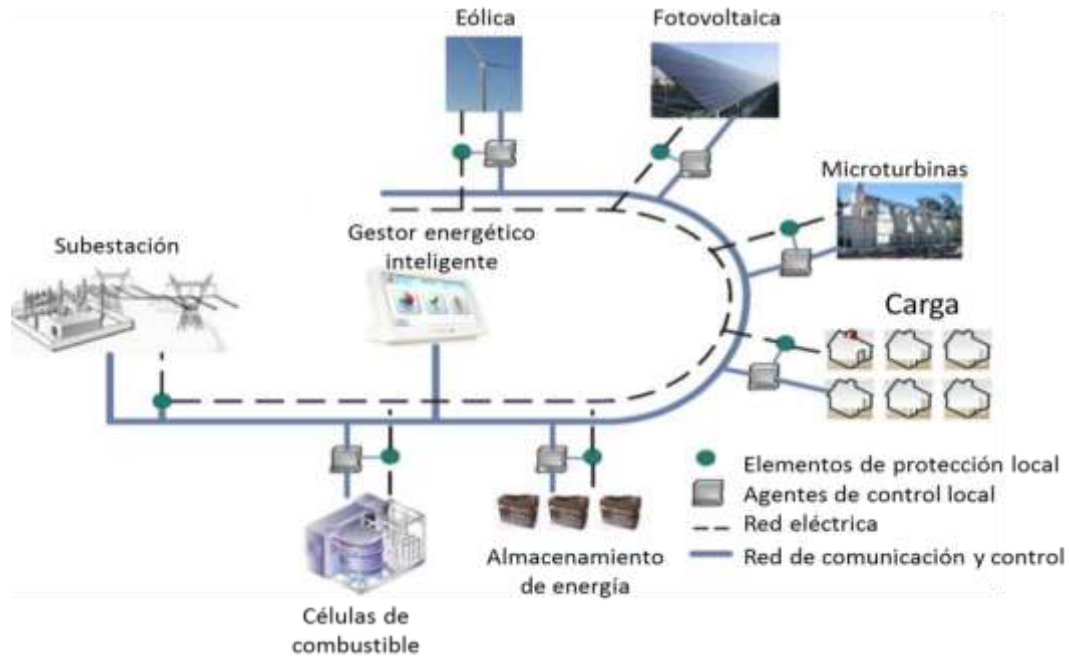
Micro-red conectada a la red / aislada

La micro-red puede operar conectada a la red y aislada. Cuando se encuentra conectada a la red significa que hay una conexión entre la micro-

red y sistema de servicios públicos, por lo tanto hay cargas de flujo entre ellos. En operación aislada significa que cuando se producen fallas en la red, la micro-red puede suministrar energía. La operación aislada mejora la fiabilidad de la fuente de alimentación, aunque tiene grandes riesgos en: Zonas aisladas fuera de control de la red, ya que la tensión y la frecuencia pueden ser inestables, lo cual puede afectar el funcionamiento y la seguridad de funcionamiento de los equipos eléctricos; en segundo lugar, la red principal se puede ver afectada al conectar la micro-red con la red principal [112], [113].

La capacidad de una micro-red ante perturbaciones por lo general es débil, lo cual se convierte en un reto para el funcionamiento aleatorio y el control de las energías renovables; por lo tanto, es necesario establecer el modelo aislado de la micro-red, para las diferentes características de las fuentes de excitación del generador diésel, el sistema de regulación y el modelo de control diferente al convertidor de almacenamiento de energía [109], [110]. En la Figura 34 se muestra una micro red basada en fuentes de energía híbrida.

Figura 34. MG basado en fuentes de energías renovables.



Adaptada de la fuente: (http://zeitgeistlab.ca/doc/Unveiling_the_Hidden_Connections_between_E-mobility_and_Smart_Microgrid.html 2013).

5.4. IMPORTANCIA DE LA IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMAS DE POLIGENERACIÓN Y GENERACIÓN HÍBRIDA EN VIS

Es importante que los usuarios de las VIS cuenten con un sistema de suministro de energía confiable y amigable con el medio ambiente, de manera que contribuya con su cuidado y sostenibilidad ayudando a reducir la emisión de los gases de efecto invernadero y la utilización de combustibles fósiles; para cumplir con estos requerimientos el recurso más óptimo es la utilización de las fuentes de energías renovables.

Para la utilización de fuentes de energías renovables en una VIS, hay que tener en cuenta que la viabilidad económica del uso de una sola fuente de energía es poco rentable ya que sobredimensiona el sistema, lo que se ve reflejado en un aumento del costo de inversión. Y es importante tener en

cuenta que como este proyecto es con aplicación, debe existir un compromiso gubernamental que asuma el costo de inversión del sistema híbrido; luego como son recursos públicos, se desea buscar un manejo eficiente a partir de un planteamiento multiobjetivo que incluya la optimización de costos en su implementación.

La generación híbrida ahorraría (en muchas ocasiones) la conexión a la red ya que supliría los picos bajos de generación de un tipo de fuente con otras existentes gracias a las condiciones climáticas aleatorias. Al utilizar sistemas híbridos se reduce el costo de inversión en el sistema de una fuente alternativa, además del ahorro sustancial en el costo mensual de la factura de energía; condiciones deseables para el sistema.

Es de gran importancia darle el máximo potencial de utilización a los recursos naturales del medio ambiente, los cuales pueden contribuir a suplir además de la energía eléctrica, otras necesidades como el consumo de calefacción y/o refrigeración dependiendo de las condiciones de ubicación y construcción de la vivienda. Para suplir estas necesidades un sistema de poligeneración es la forma más viable de aprovechamiento de los beneficios de cada recurso, los cuales además de tener costo bajo, contribuyen al desarrollo sostenible.

La implementación del sistema de poligeneración tiene dependencia del tipo de energías renovables utilizadas para su implementación, rescatando de ellas los productos y/o energías utilizables. Para este caso particular, de las cinco fuentes de energías seleccionadas, tres de ellas solo aportan al sistema energía eléctrica (eólica, solar fotovoltaica y *pedal power*), por lo tanto si el sistema implementado solo cuenta con estas, no sería poligeneración sino generación híbrida. Las energías como solar térmica y

biomasa, ofrecen a la vivienda la obtención de otros productos utilizables que presenta mejora en los impactos ambiental y social de la comunidad beneficiada.

6. GENERALIDADES SOBRE LA OPTIMIZACIÓN EN SISTEMAS DE POLIGENERACIÓN

La mejora de las tecnologías de sistemas de energía renovable ayuda a solucionar varios problemas ambientales y contribuye al desarrollo sostenible. A pesar de esto, presenta inconvenientes importantes (como el costo relativamente alto de los componentes y las dificultades en el logro de una viabilidad económica, especialmente en perfiles de carga irregulares; el funcionamiento intermitente de las unidades o los grandes períodos con solicitudes de baja energía, la inestabilidad de las fuentes y necesidad de un sistema de almacenamiento y/o control, etc.), que requieren complejos métodos de optimización de diseño, planificación y control [12], [76], [115].

Por lo mencionado anteriormente, los algoritmos de optimización constituyen una herramienta adecuada para la solución de problemas complejos en este campo; y haciendo alusión a las principales limitaciones para una amplia difusión de los sistemas de poligeneración, la comunidad científica ha centrado esfuerzos en el desarrollo de principios heurísticos o normas de "buenas prácticas" y algoritmos para identificar el diseño óptimo (o casi óptimo) y estrategias de operación para la poligeneración [12], [76], [115].

Dentro de estos algoritmos, se deben considerar la vulnerabilidad (protección y seguridad de energía), el impacto ambiental, los problemas de sostenibilidad y las limitaciones de recursos de los sistemas de energía, lo que requiere la optimización simultánea de varios factores; y como resultado de ello, la optimización multiobjetivo de los sistemas de energía se ha convertido en una rica área de estudio [76], [115].

En este capítulo se presentan las generalidades para el planteamiento del problema multiobjetivo de optimización; se identifican las técnicas determinísticas y metaheurísticas más utilizadas actualmente en sistemas de poligeneración, exhibiendo casos empleados según publicaciones científicas, que serán de gran utilidad para la posterior implementación de un sistema de poligeneración en sitio para viviendas de interés social.

6.1. DEFINICIÓN Y GENERALIDADES DE LA OPTIMIZACIÓN

En matemáticas, la optimización es la disciplina que permite buscar las entradas de una función que minimicen o maximicen su valor, considerando en algunos casos restricciones de las variables. La optimización computacional se puede definir como el proceso de diseño, implementación y pruebas de algoritmos para resolver una gran variedad de problemas; incluye las disciplinas de las matemáticas para formular modelos, la investigación de operaciones para modelar el sistema, la informática para el diseño y análisis de algoritmos, y la ingeniería de software para implementar el modelo [115].

A pesar de su nombre, la optimización no significa necesariamente la búsqueda de la solución óptima a un problema, ya que puede ser inviable debido a sus características. Por otro lado, debe tenerse en cuenta que hasta la fecha los métodos de optimización computacionales se han centrado en la solución de problemas de un solo objetivo, incluidas las limitaciones en algunos casos. Sin embargo, existen un gran número de aplicaciones que requieren la optimización simultánea de varios objetivos que a menudo están en conflicto, y por lo que algunos autores han propuesto algoritmos multiobjetivo [115].

Estos enfoques multiobjetivo a menudo se dividen en dos categorías principales: Funciones de adición de peso y métodos de optimización basados en Pareto. Las funciones de adición consisten en la combinación de todos los objetivos para optimizar en una única función matemática, donde la importancia relativa de cada objetivo se ajusta de acuerdo a unos pesos relativos.

A pesar de su simplicidad, este enfoque tiene varios inconvenientes, tales como que es muy difícil de ajustar los pesos de los objetivos para optimizar, especialmente cuando tienen diferentes escalas. Además, este método sólo devuelve una única solución, como resultado del proceso de búsqueda, el cual se convierte en una limitación importante en el proceso de toma de decisiones, donde se debe seleccionar una solución entre varias alternativas [115].

Por su parte, la optimización multiobjetivo de Pareto se ha utilizado para optimizar los sistemas de energía teniendo en cuenta aspectos del mismo que ayudan a encontrar un conjunto no dominante de soluciones a considerarse en el proceso de toma de decisiones [20], [76]. En este enfoque, un “tomador de decisiones” es considerado quien desea optimizar muchos objetivos que no pueden ser medidos y no se tiene una relación clara de uno con otro [116].

Dado un problema de optimización multiobjetivo con $K \geq 2$ objetivos para optimizar, en lugar de dar un valor escalar a la función objetivo $f_1 \dots K(s)$ de la solución s , se define una orden parcial de acuerdo con las relaciones de dominancia de Pareto. Se dice que la solución de s_1 domina a una s_2 cuando s_1 es mejor que s_2 en al menos un objetivo, y no es peor en los otros; que son indiferentes cuando hay dominio de una sobre otra; y que una solución

es un óptimo de Pareto si no está dominada por ninguna otra solución [115]. El conjunto de todas las soluciones no dominadas factibles en espacio de solución se denomina conjunto óptimo de Pareto (que usualmente consigue no una solución sino varias) [115], [116].

El objetivo final de un algoritmo de optimización multiobjetivo es identificar soluciones en el conjunto óptimo de Pareto. Sin embargo, la identificación de todo el conjunto óptimo de Pareto, para muchos problemas multiobjetivo, es prácticamente imposible debido a su tamaño. Por lo tanto, un enfoque práctico para la optimización multiobjetivo es investigar un conjunto de soluciones (el más conocido conjunto Pareto) que represente el conjunto Pareto óptimo. Para muchos problemas, el número de soluciones óptimas de Pareto es enorme (puede ser infinito) [116].

6.1.1. CONOCIMIENTO DE LAS VARIABLES

Los recientes esfuerzos de los investigadores han sido orientados a desarrollar un conocimiento completo que se refiere a las complejas interacciones entre un amplio conjunto de variables que comprenden [12]:

Variables de decisión: Planta de disposición, el diseño y estrategia de operación.

Variables contextuales: Disposiciones normativas, la estructura arancelaria y los precios de la energía, los mecanismos de apoyo, la eficiencia de referencia para el "sistema de producción independiente" alternativa (entendida como el sistema "tradicional" que se compara con la planta de poligeneración para evaluar su potencial en términos de energía, el ahorro y la reducción de las emisiones de contaminantes).

Variables del lado del cliente: Perfiles de carga de energía, la distancia entre los edificios que se sirve con calor, frío y energía eléctrica, posibilidad de conectar los edificios por la red de distribución de agua caliente, etc.

Un conocimiento profundo de las interacciones complejas entre las variables mencionadas anteriormente podría permitir a los analistas de energía identificar rápidamente las soluciones más prometedoras y maximizar los beneficios económicos, energéticos o medioambientales [12].

6.1.2. OPTIMIZACIÓN DE UN PROBLEMA MULTIOBJETIVO

Las dificultades para hacer la poligeneración a pequeña escala viable tiene diversas naturalezas: La volatilidad arancelaria, la dinámica de la legislación en las etapas iniciales del mercado de la energía libre y el comportamiento no determinista de la demanda interna de energía. Asimismo, la rentabilidad de los sistemas de poligeneración depende de: La planta disponible en gran medida, el tamaño de los componentes, la estrategia de gestión, la eficacia del sistema de control y los costos de la energía, que es la razón por la que la optimización a pequeña escala no es un asunto trivial y ha sido ampliamente investigado en la adopción de diferentes enfoques [117].

La elección de una función objetivo adecuada es compleja. La principal dificultad consiste en encontrar un buen compromiso entre el diseño de la planta con fines de lucro, que se puede determinar basándose en la tasa interna de retorno (TIR), el valor actual neto (VAN) o la recuperación de la inversión de tiempo (PT), y un diseño orientado a maximizar el beneficio social, es decir, el ahorro de energía primaria o la reducción de las emisiones contaminantes [117].

Por lo tanto, la necesidad de una función de decisión multiobjetivo o una optimización con restricciones (limitaciones expresadas por el ahorro de energía mínimo que deben ser evaluadas en el sistema favorable con medio ambiente) es evidente.

6.1.3. PROBLEMAS DE OPTIMIZACIÓN EN LOS SISTEMAS HÍBRIDOS

Debido a los costos de inversión importantes para la creación de una estructura de energía renovable, un interés primordial desde el punto de vista de la planificación y diseño a largo plazo de los sistemas de energía es seleccionar la mejor alternativa entre las diferentes fuentes de energía renovable [76], [115], [20].

Un diseño de un sistema híbrido de energía se compone principalmente de dos fases: La selección de la configuración óptima y la estrategia de operación del sistema. Los métodos heurísticos probabilísticos, iterativos se han propuesto para minimizar el costo del ciclo de vida. Opiniones recientes sobre la optimización de los sistemas de energías renovables muestran que los métodos heurísticos son cada vez más populares, especialmente para los casos en que se requiere la evaluación multicriterio [20], [76].

La importancia de la utilización de nuevas técnicas de optimización para la planificación de energía a corto plazo se debe a la existencia de múltiples incertidumbres. Los problemas de planificación de energía son problemas complejos con múltiples criterios y decisiones a tomar [115].

6.2. TÉCNICAS METAHEURÍSTICAS

Los métodos heurísticos pueden ser vistos como procedimientos simples que proporcionan una solución satisfactoria, pero no necesariamente óptima, a grandes casos de problemas complejos en los que otros métodos de optimización no han podido ser eficaces o eficientes. Las metaheurísticas son generalizaciones de la heurística que se pueden aplicar a una amplia serie de problemas, necesitando pocas modificaciones para adaptarse a un caso específico. En efecto, el prefijo griego "meta", se utiliza para indicar que estos algoritmos son heurística "de nivel más alto", en contraste con la heurística de problemas específicos [115], [118].

La ventaja práctica se encuentra en su eficacia y aplicabilidad general [119]. El enfoque para resolver un problema es empezar por obtener una solución inicial o un conjunto inicial de soluciones y, a continuación, iniciar una búsqueda de la mejora guiado por ciertos principios [115], [118], [119].

Uno de los principales argumentos a favor de metaheurísticas siempre ha sido su generalidad. De hecho, estas se aplican generalmente a los problemas que no cuentan con un algoritmo satisfactorio para un problema específico. En principio, estas técnicas pueden aplicarse a cualquier problema de optimización combinatoria. Sin embargo, en los últimos años el foco de muchas de estas aplicaciones se ha desplazado hacia el rendimiento, a costa de perder generalidad [115], [120].

Casi todas las metaheurísticas comparten las siguientes características: son inspiradas en la naturaleza (basado en algunos principios de la física, la biología o la etología), hacen uso de componentes estocásticos (que

involucran variables aleatorias), tienen varios parámetros que deben ser instalados en el problema en cuestión. El desarrollo considerable de las metaheurísticas se puede explicar por el aumento significativo de la potencia de procesamiento de los ordenadores, y el desarrollo de arquitecturas masivamente paralelas [118], [119].

La investigación para problemas de optimización combinatoria ha experimentado últimamente un cambio significativo hacia la hibridación de metaheurísticas con otras técnicas de optimización. Al mismo tiempo, el foco de la investigación ha cambiado de ser más orientado al algoritmo, a ser más orientado a los problemas [120]. Son métodos ampliamente utilizados para resolver problemas complejos en la industria y los servicios, en áreas que van desde las finanzas a la gestión de la producción y la ingeniería [118].

6.2.1. Clasificación de los métodos metaheurísticos

Se pueden utilizar muchos criterios para la clasificación de las técnicas metaheurísticas. Considerando la clasificación en términos de sus características por la ruta de búsqueda que siguen, el uso de la memoria, el tipo de exploración de zona utilizada o del número de las soluciones actuales realizadas de una iteración a la siguiente. La clasificación se distingue entre metaheurísticas basadas en una trayectoria y basadas en la población [115], [118]. Esta clasificación se presenta a continuación:

- Los algoritmos metaheurísticos de trayectoria son los que utilizan una única solución durante el proceso de búsqueda y el resultado es también una única solución optimizada. Las técnicas metaheurísticas basadas en una única solución son principalmente: La colina escalada HC (*Hill Climbing*), el recocido simulado AS (*Simulated Annealing*), la búsqueda

tabú TS (*Tabu Search*), los procedimientos de búsqueda adaptativa aleatorios codiciosos (GRASP), la búsqueda de vecindades variable VNS (*Variables Neighborhoods Search*), la búsqueda local iterativa ILS (*Iterative Local Search*) [115], [118].

- Los algoritmos metaheurísticos basados en la población utilizan una cantidad de soluciones iniciales que evolucionan durante un determinado número de iteraciones, también entregan una cantidad de soluciones en la condición de parada. Los algoritmos principales de esta clasificación son: Los algoritmos genéticos GA (*Genetic Algorithms*) y evolutivos EA (*Evolutionary Algorithms*), la búsqueda de dispersión SS (*Scatter Search*), los algoritmos meméticos MA (*Memetic Algorithms*), optimización de colonias de hormigas ACO (*Ant Colony Optimization*), el enjambre de partículas de optimización PSO (*Particle Swarm Optimization*), la estimación del algoritmo de distribución EDA (*Estimating Distribution Algorithm*), la evolución diferencial DE (*Differential Evolution*); y optimización de colonias abeja artificial ABCO (*Artificial Bee Colonies Optimizing*) [115], [118].

Un gran número de metaheurísticas multiobjetivo se han presentado en las últimas décadas y también se pueden clasificar en las categorías de métodos de trayectorias y métodos basados en la población. Los métodos de trayectoria incluyen: La estrategia de Pareto archivada evolución (*Pareto Archived Evolution Strategy*), el recocido simulado multiobjetivo MOSA (*Multiobjective Simulated Annealing*), etc. Las metaheurísticas son: La búsqueda tabú multiobjetivo MOTS (*Multiobjective Tabu Search*), el algoritmo genético de clasificación no dominado NSGA / NSGA -II (*Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm*), el Pareto recocido simulado PSA (*Pareto*

Simulated Annealing), el algoritmo genético frente único AGPA (*Single Front Genetic Algorithm*), la fuerza algoritmo evolutivo Pareto SPEA/SPEA2 (*Strength Pareto Evolutionary Algorithm/2*); y Pareto envolvente basado en algoritmo de selección PESA / PESA-II (*Pareto Envelope-based Selection Algorithm/-II*) [115].

6.2.2. Algoritmos metaheurísticos

Los algoritmos metaheurísticos aproximados para la optimización no se expresan específicamente para un problema particular. La elección de una combinación adecuada de conceptos algorítmicos complementarios puede ser clave para lograr el máximo rendimiento en la solución de muchos problemas de optimización. Desafortunadamente, el desarrollo de un enfoque híbrido eficaz es, en general, una tarea difícil que requiere conocimientos de diferentes áreas de optimización; además es trivial generalizar; es decir, una cierta combinación puede funcionar bien para problemas específicos, pero podría funcionar mal para los demás [120].

Las técnicas Metaheurísticas se han establecido como uno de los enfoques más prácticos para la optimización de la simulación. Sin embargo, estos métodos están diseñados generalmente para la optimización combinatoria, y sus implementaciones no siempre lo hacen adecuadamente debido a la presencia de ruido en la simulación. La investigación en la optimización de la simulación, por otro lado, se ha centrado en algoritmos convergentes, dando lugar a una brecha entre la investigación y la práctica.

En la práctica, la simulación, la elección y el diseño de un algoritmo siempre se reduce a la eficiencia computacional. Por lo tanto el rápido progreso de la búsqueda y la solución inicial tiene prioridad sobre las

posibles declaraciones de convergencia y la obtención demostrable de un óptimo global no suele ser un problema importante. Si bien esto es ciertamente una postura razonable en la práctica, una consecuencia de este punto de vista puede ser que la simulación tiene un papel subordinado a la optimización.

6.3. TÉCNICAS DETERMINÍSTICAS

Los métodos determinísticos son aquellos en los cuales el estado inicial determina el estado final de las variables. Estos buscan y garantizan un óptimo local y a comparación de los métodos metaheurísticos tienen mecanismos específicos para alcanzar su óptimo global aunque no garantizan su alcance [121].

Los algoritmos de diseño estructural óptimos dan la herramienta a un diseñador para determinar la topología y geometría óptima. En algunos problemas de diseño las variables pueden tener valores continuos; sin embargo, en algunos otros se requiere que los valores de las variables de diseño sean seleccionados a partir de un conjunto de valores discretos, como los algoritmos de diseño estructural óptimo que se basan en estas técnicas en la búsqueda de soluciones a los problemas de programación discretos. La obtención de soluciones a los problemas de programación discretos es más difícil que encontrar soluciones a problemas de programación con variables continuas [122].

Esta puede ser una de las razones por la que las técnicas de programación matemática desarrolladas han tratado con variables continuas. Algunos de estos algoritmos se han ampliado para hacer frente a los problemas de optimización discreta. Los algoritmos que se basan en técnicas

de programación matemática deterministas necesitan un punto de diseño inicial para comenzar una búsqueda de la solución óptima y requieren cálculos gradiente en el proceso de exploración [122].

6.3.1. Clasificación de los métodos determinísticos

Dentro de los métodos determinísticos se encuentran las optimizaciones: Lineal, no lineal, estocástica y dinámica, entre otras. Los problemas se identifican por el carácter de funciones que intervienen (lineales o no lineales) y de las variables (reales /continuas o enteras /discretas) [121].

Los problemas lineales con variables enteras se pueden clasificar en: programación entera pura si todas las variables son enteras, programación entera binaria si todas son binarias y programación lineal entera mixta si algunas son enteras o binarias y el resto continuas [121].

6.3.2. Aspectos generales de los métodos determinísticos

Un sistema no lineal se define como el desarrollo de modelos estructurales utilizando mediciones dinámicas en la presencia de no linealidades. Los métodos de identificación de sistemas no lineales se clasifican en siete categorías: Los métodos de dominio de tiempo, los métodos de dominio de la frecuencia, los métodos tiempo-frecuencia, métodos de no linealidad de derivación mediante linealización, los métodos modales, los métodos de la caja negra, y el modelo estructural [123].

Al formular los problemas de diseño y de funcionamiento como problemas de optimización típicos, como la programación no lineal o problemas de programación mixtos no lineales enteros, la integración de todo el proceso se estudia de manera sistemática y todas las variables de diseño operacionales

son optimizadas para alcanzar el mejor rendimiento económico o más bajas emisiones contaminantes. Los algoritmos de optimización globales se pueden aplicar con el fin de garantizar soluciones óptimas globales para estos problemas [124].

Los modelos deterministas clásicos proporcionan predicciones globales satisfactorias para muchas aplicaciones industriales. Sin embargo, cuando se está interesado en un comportamiento o una cantidad muy localizada o entran en juego fenómenos multiescala, estos modelos pueden no ser suficientes. Por lo tanto, se han propuesto métodos estocásticos que parecen inevitables en el modelado multiescala [125].

Aunque el uso de modelos y métodos estocásticos se ha expandido rápidamente en los últimos decenios, los costos numéricos correspondientes siguen siendo a menudo prohibitivos. Por lo tanto, la aplicación de estos métodos en un contexto complejo o industrial sigue siendo limitada. Por lo tanto, un importante campo de investigación se refiere a la reducción de los costos asociados con el uso de métodos estocásticos [125].

6.4. TÉCNICAS DETERMINÍSTICAS Y METAHEURÍSTICAS EN SISTEMAS DE POLIGENERACIÓN

A continuación, en las Tablas 11 y 12 se presenta una recopilación de técnicas de optimización metaheurísticas y determinísticas, más utilizadas en los sistemas de poligeneración según revisiones científicas de bases de datos de revistas del IEEE y de ELSEVIER.

Tabla 11. Técnicas metaheurísticas utilizadas en sistemas de poligeneración.

CASO	REF	AÑO	ALCANCE	TÉCNICA
Optimización de un sistema de poligeneración descentralizada basada en la prestación de servicios de una oficina en un edificio en Tokio	[126]	2005	Se propone un sistema descentralizado, la combinación de una pila de combustible de óxido sólido (SOFC) con dos enfriadores de absorción y un intercambiador de calor. Con el fin de minimizar las emisiones de CO ₂ y calcular los costos asociados, se realiza una optimización de dos niveles. En el primer nivel los parámetros de diseño del sistema se optimizan mediante el uso de un algoritmo evolutivo, y en el segundo nivel se optimiza el funcionamiento diario óptimo del sistema mediante un algoritmo de programación lineal.	Algoritmo evolutivo y programación lineal
Un sistema de gestión de energía de la lógica difusa para micro-redes poligeneración	[127]	2011	El diseño se realizó a través de la simulación de un sistema de gestión energética de lógica difusa (FLEMS) para una micro-red de poligeneración autónoma. En esta micro-red la energía es producida por la energía fotovoltaica, una turbina eólica y el resto de los componentes incluyen un banco de baterías, una membrana de intercambio de protones de célula de combustible, un electrolizador, un tanque de hidruro de metal y una unidad de desalinización por ósmosis inversa utilizando energía recuperación. La micro-red cubre las necesidades de energía eléctrica, transporte y agua. Los productos son la energía, el hidrógeno como combustible para el transporte y el agua potable a través de la desalinización.	Lógica difusa
Micro redes de Poligeneración: Una solución viable en áreas remotas para el suministro de energía eléctrica, agua potable y el hidrógeno como combustible para el transporte	[128]	2011	Se presenta el diseño de un sistema, que luego se evalúa y se compara con las opciones alternativas para cubrir las necesidades de energía eléctrica, agua y combustible para dos casas en una zona remota.	Optimización de Enjambre de Partículas con TRNSYS, GenOpt y TRNOPT.
Optimización multiobjetivo de exergía basada en un sistema de energía de poligeneración mediante un algoritmo evolutivo	[129]	2012	Un modelado termodinámico global y la optimización de un sistema de poligeneración de energía para la producción simultánea de calor, frío, energía eléctrica y agua caliente a partir de una fuente de energía común. Un método de optimización multiobjetivo sobre la base de un algoritmo evolutivo se aplica para determinar los mejores parámetros de diseño para el sistema. Las dos funciones objetivo utilizadas en el análisis son: La tasa de costo total del sistema, (que es el costo asociado con el combustible), la compra de componentes, el impacto ambiental, y la eficiencia del sistema de exergía.	Optimización algoritmo evolutivo
Un marco de un algoritmo genético multiobjetivo para la coproducción de energía eléctrica / hidrógeno	[130]	2009	Consiste en el desarrollo de una metodología de optimización de los sistemas de cogeneración de hidrógeno y energía eléctrica, en lo que respecta a las restricciones de energía, la economía y la coyuntura en términos de demanda. En este trabajo se describen los distintos pasos de la metodología técnico-económica para la cogeneración de H ₂ y los sistemas de energía eléctrica.	Algoritmo genético
Optimización multiobjetivo de una planta de trigeneración	[131]	2009	Un método de optimización multiobjetivo se ha desarrollado para el diseño de plantas de trigeneración. La optimización se lleva a cabo con los indicadores técnicos, económicos, energéticos y medioambientales de rendimiento en un marco de optimización multiobjetivo. Tanto la construcción (tamaños de equipos) y las variables discretas operacionales (planes de tarifas de precios y estrategia operativa) se han optimizado en base a las condiciones reales. El problema se resuelve utilizando un algoritmo evolutivo multiobjetivo.	Algoritmo evolutivo

Fuente: Autoras

Tabla 12. Técnicas determinísticas utilizadas en sistemas de poligeneración.

CASO	REF.	AÑO	ALCANCE	TECNICA
Un enfoque de optimización entera mixta para el diseño de sistemas de poligeneración energética	[132]	2008	Un modelo de programación no lineal entera mixta (MINLP) se desarrolló para la optimización del diseño de los sistemas de energía de poligeneración. Una superestructura adecuada se introdujo, a partir de partición de un sistema general de energía poligeneración en cuatro grandes bloques, para cada una de las tecnologías disponibles alternativas y tipos de equipos considerados. Un detallado estudio de caso, que implica una planta de poligeneración basada en el carbón, la producción de energía eléctrica y el metanol, se presenta para demostrar las características y aplicabilidad del enfoque propuesto.	Programación no lineal entera mixta
Método predictivo de gestión óptima para el control de los sistemas de poligeneración	[133]	2009	Un sistema de control predictivo óptimo para la micro-cogeneración en aplicaciones domésticas se ha desarrollado. Este sistema tiene como objetivo integrar el comportamiento estocástico y las condiciones meteorológicas, así como imprecisiones de modelado, así como la definición de estrategias de operación que maximizan la eficiencia del sistema teniendo en cuenta el rendimiento, la capacidad de almacenamiento y las oportunidades del mercado eléctrico.	Programación entera mixta y lineal
Ubicación óptima de las refinerías de etanol de lignocelulosa con poligeneración en Suecia	[134]	2009	Un modelo de balance de energía se ha utilizado para generar datos para la producción de etanol, energía eléctrica, calor y el biogás. Un modelo de optimización se ha utilizado para determinar las ubicaciones óptimas para dichas plantas en Suecia. El suministro de energía y toda la cadena de la demanda de conexión de salida de la biomasa a las estaciones de llenado de gas se incluyen en la optimización. Los parámetros de entrada han sido estudiados por su influencia tanto en el coste final de etanol y las ubicaciones óptimas de las plantas.	Programación lineal entera mixta
La optimización del diseño de una planta de poligeneración alimentada por gas natural y las energías renovables	[91]	2010	Un procedimiento sistemático para seleccionar y dimensionar una planta de poligeneración alimentada por gas natural, energía solar y biomasa gasificada es presentado. El procedimiento propuesto se basa en la definición de la superestructura, que contiene lista de posibles configuraciones para una planta de poligeneración que produce simultáneamente energía eléctrica, calor, frío y agua dulce. En base a esa superestructura, se desarrolló un modelo de programación matemática y se aplica a un centro turístico español. Tres aspectos clave han sido optimizados en el problema de programación matemática: El ahorro de energía, la reducción de emisiones gases de efecto invernadero y la viabilidad económica.	Programación lineal entera mixta
Modelado y optimización de los sistemas de poligeneración	[135]	2007	El modelo del caso estudio se centra en la planificación de las inversiones de los sistemas energéticos de poligeneración co-producción de metanol y la energía eléctrica en China entre 2010 y 2035. Hay disponibilidad de cuatro materias primas: el carbón, el gas natural nacional e importado y la biomasa. Un conjunto de 12 tecnologías han sido seleccionadas, y se compone de todos los posibles caminos alternativos para la transformación de estas materias primas de energía primaria en productos finales. Fuera de las tecnologías seleccionadas, seis son las vías de diagramas de flujo de poligeneración, mientras que los seis restantes son tecnologías de síntesis de metanol convencionales.	Programación entera mixta

Evaluación de un sistema de bioenergía regional con la producción local de biocombustibles para el transporte, integrada con una planta de cogeneración	[136]	2011	El sistema de caso estudio incluye la producción de etanol, biogás, calor y energía eléctrica a base de cereales disponibles a nivel local. Un modelo ha sido desarrollado para la optimización de costes del suministro de combustible para el transporte regional (etanol, biogás y gasolina), por medio de la programación entera mixta (MIP). El modelo se aplica para los dos casos, cuando una planta de producción de etanol está integrado con una planta de cogeneración existente (poligeneración), y uno con una planta de producción de etanol independiente.	Programación entera mixta
Una herramienta para el diseño y operación eficiente de la energía en micro-redes de poligeneración basado en un grupo de edificios.	[12]	2012	Este caso se presenta en dos partes, una herramienta científica para la optimización del diseño y operación de plantas de poligeneración complejas en edificios con obtención de calefacción, refrigeración y energía eléctrica. El método es flexible con respecto a las condiciones de frontera en lo que respecta al intercambio de energía con la red pública, la estructura arancelaria y las restricciones normativas. En la primera se describe el método para llamar la atención sobre los aspectos más conceptuales. El algoritmo de programación lineal entera mixta se presenta y análisis de error se realiza para cada una de las figuras adoptadas, con el fin de evaluar la robustez del método. En la Parte II, la herramienta se aplica ampliamente para algunos estudios de casos explicativos, con el fin de aclarar mejor su potencial en el apoyo a analistas de energía y tomadores de decisiones.	Programación lineal entera mixta
Métodos para la inversión multiobjetivo y la optimización operativa de sistemas complejos de energía	[137]	2012	<p>En este estudio, se explica primero un multi-período de optimización del sistema de energía, un modelo con una función objetivo mono. El modelo se desarrolla a continuación, en una perspectiva de optimización multiobjetivo que genera sistemáticamente un buen conjunto de soluciones mediante el uso de restricciones de corte enteros y el algoritmo de restricción. Estos dos métodos son discutidos y comparados.</p> <p>En el siguiente paso, el modelo se reformula como un modelo de optimización multiobjetivo con un algoritmo evolutivo. En este paso, el modelo se descompone en maestro y esclavo.</p> <p>Finalmente los modelos desarrollados se demuestran por medio de un estudio de caso que comprende seis tipos de tecnologías de conversión, es decir, una bomba de calor, una caldera, la energía fotovoltaica, así como una turbina, pilas de combustible de gas y motores de gas.</p>	<p>Programación lineal entera mixta</p> <p>Algoritmo evolutivo</p>

Fuente: Autoras

En cuanto a las técnicas determinísticas identificadas en los anteriores casos estudio de poligeneración, se puede observar que los métodos de programación lineal entera mixta, son los más utilizados; en cuanto a los metaheurísticos, los algoritmos evolutivos son los que tienen mayor aplicabilidad. Por lo tanto, se sugiere que el proyecto posterior encargado de la implementación del sistema de poligeneración en viviendas de interés social, tenga en cuenta estos métodos para la optimización del problema multiobjetivo.

Además, es importante resaltar que en las Tablas 6.1 y 6.2 se encuentra información relevante del caso, junto con su respectiva referencia y año de publicación; esto, con el objetivo que se realice un estudio a fondo de cada uno de ellos y sirva como guía para el proceso a ser implementado.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo se exponen las conclusiones más relevantes obtenidas durante la realización del trabajo de investigación y se proponen algunas recomendaciones para la realización de trabajos posteriores en esta línea de investigación.

7.1. CONCLUSIONES

Después de la investigación realizada para analizar la viabilidad de la implementación de fuentes de energías renovables en viviendas de interés social, se llegó a la conclusión que los aspectos técnicos más influyentes son: la demanda de la vivienda, la ubicación, las condiciones climáticas, el diseño de la vivienda, la calidad de los materiales de construcción y el efecto de sombreado; para esto, se ha tenido en cuenta la normatividad que rige las VIS (viviendas de interés social) en la ciudad de Bucaramanga y la información encontrada (ver referencias [1], [12], [13]).

La viabilidad de las fuentes de energías renovables depende de factores como condiciones atmosféricas del lugar, aspectos de construcción de la vivienda y los costos de inversión. Las fuentes de generación seleccionadas

para la optimización del sistema de poligeneración según un análisis comparativo de criterios establecidos para aplicación a pequeña escala, fueron: eólica, solar térmico y fotovoltaico, biomasa y *pedal power*. Sin embargo, las fuentes de energía mini-hidráulica, mareomotriz y geotérmica se descartaron debido a la limitación de recursos y los requerimientos para la generación; a pesar de sus beneficios con el medio ambiente.

Los modelos matemáticos de cada una de las fuentes investigadas describen el comportamiento de generación de cada sistema, permitiendo su utilización en el proceso de optimización. Se infirió que los criterios establecidos de cada sistema de generación son apropiados para la selección de un modelo matemático de una fuente de generación renovable, dado que en la literatura consultada en las publicaciones científicas de las bases de datos IEEE y ELSEVIER se manejaron tales criterios como variables pertinentes.

Con respecto a lo anterior, para el sistema *pedal power* los criterios establecidos fueron características de la bicicleta, torque, fuerza de la persona y características del generador; para la eólica fueron las características de la turbina eólica, el factor de capacidad de la turbina y la magnitud de la velocidad del viento; criterios como la radiación solar y el área de los paneles y colectores fueron establecidos para solar fotovoltaica y solar térmica respectivamente; además de incluir en fotovoltaica la característica corriente-tensión de la célula y en térmica, la capacidad de calentamiento y/o enfriamiento y capacidad de almacenamiento. Es pertinente mencionar que para el sistema de biomasa no se encontró un modelo apropiado en términos de potencia, ya que los encontrados en su mayoría son modelos bioquímicos que no cumplen con los criterios establecidos para este modelo.

Se concluyó que la implementación del sistema de poligeneración tiene dependencia del tipo de energías renovables utilizadas, rescatando de ellas los productos y/o energías generadas. De las cinco fuentes de energías seleccionadas, tres de ellas (eólica, solar fotovoltaica y *pedal power*) aportan al sistema solo energía obteniendo así un sistema de generación híbrida y no de poligeneración. A través de las investigaciones realizadas se determinó que productos como calefacción, refrigeración y biogas pueden ser obtenidos de las fuentes de generación solar térmica y biomasa, ofreciendo a la vivienda mejora en los impactos ambiental y social de la comunidad beneficiada.

En el proceso de búsqueda e identificación de las técnicas de optimización más utilizadas en casos de sistemas de poligeneración, se obtuvo como resultado para las de tipo metaheurístico: algoritmo evolutivo, lógica difusa, enjambre de partículas y algoritmo genético; en cuanto a las determinísticas se encontraron la programación no lineal entera mixta, programación lineal entera mixta, programación entera mixta y programación lineal entera mixta con algoritmo evolutivo.

Finalmente, se puede considerar que la realización de este trabajo fue de gran utilidad para el crecimiento personal de cada una de las autoras apoyadas en la sensibilización con las personas en adversidad, rescatando el interés en las fuentes de energías renovables como beneficio para un planeta sostenible y como apoyo a las personas con menos ingresos económicos. Los impactos ambiental, social y económico que promete la implementación de un sistema de poligeneración conllevan a grandes beneficios para el desarrollo del país.

7.2. RECOMENDACIONES

Algunas recomendaciones que las autoras del proyecto de grado consideran pertinentes son:

Es importante promover la implementación de los sistemas de poligeneración en las viviendas de interés social, ya que por medio de este se generan ventajas medio ambientales y económicas; beneficiando principalmente a los usuarios de escasos recursos que hagan uso de ellas.

Para el desarrollo de este tipo de proyectos, es fundamental que el gobierno nacional subsidie la mayor parte de los costos de inversión del sistema de poligeneración apoyado en los beneficios que obtendrán los usuarios de escasos recursos económicos de este tipo de soluciones tecnológicas.

Finalmente, se recomienda a las personas interesadas en obtener más información sobre el diseño de las viviendas de interés social, consultar los aspectos relacionados con la ubicación y parámetros concernientes a la construcción de éstas en el documento “CALIDAD EN LAS VIVIENDAS DE INTERÉS SOCIAL [1]”, el cual brinda aspectos importantes para obtener un diseño adecuado que contribuirá a la implementación óptima de sistemas de poligeneración.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Colombia. Ministerio de Ambiente Vivienda y desarrollo territorial, “Calidad en la Vivienda de Interés Social (Guías de Asistencia Técnica para Vivienda de Interés Social, No. 1),” Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2011.
- [2] H. Serrano Méndez, C. López Cabrera, and M. Iturrale Vinent, “Introducción al conocimiento del MEDIO AMBIENTE,” p. 32.
- [3] J. A. Razak, “Optimization of PV-Wind-Hydro-Diesel Hybrid System by Minimizing Excess Capacity,” vol. 25, no. 4, pp. 663–671, 2009.
- [4] G. Kyriakarakos, D. D. Piromalis, A. I. Dounis, K. G. Arvanitis, and G. Papadakis, “Intelligent demand side energy management system for autonomous polygeneration microgrids,” *Applied Energy*, vol. 103, pp. 39–51, Mar. 2013.
- [5] L. M. Serra, M.-A. Lozano, J. Ramos, A. V. Ensinas, and S. a. Nebra, “Polygeneration and efficient use of natural resources,” *Energy*, vol. 34, no. 5, pp. 575–586, May 2009.
- [6] T. Grupo, “Todo sobre construcción sostenible,” *Página CONSTRUIBLE.ES*, 2012. [Online]. Available: <http://www.construible.es/noticiasDetalle.aspx?c=10>.
- [7] “WorldGBC 3.” [Online]. Available: <http://www.worldgbc.org/>. [Accessed: 05-Jun-2013].
- [8] Facultad de Artes. Universidad Nacional. UPME, “Diseño y socialización de la propuesta de reglamento técnico para eficiencia

energética para viviendas de interés social. RETEVIS.” Seminario internacional – Eficiencia energética en edificaciones, 2011.

- [9] Ministerio de ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, *Las normas aplicables para el desarrollo de vivienda de interes social*. Colombia: , 2011, p. 46.
- [10] Concejo de Bucaramanga, *Acuerdo 049 28 de Diciembre 2012*. 2012, p. 4.
- [11] “Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.” [Online]. Available: <http://www.minambiente.gov.co/portal/default.aspx>. [Accessed: 15-Apr-2013].
- [12] A. Piacentino, C. Barbaro, F. Cardona, R. Gallea, and E. Cardona, “A comprehensive tool for efficient design and operation of polygeneration-based energy μ grids serving a cluster of buildings. Part I: Description of the method,” *Applied Energy*, pp. 1–18, Feb. 2013.
- [13] H. Yang, L. Lu, and W. Zhou, “A novel optimization sizing model for hybrid solar-wind power generation system,” vol. 81, pp. 76–84, 2007.
- [14] R. K. Akikur, R. Saidur, H. W. Ping, and K. R. Ullah, “Comparative study of stand-alone and hybrid solar energy systems suitable for off-grid rural electrification: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 27, pp. 738–752, Nov. 2013.
- [15] I. K. Kapdan and F. Kargi, “Bio-hydrogen production from waste materials,” *Enzyme and Microbial Technology*, vol. 38, no. 5, pp. 569–582, Mar. 2006.
- [16] T. Abbasi and S. a. Abbasi, “Biomass energy and the environmental impacts associated with its production and utilization,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 3, pp. 919–937, Apr. 2010.
- [17] D. Akroum-Amrouche, N. Abdi, H. Lounici, and N. Mameri, “Effect of physico-chemical parameters on biohydrogen production and growth characteristics by batch culture of *Rhodobacter sphaeroides* CIP 60.6,” *Applied Energy*, vol. 88, no. 6, pp. 2130–2135, Jun. 2011.

- [18] S. Essalaimeh, a. Al-Salaymeh, and Y. Abdullat, "Electrical production for domestic and industrial applications using hybrid PV-wind system," *Energy Conversion and Management*, vol. 65, pp. 736–743, Jan. 2013.
- [19] E. S. Sreeraj, K. Chatterjee, and S. Bandyopadhyay, "Design of isolated renewable hybrid power systems," *Solar Energy*, vol. 84, no. 7, pp. 1124–1136, Jul. 2010.
- [20] O. Erdinc and M. Uzunoglu, "Optimum design of hybrid renewable energy systems: Overview of different approaches," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 3, pp. 1412–1425, Apr. 2012.
- [21] W. T. Chong, M. S. Naghavi, S. C. Poh, T. M. I. Mahlia, and K. C. Pan, "Techno-economic analysis of a wind–solar hybrid renewable energy system with rainwater collection feature for urban high-rise application," *Applied Energy*, vol. 88, no. 11, pp. 4067–4077, Nov. 2011.
- [22] D. Torres Lobera and S. Valkealahti, "Dynamic thermal model of solar PV systems under varying climatic conditions," *Solar Energy*, vol. 93, pp. 183–194, Jul. 2013.
- [23] K. J. Kontoleon, "Dynamic thermal circuit modelling with distribution of internal solar radiation on varying façade orientations," *Energy and Buildings*, vol. 47, pp. 139–150, Apr. 2012.
- [24] M. K. Deshmukh and S. S. Deshmukh, "Modeling of hybrid renewable energy systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12, no. 1, pp. 235–249, Jan. 2008.
- [25] O. Erdinc and M. Uzunoglu, "A new perspective in optimum sizing of hybrid renewable energy systems: Consideration of component performance degradation issue," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 37, no. 14, pp. 10479–10488, Jul. 2012.
- [26] A. M. Cabello Quinones, "SOLUCIÓN PARA EL DESARROLLO SUSTENTABLE," vol. I, p. 48, 2006.
- [27] Gobierno Federal Estados Unidos Mexicanos, "Prospectiva Energías Renovables 2012-2026," 2012. [Online]. Available: http://www.sener.gob.mx/res/PE_y_DT/pub/2012/PER_2012-2026.pdf. [Accessed: 12-Jun-2012].

- [28] ARIAE; Comisión Nacional de Energía, “Coste y eficiencia de las energías renovables,” 2009. [Online]. Available: http://www.ariae.org/download/reuniones/xiii_reunion_ariae/pdf16.pdf. [Accessed: 12-Jun-2013].
- [29] A. A. Bazmi and G. Zahedi, “Sustainable energy systems: Role of optimization modeling techniques in power generation and supply—A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 8, pp. 3480–3500, Oct. 2011.
- [30] P. V. Rao, S. S. Baral, R. Dey, and S. Mutnuri, “Biogas generation potential by anaerobic digestion for sustainable energy development in India,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 7, pp. 2086–2094, Sep. 2010.
- [31] “De los detritus al biogás y la electricidad.” [Online]. Available: <http://www.fisica.uh.cu/bibvirtual/vidaytierra/Detritus-biogas/Detritus-biogas-electricidad.htm>. [Accessed: 21-Jul-2013].
- [32] H. J. Alves, C. Bley Junior, R. R. Niklevicz, E. P. Frigo, M. S. Frigo, and C. H. Coimbra-Araújo, “Overview of hydrogen production technologies from biogas and the applications in fuel cells,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 38, no. 13, pp. 5215–5225, May 2013.
- [33] S. Lansing, R. B. Botero, and J. F. Martin, “Waste treatment and biogas quality in small-scale agricultural digesters,” *Bioresource technology*, vol. 99, no. 13, pp. 5881–90, Sep. 2008.
- [34] D. D. Papadias, S. Ahmed, and R. Kumar, “Fuel quality issues with biogas energy – An economic analysis for a stationary fuel cell system,” *Energy*, vol. 44, no. 1, pp. 257–277, Aug. 2012.
- [35] a. a. Trendewicz and R. J. Braun, “Techno-economic analysis of solid oxide fuel cell-based combined heat and power systems for biogas utilization at wastewater treatment facilities,” *Journal of Power Sources*, vol. 233, pp. 380–393, Jul. 2013.
- [36] J. Brouwer, “On the role of fuel cells and hydrogen in a more sustainable and renewable energy future,” *Current Applied Physics*, vol. 10, no. 2, pp. S9–S17, Mar. 2010.

- [37] “Capstone Turbine Corporation Solutions Resource Recovery Biogas.” [Online]. Available: <http://www.capstoneturbine.com/prodsol/solutions/rrbiogas.asp>. [Accessed: 20-Jul-2013].
- [38] M. Poschl, S. Ward, and P. Owende, “Evaluation of energy efficiency of various biogas production and utilization.pdf.” p. 17, 2010.
- [39] S. C. Bhattacharya and P. A. Salam, “Low greenhouse gas biomass options for cooking in the developing countries,” vol. 22, pp. 305–317, 2002.
- [40] T. Bond and M. R. Templeton, “History and future of domestic biogas plants in the developing world,” *Energy for Sustainable Development*, vol. 15, no. 4, pp. 347–354, Dec. 2011.
- [41] S. D. Pohekar, D. Kumar, and M. Ramachandran, “Dissemination of cooking energy alternatives in India—a review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 9, no. 4, pp. 379–393, Aug. 2005.
- [42] P. S. Tiwari, L. P. Gite, M. M. Pandey, and a. K. Shrivastava, “Pedal power for occupational activities: Effect of power output and pedalling rate on physiological responses,” *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 41, no. 3, pp. 261–267, May 2011.
- [43] A. Osorio, “Generador eléctrico accionado por fuerza humana: una nueva alternativa de generación de energía,” p. 3, 2007.
- [44] M.-H. Wang and Y.-T. Su, “Using extension method for health analysis system of a fitness device,” *Expert Systems with Applications*, vol. 39, no. 17, pp. 12833–12840, Dec. 2012.
- [45] R. K. Megalingam, “Pedalite: Lighting Up Lives in Un-electrified Villages,” pp. 12–17, 2012.
- [46] K. Kaygusuz, “Energy for sustainable development: A case of developing countries,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 2, pp. 1116–1126, Feb. 2012.
- [47] C. F. Núñez and J. O. Flórez, *ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE BICICLETAS*. 2011, p. 77.

- [48] B. T. Gibson, "Turning sweat into watts," no. July, 2011.
- [49] a Sahin, "Progress and recent trends in wind energy," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 30, no. 5, pp. 501–543, 2004.
- [50] G. BoroumandJazi, B. Rismanchi, and R. Saidur, "Technical characteristic analysis of wind energy conversion systems for sustainable development," *Energy Conversion and Management*, vol. 69, pp. 87–94, May 2013.
- [51] E. Sesto and C. Casale, "Exploitation of wind as an energy source to meet the world's electricity demand," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 74–76, pp. 375–387, Apr. 1998.
- [52] M. G. Simo, *INTEGRATION OF ALTERNATIVE SOURCES*.
- [53] C. Novoa and T. Jin, "Reliability centered planning for distributed generation considering wind power volatility," *Electric Power Systems Research*, vol. 81, no. 8, pp. 1654–1661, Aug. 2011.
- [54] F. Dincer, "The analysis on wind energy electricity generation status, potential and policies in the world," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 9, pp. 5135–5142, Dec. 2011.
- [55] C. Stathopoulos, A. Kaperoni, G. Galanis, and G. Kallos, "Wind power prediction based on numerical and statistical models," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 112, pp. 25–38, Jan. 2013.
- [56] G. K. Singh, "Solar power generation by PV (photovoltaic) technology: A review," *Energy*, vol. 53, pp. 1–13, Mar. 2013.
- [57] F. Cucchiella and I. D'Adamo, "Estimation of the energetic and environmental impacts of a roof-mounted building-integrated photovoltaic systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 7, pp. 5245–5259, Sep. 2012.
- [58] "Definición y cálculo de sistemas solares fotovoltaicos aislados autónomos." [Online]. Available: <http://www.sfe-solar.com/calculo-sistemas-fotovoltaicos-aislados-autonomos/>. [Accessed: 20-Jul-2013].

- [59] F. Cucchiella, I. D'Adamo, M. Gastaldi, and S. C. L. Koh, "Renewable energy options for buildings: Performance evaluations of integrated photovoltaic systems," *Energy and Buildings*, vol. 55, pp. 208–217, Dec. 2012.
- [60] S. Kuravi, J. Trahan, D. Y. Goswami, M. M. Rahman, and E. K. Stefanakos, "Thermal energy storage technologies and systems for concentrating solar power plants," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 39, no. 4, pp. 285–319, Aug. 2013.
- [61] C. Fan, L. Zhang, and L. Cui, "The Status and Development of Trough Solar Thermal Power System," *2012 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, pp. 1–4, Mar. 2012.
- [62] M. A. Hasan and K. Sumathy, "Photovoltaic thermal module concepts and their performance analysis: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 7, pp. 1845–1859, Sep. 2010.
- [63] Y. Tripanagnostopoulos, "Aspects and improvements of hybrid photovoltaic/thermal solar energy systems," *Solar Energy*, vol. 81, no. 9, pp. 1117–1131, Sep. 2007.
- [64] UPME, "FORMULACIÓN DE UN PROGRAMA BÁSICO DE NORMALIZACIÓN PARA APLICACIONES DE ENERGÍAS ALTERNATIVAS Y DIFUSIÓN," pp. 1–47, 2003.
- [65] N. A. Rodriguez Miranda, "Estudio de factibilidad técnica y financiera de utilización de biomasa para suplir necesidades energéticas en el edificio Bienestar Universitario," Universidad Industrial de Santander, 2010.
- [66] Aeolos Wind Turbine, "Aeolos Wind Turbine 10kw Specification." [Online]. Available: <http://www.windturbinestar.com/10kwh-aeolos-wind-turbine.html>. [Accessed: 18-Aug-2013].
- [67] Allsmallturbines, "All Small Wind Turbines Portal." [Online]. Available: <http://www.allsmallwindturbines.com/>. [Accessed: 18-Aug-2013].
- [68] "Hopefull Wind energy technology." [Online]. Available: <http://www.hopefulenergy.com/category/horizontal-axis-wind-turbine.html>. [Accessed: 18-Aug-2013].

- [69] ZED factory ltd, "Micro-Generation Small Scale Energy production," pp. 1–12.
- [70] K. Christensen and Nordic Folkecenter for renewable energy, "Catalogue of Small Wind Turbines 2012," p. 72, 2012.
- [71] PRESEID SOLAR, "Solar PV module catalog," p. 6.
- [72] TAGEX and TASOL, "Catálogo de Energía Solar Térmica," pp. 1–21.
- [73] "SunMaxx Product Documents - Solar Thermal Manufacturer Solar Hot Water & Heating Manufacturer." .
- [74] FAGOR, "ENERGÍA SOLAR TÉRMICA," 2009.
- [75] ALTERNATE ENERGY TECHNOLOGIES LLC, "SOLAR THERMAL CATALOG WORLD CLASS SOLAR PRODUCTS FOR THE," 2005.
- [76] a. T. D. Perera, R. a. Attalage, K. K. C. K. Perera, and V. P. C. Dassanayake, "A hybrid tool to combine multi-objective optimization and multi-criterion decision making in designing standalone hybrid energy systems," *Applied Energy*, vol. 107, pp. 412–425, Jul. 2013.
- [77] S. Yılmaz and H. Selim, "A review on the methods for biomass to energy conversion systems design," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 25, pp. 420–430, Sep. 2013.
- [78] P. Zamparo, A. Minetti, and P. di Prampero, "Mechanical efficiency of cycling with a new developed pedal-crank.," *Journal of biomechanics*, vol. 35, no. 10, pp. 1387–98, Oct. 2002.
- [79] H. Dagdougui, R. Minciardi, A. Ouammi, M. Robba, and R. Sacile, "Modeling and optimization of a hybrid system for the energy supply of a 'Green' building," *Energy Conversion and Management*, vol. 64, pp. 351–363, Dec. 2012.
- [80] S. Ashok, "Optimised model for community-based hybrid energy system," *Renewable Energy*, vol. 32, no. 7, pp. 1155–1164, Jun. 2007.
- [81] M. Mohammadi, S. H. Hosseinian, and G. B. Gharehpetian, "Optimization of hybrid solar energy sources/wind turbine systems integrated to utility grids as microgrid (MG) under pool/bilateral/hybrid

- electricity market using PSO,” *Solar Energy*, vol. 86, no. 1, pp. 112–125, Jan. 2012.
- [82] “SICEL 2013,” 2013. [Online]. Available: <http://sichel.org/index.php>. [Accessed: 22-Jul-2013].
- [83] S. C. Lee, “Numerical estimation model of energy conversion for small hybrid solar–wind system,” *Solar Energy*, vol. 86, no. 11, pp. 3125–3136, Nov. 2012.
- [84] J. Paska, P. Biczal, and M. Kłos, “Hybrid power systems – An effective way of utilising primary energy sources,” *Renewable Energy*, vol. 34, no. 11, pp. 2414–2421, Nov. 2009.
- [85] C. Rubio Maya, “Producción combinada de electricidad, calor, frío y agua, de forma sostenible en el sector,” Universidad de Zaragoza, 2009.
- [86] F. He, P. Liu, Z. Li, and W. Ni, “Integrating low steam demand CO shift process to coal based polygeneration energy systems: Process design and analysis,” *Energy*, vol. 45, no. 1, pp. 169–175, Sep. 2012.
- [87] P. Gangadharan, A. Zanwar, K. Zheng, J. Gossage, and H. H. Lou, “Sustainability assessment of polygeneration processes based on syngas derived from coal and natural gas,” *Computers & Chemical Engineering*, vol. 39, pp. 105–117, Apr. 2012.
- [88] H. Perez-blanco, P. State, and R. Bldg, “EFFICIENCIES OF CONVERSION PATHS FOR RENEWABLES,” pp. 137–154.
- [89] D. Österreicher and O. Pol, “CONCERTO INITIATIVE AND POLYGENERATION,” pp. 39–54.
- [90] A. Coronas, “POLIGENERACIÓN Y GENERACIÓN DISTRIBUIDA,” in *El mix de generación de energía eléctrica en España en el horizonte 2030*, 2008, pp. 1–37.
- [91] C. Rubio-Maya, J. Uche-Marcuello, A. Martínez-Gracia, and A. a. Bayod-Rújula, “Design optimization of a polygeneration plant fuelled by natural gas and renewable energy sources,” *Applied Energy*, vol. 88, no. 2, pp. 449–457, Feb. 2011.

- [92] CIRCEE, “Información sobre el proyecto POLIMED.” [Online]. Available: http://circe.cps.unizar.es/polimed/poligeneracion/poli_caso.htm. [Accessed: 28-Apr-2013].
- [93] G. Chicco and P. Mancarella, “Matrix modelling of small-scale trigeneration systems and application to operational optimization,” *Energy*, vol. 34, no. 3, pp. 261–273, Mar. 2009.
- [94] J.-J. Wang, Y.-Y. Jing, C.-F. Zhang, G.-H. Shi, and X.-T. Zhang, “A fuzzy multi-criteria decision-making model for trigeneration system,” *Energy Policy*, vol. 36, no. 10, pp. 3823–3832, Oct. 2008.
- [95] “COGENERATION / COMBINED HEAT AND POWER (CHP).” [Online]. Available: <http://www.c2es.org/technology/factsheet/CogenerationCHP>. [Accessed: 15-Jul-2013].
- [96] “Cogeneración,” 2010. [Online]. Available: <http://edu-energia.wikispaces.com/Cogeneraci%C3%B3n>. [Accessed: 11-May-2013].
- [97] G. Chicco and P. Mancarella, “Assessment of the greenhouse gas emissions from cogeneration and trigeneration systems. Part I: Models and indicators,” *Energy*, vol. 33, no. 3, pp. 410–417, Mar. 2008.
- [98] “INFORTEL Comunicaciones EFICIENCIA ENERGÉTICA.” [Online]. Available: <http://www.infortel.es/eficiencia.htm>. [Accessed: 11-May-2013].
- [99] R. Luna-Rubio, M. Trejo-Perea, D. Vargas-Vázquez, and G. J. Ríos-Moreno, “Optimal sizing of renewable hybrids energy systems: A review of methodologies,” *Solar Energy*, vol. 86, no. 4, pp. 1077–1088, Apr. 2012.
- [100] P. Bajpai and V. Dash, “Hybrid renewable energy systems for power generation in stand-alone applications: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 5, pp. 2926–2939, Jun. 2012.
- [101] R. Viral and D. K. Khatod, “Optimal planning of distributed generation systems in distribution system: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 7, pp. 5146–5165, Sep. 2012.

- [102] G. Pepermans, J. Driesen, D. Haeseldonckx, R. Belmans, and W. D'haeseleer, "Distributed generation: definition, benefits and issues," *Energy Policy*, vol. 33, no. 6, pp. 787–798, Apr. 2005.
- [103] ISOTROL and ENDESA, "Introducción a la Generación Distribuida," 2012. [Online]. Available: http://www.escuelaendesa.com/pdf/1_introduccion_a_la_generacion_distribuida.pdf. [Accessed: 12-Apr-2013].
- [104] N. Manteghi and M. J. H. Jahromi, "Propose a model to choose best project by AHP in distributed generation," *Procedia Technology*, vol. 1, pp. 481–484, Jan. 2012.
- [105] S. Carley, "Distributed generation: An empirical analysis of primary motivators," *Energy Policy*, vol. 37, no. 5, pp. 1648–1659, May 2009.
- [106] W. El-Khattam and M. M. . Salama, "Distributed generation technologies, definitions and benefits," *Electric Power Systems Research*, vol. 71, no. 2, pp. 119–128, Oct. 2004.
- [107] a. a. Abou El-Ela, S. M. Allam, and M. M. Shatla, "Maximal optimal benefits of distributed generation using genetic algorithms," *Electric Power Systems Research*, vol. 80, no. 7, pp. 869–877, Jul. 2010.
- [108] M. S. Carmeli, F. Castelli-Dezza, M. Mauri, G. Marchegiani, and D. Rosati, "Control strategies and configurations of hybrid distributed generation systems," *Renewable Energy*, vol. 41, pp. 294–305, May 2012.
- [109] S. Bracco, F. Delfino, F. Pampararo, M. Robba, and M. Rossi, "The University of Genoa smart polygeneration microgrid test-bed facility: The overall system, the technologies and the research challenges," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 18, pp. 442–459, Feb. 2013.
- [110] C. Rouyi and W. Ke, "Research on simulations and model of the isolated Wind-Solar-Diesel-Battery hybrid micro-grid," *2012 China International Conference on Electricity Distribution*, no. Ciced, pp. 1–4, Sep. 2012.

- [111] M. Shahidehpour, "High reliability distribution systems in microgrids," *2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, pp. 1–1, Jul. 2011.
- [112] S. Conti, "Protection Issues and State of the Art for Microgrids with Inverter-Interfaced Distributed Generators," pp. 643–647, 2011.
- [113] Z. Dongmei, Z. Nan, and L. Yanhua, "Micro-grid connected/islanding operation based on wind and PV hybrid power system," *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies*, pp. 1–6, May 2012.
- [114] "Unveiling the Hidden Connections between E-mobility and Smart Microgrid - Optical Zeitgeist Laboratory." [Online]. Available: http://zeitgeistlab.ca/doc/Unveiling_the_Hidden_Connections_between_E-mobility_and_Smart_Microgrid.html. [Accessed: 03-Jun-2013].
- [115] R. Baños, F. Manzano-Agugliaro, F. G. Montoya, C. Gil, a. Alcayde, and J. Gómez, "Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 4, pp. 1753–1766, May 2011.
- [116] M. Fadaee and M. a. M. Radzi, "Multi-objective optimization of a stand-alone hybrid renewable energy system by using evolutionary algorithms: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 5, pp. 3364–3369, Jun. 2012.
- [117] a. Piacentino and F. Cardona, "An original multi-objective criterion for the design of small-scale polygeneration systems based on realistic operating conditions," *Applied Thermal Engineering*, vol. 28, no. 17–18, pp. 2391–2404, Dec. 2008.
- [118] I. Boussaïd, J. Lepagnot, and P. Siarry, "A survey on optimization metaheuristics," *Information Sciences*, vol. 237, pp. 82–117, Jul. 2013.
- [119] S. Ólafsson, "Metaheuristics," vol. 13, no. 06, pp. 633–654, 2006.
- [120] C. Blum, J. Puchinger, G. R. Raidl, and A. Roli, "Hybrid metaheuristics in combinatorial optimization: A survey," *Applied Soft Computing*, vol. 11, no. 6, pp. 4135–4151, Sep. 2011.
- [121] P. Sánchez and P. Linares, "Modelos matemáticos de optimización," 2010.

- [122] O. Hasançebi, S. Çarbaş, E. Doğan, F. Erdal, and M. P. Saka, "Comparison of non-deterministic search techniques in the optimum design of real size steel frames," *Computers & Structures*, vol. 88, no. 17–18, pp. 1033–1048, Sep. 2010.
- [123] B. Moaveni and E. Asgariéh, "Deterministic-stochastic subspace identification method for identification of nonlinear structures as time-varying linear systems," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 31, pp. 40–55, Aug. 2012.
- [124] Y. Chen, "Optimal Design and Operation of Energy Polygeneration Systems by," 2013.
- [125] R. Cottereau, D. Clouteau, H. Ben Dhia, and C. Zaccardi, "A stochastic-deterministic coupling method for continuum mechanics," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 200, no. 47–48, pp. 3280–3288, Nov. 2011.
- [126] C. Weber, F. Maréchal, D. Favrat, and S. Kraines, "Optimization of an SOFC-based decentralized polygeneration system for providing energy services in an office-building in Tōkyō," *Applied Thermal Engineering*, vol. 26, no. 13, pp. 1409–1419, Sep. 2006.
- [127] G. Kyriakarakos, A. I. Dounis, K. G. Arvanitis, and G. Papadakis, "A fuzzy logic energy management system for polygeneration microgrids," *Renewable Energy*, vol. 41, pp. 315–327, May 2012.
- [128] G. Kyriakarakos, A. I. Dounis, S. Rozakis, K. G. Arvanitis, and G. Papadakis, "Polygeneration microgrids: A viable solution in remote areas for supplying power, potable water and hydrogen as transportation fuel," *Applied Energy*, vol. 88, no. 12, pp. 4517–4526, Dec. 2011.
- [129] P. Ahmadi, M. a. Rosen, and I. Dincer, "Multi-objective exergy-based optimization of a polygeneration energy system using an evolutionary algorithm," *Energy*, vol. 46, no. 1, pp. 21–31, Oct. 2012.
- [130] A. Gomez, C. Azzaro-pantel, and L. Pibouleau, "A MultiObjective Genetic Algorithm Framework for Electricity / Hydrogen Co-Production From Generation IV Nuclear Energy Systems," pp. 1263–1268, 2009.

- [131] K. C. Kavvadias and Z. B. Maroulis, "Multi-objective optimization of a trigeneration plant," *Energy Policy*, vol. 38, no. 2, pp. 945–954, Feb. 2010.
- [132] P. Liu, E. N. Pistikopoulos, and Z. Li, "A mixed-integer optimization approach for polygeneration energy systems design," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 33, no. 3, pp. 759–768, Mar. 2009.
- [133] A. Collazos, F. Maréchal, and C. Gähler, "Predictive optimal management method for the control of polygeneration systems," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 33, no. 10, pp. 1584–1592, Oct. 2009.
- [134] S. Leduc, F. Starfelt, E. Dotzauer, G. Kindermann, I. McCallum, M. Obersteiner, and J. Lundgren, "Optimal location of lignocellulosic ethanol refineries with polygeneration in Sweden," *Energy*, vol. 35, no. 6, pp. 2709–2716, Jun. 2010.
- [135] P. Liu, D. I. Gerogiorgis, and E. N. Pistikopoulos, "Modeling and optimization of polygeneration energy systems," *Catalysis Today*, vol. 127, no. 1–4, pp. 347–359, 2007.
- [136] L. Daianova, E. Dotzauer, E. Thorin, and J. Yan, "Evaluation of a regional bioenergy system with local production of biofuel for transportation, integrated with a CHP plant," *Applied Energy*, vol. 92, pp. 739–749, Apr. 2012.
- [137] S. Fazlollahi, P. Mandel, G. Becker, and F. Maréchal, "Methods for multi-objective investment and operating optimization of complex energy systems," *Energy*, vol. 45, no. 1, pp. 12–22, Sep. 2012.
- [138] A. R. Mechtenberg, K. Borchers, E. W. Miyingo, F. Hormasji, A. Hariharan, J. V. Makanda, and M. K. Musaazi, "Human power (HP) as a viable electricity portfolio option below 20W/Capita," *Energy for Sustainable Development*, vol. 16, no. 2, pp. 125–145, Jun. 2012.
- [139] M. Martín Monroy, *Manual del aire*, III. Islas Canarias: Manuales de diseno ICARO, 2006, p. 108.
- [140] M. R. Islam, S. Mekhilef, and R. Saidur, "Progress and recent trends of wind energy technology," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 21, pp. 456–468, May 2013.

- [141] J.-Y. Kim, G.-Y. Jeon, and W.-H. Hong, "The performance and economical analysis of grid-connected photovoltaic systems in Daegu, Korea," *Applied Energy*, vol. 86, no. 2, pp. 265–272, Feb. 2009.
- [142] A. Fernández-Infantes, J. Contreras, and J. L. Bernal-Agustín, "Design of grid connected PV systems considering electrical, economical and environmental aspects: A practical case," *Renewable Energy*, vol. 31, no. 13, pp. 2042–2062, Oct. 2006.
- [143] C.-C. Chen, H.-C. Chang, C.-C. Kuo, and C.-C. Lin, "Programmable energy source emulator for photovoltaic panels considering partial shadow effect," *Energy*, vol. 54, pp. 174–183, Jun. 2013.
- [144] B. Parida, S. Iniyana, and R. Goic, "A review of solar photovoltaic technologies," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 3, pp. 1625–1636, Apr. 2011.
- [145] A. a. Al-Abidi, S. Bin Mat, K. Sopian, M. Y. Sulaiman, C. H. Lim, and A. Th, "Review of thermal energy storage for air conditioning systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 8, pp. 5802–5819, Oct. 2012.
- [146] A. Sharma, V. V. Tyagi, C. R. Chen, and D. Buddhi, "Review on thermal energy storage with phase change materials and applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, no. 2, pp. 318–345, Feb. 2009.
- [147] V. Morisson, M. Rady, E. Palomo, and E. Arquis, "Thermal energy storage systems for electricity production using solar energy direct steam generation technology," *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, vol. 47, no. 3, pp. 499–507, Mar. 2008.
- [148] N. Amrizal, D. Chemisana, and J. I. Rosell, "Hybrid photovoltaic – thermal solar collectors dynamic modeling," *Applied Energy*, vol. 101, pp. 797–807, 2013.
- [149] A. N. Celik, "Energy output estimation for small-scale wind power generators using Weibull-representative wind data," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 91, no. 5, pp. 693–707, Apr. 2003.

- [150] O. Ekren, B. Y. Ekren, and B. Ozerdem, "Break-even analysis and size optimization of a PV/wind hybrid energy conversion system with battery storage – A case study," *Applied Energy*, vol. 86, no. 7–8, pp. 1043–1054, Jul. 2009.
- [151] A. Gomez, L. Pibouleau, C. Azzaro-Pantel, S. Domenech, C. Latgé, and D. Haubensack, "Multiobjective genetic algorithm strategies for electricity production from generation IV nuclear technology," *Energy Conversion and Management*, vol. 51, no. 4, pp. 859–871, Apr. 2010.

BIBLIOGRAFÍA

- A. a. Abou El-Ela, S. M. Allam, and M. M. Shatla, "Maximal optimal benefits of distributed generation using genetic algorithms," *Electric Power Systems Research*, vol. 80, no. 7, pp. 869–877, Jul. 2010.
- A. A. Bazmi and G. Zahedi, "Sustainable energy systems: Role of optimization modeling techniques in power generation and supply—A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 8, pp. 3480–3500, Oct. 2011.
- A. a. Trendewicz and R. J. Braun, "Techno-economic analysis of solid oxide fuel cell-based combined heat and power systems for biogas utilization at wastewater treatment facilities," *Journal of Power Sources*, vol. 233, pp. 380–393, Jul. 2013.
- A. a. Al-Abidi, S. Bin Mat, K. Sopian, M. Y. Sulaiman, C. H. Lim, and A. Th, "Review of thermal energy storage for air conditioning systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 8, pp. 5802–5819, Oct. 2012.
- A. Collazos, F. Maréchal, and C. Gähler, "Predictive optimal management method for the control of polygeneration systems," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 33, no. 10, pp. 1584–1592, Oct. 2009.
- A. Coronas, "POLIGENERACIÓN Y GENERACIÓN DISTRIBUIDA," in *El mix de generación de energía eléctrica en España en el horizonte 2030*, 2008, pp. 1–37.

- A. Fernández-Infantes, J. Contreras, and J. L. Bernal-Agustín, "Design of grid connected PV systems considering electrical, economical and environmental aspects: A practical case," *Renewable Energy*, vol. 31, no. 13, pp. 2042–2062, Oct. 2006.
- A. Gomez, C. Azzaro-pantel, and L. Pibouleau, "A MultiObjective Genetic Algorithm Framework for Electricity / Hydrogen Co-Production From Generation IV Nuclear Energy Systems," pp. 1263–1268, 2009.
- A. Gomez, L. Pibouleau, C. Azzaro-Pantel, S. Domenech, C. Latgé, and D. Haubensack, "Multiobjective genetic algorithm strategies for electricity production from generation IV nuclear technology," *Energy Conversion and Management*, vol. 51, no. 4, pp. 859–871, Apr. 2010.
- A. M. Cabello Quinones, "SOLUCIÓN PARA EL DESARROLLO SUSTENTABLE," vol. I, p. 48, 2006.
- A. Osorio, "Generador eléctrico accionado por fuerza humana : una nueva alternativa de generación de energía," p. 3, 2007.
- A. Piacentino, C. Barbaro, F. Cardona, R. Gallea, and E. Cardona, "A comprehensive tool for efficient design and operation of polygeneration-based energy μ grids serving a cluster of buildings. Part I: Description of the method," *Applied Energy*, pp. 1–18, Feb. 2013.
- A. Piacentino and F. Cardona, "An original multi-objective criterion for the design of small-scale polygeneration systems based on realistic operating conditions," *Applied Thermal Engineering*, vol. 28, no. 17–18, pp. 2391–2404, Dec. 2008.
- A. R. Mechtenberg, K. Borchers, E. W. Miyingo, F. Hormasji, A. Hariharan, J. V. Makanda, and M. K. Musaazi, "Human power (HP) as a viable electricity portfolio option below 20W/Capita," *Energy for Sustainable Development*, vol. 16, no. 2, pp. 125–145, Jun. 2012.
- A. Sahin, "Progress and recent trends in wind energy," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 30, no. 5, pp. 501–543, 2004.
- A. Sharma, V. V. Tyagi, C. R. Chen, and D. Buddhi, "Review on thermal energy storage with phase change materials and applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, no. 2, pp. 318–345, Feb. 2009.

A. T. D. Perera, R. a. Attalage, K. K. C. K. Perera, and V. P. C. Dassanayake, "A hybrid tool to combine multi-objective optimization and multi-criterion decision making in designing standalone hybrid energy systems," *Applied Energy*, vol. 107, pp. 412–425, Jul. 2013.

Aeolos Wind Turbine, "Aeolos Wind Turbine 10kw Specification." [Online]. Available: <http://www.windturbinestar.com/10kwh-aeolos-wind-turbine.html>. [Accessed: 18-Aug-2013].

Allsmallturbines, "All Small Wind Turbines Portal." [Online]. Available: <http://www.allsmallwindturbines.com/>. [Accessed: 18-Aug-2013].

ALTERNATE ENERGY TECHNOLOGIES LLC, "SOLAR THERMAL CATALOG WORLD CLASS SOLAR PRODUCTS FOR THE," 2005.

ARIAE; Comisión Nacional de Energía, "Coste y eficiencia de las energías renovables," 2009. [Online]. Available: http://www.ariae.org/download/reuniones/xiii_reunion_ariae/pdf16.pdf. [Accessed: 12-Jun-2013].

B. Moaveni and E. Asgariéh, "Deterministic-stochastic subspace identification method for identification of nonlinear structures as time-varying linear systems," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 31, pp. 40–55, Aug. 2012.

B. Parida, S. Iniyan, and R. Goic, "A review of solar photovoltaic technologies," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 3, pp. 1625–1636, Apr. 2011.

B. T. Gibson, "Turning sweat into watts," no. july, 2011.

C. Blum, J. Puchinger, G. R. Raidl, and A. Roli, "Hybrid metaheuristics in combinatorial optimization: A survey," *Applied Soft Computing*, vol. 11, no. 6, pp. 4135–4151, Sep. 2011.

C.-C. Chen, H.-C. Chang, C.-C. Kuo, and C.-C. Lin, "Programmable energy source emulator for photovoltaic panels considering partial shadow effect," *Energy*, vol. 54, pp. 174–183, Jun. 2013.

C. F. Núñez and J. O. Flórez, *ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE BICICLETAS*. 2011, p. 77.

C. Fan, L. Zhang, and L. Cui, "The Status and Development of Trough Solar Thermal Power System," *2012 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, pp. 1–4, Mar. 2012.

C. Novoa and T. Jin, "Reliability centered planning for distributed generation considering wind power volatility," *Electric Power Systems Research*, vol. 81, no. 8, pp. 1654–1661, Aug. 2011.

C. Rouyi and W. Ke, "Research on simulations and model of the isolated Wind-Solar-Diesel-Battery hybrid micro-grid," *2012 China International Conference on Electricity Distribution*, no. Ciced, pp. 1–4, Sep. 2012.

C. Rubio-Maya, J. Uche-Marcuello, A. Martínez-Gracia, and A. a. Bayod-Rújula, "Design optimization of a polygeneration plant fuelled by natural gas and renewable energy sources," *Applied Energy*, vol. 88, no. 2, pp. 449–457, Feb. 2011.

C. Rubio Maya, "Producción combinada de electricidad, calor, frío y agua, de forma sostenible en el sector," Universidad de Zaragoza, 2009.

C. Stathopoulos, A. Kaperoni, G. Galanis, and G. Kallos, "Wind power prediction based on numerical and statistical models," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 112, pp. 25–38, Jan. 2013.

C. Weber, F. Maréchal, D. Favrat, and S. Kraines, "Optimization of an SOFC-based decentralized polygeneration system for providing energy services in an office-building in Tōkyō," *Applied Thermal Engineering*, vol. 26, no. 13, pp. 1409–1419, Sep. 2006.

"Capstone Turbine Corporation Solutions Resource Recovery Biogas." [Online]. Available: <http://www.capstoneturbine.com/prodsol/solutions/rrbiogas.asp>. [Accessed: 20-Jul-2013].

CIRCEE, "Información sobre el proyecto POLIMED." [Online]. Available: http://circe.cps.unizar.es/polimed/poligeneracion/poli_caso.htm. [Accessed: 28-Apr-2013].

"Cogeneración," 2010. [Online]. Available: <http://energia.wikispaces.com/Cogeneraci%C3%B3n>. [Accessed: 11-May-2013].

“COGENERATION / COMBINED HEAT AND POWER (CHP).” [Online]. Available: <http://www.c2es.org/technology/factsheet/CogenerationCHP>. [Accessed: 15-Jul-2013].

Colombia. Ministerio de Ambiente Vivienda y desarrollo territorial, “Calidad en la Vivienda de Interés Social (Guías de Asistencia Técnica para Vivienda de Interés Social, No. 1),” Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2011.

Concejo de Bucaramanga, *Acuerdo 049 28 de Diciembre 2012*. 2012, p. 4.

D. Akroum-Amrouche, N. Abdi, H. Lounici, and N. Mameri, “Effect of physico-chemical parameters on biohydrogen production and growth characteristics by batch culture of *Rhodobacter sphaeroides* CIP 60.6,” *Applied Energy*, vol. 88, no. 6, pp. 2130–2135, Jun. 2011.

D. D. Papadias, S. Ahmed, and R. Kumar, “Fuel quality issues with biogas energy – An economic analysis for a stationary fuel cell system,” *Energy*, vol. 44, no. 1, pp. 257–277, Aug. 2012.

D. Österreicher and O. Pol, “CONCERTO INITIATIVE AND POLYGENERATION,” pp. 39–54.

D. Torres Lobera and S. Valkealahti, “Dynamic thermal model of solar PV systems under varying climatic conditions,” *Solar Energy*, vol. 93, pp. 183–194, Jul. 2013.

“De los detritus al biogás y la electricidad.” [Online]. Available: <http://www.fisica.uh.cu/bibvirtual/vidaytierra/Detritus-biogas/Detritus-biogas-electricidad.htm>. [Accessed: 21-Jul-2013].

“Definición y cálculo de sistemas solares fotovoltaicos aislados autónomos.” [Online]. Available: <http://www.sfe-solar.com/calculo-sistemas-fotovoltaicos-aislados-autonomos/>. [Accessed: 20-Jul-2013].

E. S. Sreeraj, K. Chatterjee, and S. Bandyopadhyay, “Design of isolated renewable hybrid power systems,” *Solar Energy*, vol. 84, no. 7, pp. 1124–1136, Jul. 2010.

E. Sesto and C. Casale, “Exploitation of wind as an energy source to meet the world’s electricity demand,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 74–76, pp. 375–387, Apr. 1998.

F. Cucchiella and I. D'Adamo, "Estimation of the energetic and environmental impacts of a roof-mounted building-integrated photovoltaic systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 7, pp. 5245–5259, Sep. 2012.

F. Cucchiella, I. D'Adamo, M. Gastaldi, and S. C. L. Koh, "Renewable energy options for buildings: Performance evaluations of integrated photovoltaic systems," *Energy and Buildings*, vol. 55, pp. 208–217, Dec. 2012.

F. Dincer, "The analysis on wind energy electricity generation status, potential and policies in the world," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 9, pp. 5135–5142, Dec. 2011.

F. He, P. Liu, Z. Li, and W. Ni, "Integrating low steam demand CO shift process to coal based polygeneration energy systems: Process design and analysis," *Energy*, vol. 45, no. 1, pp. 169–175, Sep. 2012.

Facultad de Artes. Universidad Nacional. UPME, "Diseño y socialización de la propuesta de reglamento técnico para eficiencia energética para viviendas de interés social. RETEVIS." Seminario internacional – Eficiencia energética en edificaciones, 2011.

FAGOR, "ENERGÍA SOLAR TÉRMICA," 2009.

G. BoroumandJazi, B. Rismanchi, and R. Saidur, "Technical characteristic analysis of wind energy conversion systems for sustainable development," *Energy Conversion and Management*, vol. 69, pp. 87–94, May 2013.

G. Chicco and P. Mancarella, "Assessment of the greenhouse gas emissions from cogeneration and trigeneration systems. Part I: Models and indicators," *Energy*, vol. 33, no. 3, pp. 410–417, Mar. 2008.

G. Chicco and P. Mancarella, "Matrix modelling of small-scale trigeneration systems and application to operational optimization," *Energy*, vol. 34, no. 3, pp. 261–273, Mar. 2009.

G. K. Singh, "Solar power generation by PV (photovoltaic) technology: A review," *Energy*, vol. 53, pp. 1–13, Mar. 2013.

G. Kyriakarakos, A. I. Dounis, K. G. Arvanitis, and G. Papadakis, "A fuzzy logic energy management system for polygeneration microgrids," *Renewable Energy*, vol. 41, pp. 315–327, May 2012.

G. Kyriakarakos, A. I. Dounis, S. Rozakis, K. G. Arvanitis, and G. Papadakis, "Polygeneration microgrids: A viable solution in remote areas for supplying power, potable water and hydrogen as transportation fuel," *Applied Energy*, vol. 88, no. 12, pp. 4517–4526, Dec. 2011.

G. Kyriakarakos, D. D. Piromalis, A. I. Dounis, K. G. Arvanitis, and G. Papadakis, "Intelligent demand side energy management system for autonomous polygeneration microgrids," *Applied Energy*, vol. 103, pp. 39–51, Mar. 2013.

G. Pepermans, J. Driesen, D. Haeseldonckx, R. Belmans, and W. D'haeseleer, "Distributed generation: definition, benefits and issues," *Energy Policy*, vol. 33, no. 6, pp. 787–798, Apr. 2005.

Gobierno Federal Estados Unidos Mexicanos, "Prospectiva Energías Renovables 2012-2026," 2012. [Online]. Available: http://www.sener.gob.mx/res/PE_y_DT/pub/2012/PER_2012-2026.pdf. [Accessed: 12-Jun-2012].

H. Dagdougui, R. Minciardi, A. Ouammi, M. Robba, and R. Sacile, "Modeling and optimization of a hybrid system for the energy supply of a 'Green' building," *Energy Conversion and Management*, vol. 64, pp. 351–363, Dec. 2012.

H. J. Alves, C. Bley Junior, R. R. Niklevicz, E. P. Frigo, M. S. Frigo, and C. H. Coimbra-Araújo, "Overview of hydrogen production technologies from biogas and the applications in fuel cells," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 38, no. 13, pp. 5215–5225, May 2013.

H. Perez-blanco, P. State, and R. Bldg, "EFFICIENCIES OF CONVERSION PATHS FOR RENEWABLES," pp. 137–154.

H. Serrano Méndez, C. López Cabrera, and M. Iturrale Vincent, "Introducción al conocimiento del MEDIO AMBIENTE," p. 32.

H. Yang, L. Lu, and W. Zhou, "A novel optimization sizing model for hybrid solar-wind power generation system," vol. 81, pp. 76–84, 2007.

"Hopefull Wind energy technology." [Online]. Available: <http://www.hopefulenergy.com/category/horizontal-axis-wind-turbine.html>. [Accessed: 18-Aug-2013].

- I. Boussaïd, J. Lepagnot, and P. Siarry, "A survey on optimization metaheuristics," *Information Sciences*, vol. 237, pp. 82–117, Jul. 2013.
- I. K. Kapdan and F. Kargi, "Bio-hydrogen production from waste materials," *Enzyme and Microbial Technology*, vol. 38, no. 5, pp. 569–582, Mar. 2006.
- "INFORTEL Comunicaciones EFICIENCIA ENERGÉTICA." [Online]. Available: <http://www.infortel.es/eficiencia.htm>. [Accessed: 11-May-2013].
- ISOTROL and ENDESA, "Introducción a la Generación Distribuida," 2012. [Online]. Available: http://www.escuelaendesa.com/pdf/1_introduccion_a_la_generacion_distribuida.pdf. [Accessed: 12-Apr-2013].
- J. A. Razak, "Optimization of PV-Wind-Hydro-Diesel Hybrid System by Minimizing Excess Capacity," vol. 25, no. 4, pp. 663–671, 2009.
- J. Brouwer, "On the role of fuel cells and hydrogen in a more sustainable and renewable energy future," *Current Applied Physics*, vol. 10, no. 2, pp. S9–S17, Mar. 2010.
- J.-J. Wang, Y.-Y. Jing, C.-F. Zhang, G.-H. Shi, and X.-T. Zhang, "A fuzzy multi-criteria decision-making model for trigeneration system," *Energy Policy*, vol. 36, no. 10, pp. 3823–3832, Oct. 2008.
- J. Paska, P. Biczal, and M. Klos, "Hybrid power systems – An effective way of utilising primary energy sources," *Renewable Energy*, vol. 34, no. 11, pp. 2414–2421, Nov. 2009.
- J.-Y. Kim, G.-Y. Jeon, and W.-H. Hong, "The performance and economical analysis of grid-connected photovoltaic systems in Daegu, Korea," *Applied Energy*, vol. 86, no. 2, pp. 265–272, Feb. 2009.
- K. C. Kavvadias and Z. B. Maroulis, "Multi-objective optimization of a trigeneration plant," *Energy Policy*, vol. 38, no. 2, pp. 945–954, Feb. 2010.
- K. Christensen and Nordic Folkecenter for renewable energy, "Catalogue of Small Wind Turbines 2012," p. 72, 2012.
- K. J. Kontoleon, "Dynamic thermal circuit modelling with distribution of internal solar radiation on varying façade orientations," *Energy and Buildings*, vol. 47, pp. 139–150, Apr. 2012.

K. Kaygusuz, "Energy for sustainable development: A case of developing countries," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 2, pp. 1116–1126, Feb. 2012.

L. Daianova, E. Dotzauer, E. Thorin, and J. Yan, "Evaluation of a regional bioenergy system with local production of biofuel for transportation, integrated with a CHP plant," *Applied Energy*, vol. 92, pp. 739–749, Apr. 2012.

L. M. Serra, M.-A. Lozano, J. Ramos, A. V. Ensinas, and S. a. Nebra, "Polygeneration and efficient use of natural resources," *Energy*, vol. 34, no. 5, pp. 575–586, May 2009.

M. A. Hasan and K. Sumathy, "Photovoltaic thermal module concepts and their performance analysis: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 7, pp. 1845–1859, Sep. 2010.

M. Fadaee and M. a. M. Radzi, "Multi-objective optimization of a stand-alone hybrid renewable energy system by using evolutionary algorithms: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 5, pp. 3364–3369, Jun. 2012.

M. G. Simo, *INTEGRATION OF ALTERNATIVE SOURCES*.

M.-H. Wang and Y.-T. Su, "Using extension method for health analysis system of a fitness device," *Expert Systems with Applications*, vol. 39, no. 17, pp. 12833–12840, Dec. 2012.

M. K. Deshmukh and S. S. Deshmukh, "Modeling of hybrid renewable energy systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12, no. 1, pp. 235–249, Jan. 2008.

M. Martín Monroy, *Manual del aire*, III. Islas Canarias: Manuales de diseño ICARO, 2006, p. 108.

M. Mohammadi, S. H. Hosseinian, and G. B. Gharehpetian, "Optimization of hybrid solar energy sources/wind turbine systems integrated to utility grids as microgrid (MG) under pool/bilateral/hybrid electricity market using PSO," *Solar Energy*, vol. 86, no. 1, pp. 112–125, Jan. 2012.

M. Poschl, S. Ward, and P. Owende, "Evaluation of energy efficiency of various biogas production and utilization.pdf." p. 17, 2010.

M. R. Islam, S. Mekhilef, and R. Saidur, "Progress and recent trends of wind energy technology," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 21, pp. 456–468, May 2013.

M. S. Carmeli, F. Castelli-Dezza, M. Mauri, G. Marchegiani, and D. Rosati, "Control strategies and configurations of hybrid distributed generation systems," *Renewable Energy*, vol. 41, pp. 294–305, May 2012.

M. Shahidehpour, "High reliability distribution systems in microgrids," *2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, pp. 1–1, Jul. 2011.

"Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible." [Online]. Available: <http://www.minambiente.gov.co/portal/default.aspx>. [Accessed: 15-Apr-2013].

Ministerio de ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, *Las normas aplicables para el desarrollo de vivienda de interes social*. Colombia: , 2011, p. 46.

N. A. Rodriguez Miranda, "Estudio de factibilidad técnica y financiera de utilización de biomasa para suplir necesidades energéticas en el edificio Bienestar Universitario," Universidad Industrial de Santander, 2010.

N. Amrizal, D. Chemisana, and J. I. Rosell, "Hybrid photovoltaic – thermal solar collectors dynamic modeling," *Applied Energy*, vol. 101, pp. 797–807, 2013.

N. Manteghi and M. J. H. Jahromi, "Propose a model to choose best project by AHP in distributed generation," *Procedia Technology*, vol. 1, pp. 481–484, Jan. 2012.

O. Ekren, B. Y. Ekren, and B. Ozerdem, "Break-even analysis and size optimization of a PV/wind hybrid energy conversion system with battery storage – A case study," *Applied Energy*, vol. 86, no. 7–8, pp. 1043–1054, Jul. 2009.

O. Erdinc and M. Uzunoglu, "A new perspective in optimum sizing of hybrid renewable energy systems: Consideration of component performance degradation issue," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 37, no. 14, pp. 10479–10488, Jul. 2012.

- O. Erdinc and M. Uzunoglu, "Optimum design of hybrid renewable energy systems: Overview of different approaches," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 3, pp. 1412–1425, Apr. 2012.
- O. Hasańcebi, S. Ćarbaş, E. Dođan, F. Erdal, and M. P. Saka, "Comparison of non-deterministic search techniques in the optimum design of real size steel frames," *Computers & Structures*, vol. 88, no. 17–18, pp. 1033–1048, Sep. 2010.
- P. Ahmadi, M. a. Rosen, and I. Dincer, "Multi-objective exergy-based optimization of a polygeneration energy system using an evolutionary algorithm," *Energy*, vol. 46, no. 1, pp. 21–31, Oct. 2012.
- P. Bajpai and V. Dash, "Hybrid renewable energy systems for power generation in stand-alone applications: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 5, pp. 2926–2939, Jun. 2012.
- P. Gangadharan, A. Zanwar, K. Zheng, J. Gossage, and H. H. Lou, "Sustainability assessment of polygeneration processes based on syngas derived from coal and natural gas," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 39, pp. 105–117, Apr. 2012.
- P. Liu, D. I. Gerogiorgis, and E. N. Pistikopoulos, "Modeling and optimization of polygeneration energy systems," *Catalysis Today*, vol. 127, no. 1–4, pp. 347–359, 2007.
- P. Liu, E. N. Pistikopoulos, and Z. Li, "A mixed-integer optimization approach for polygeneration energy systems design," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 33, no. 3, pp. 759–768, Mar. 2009.
- P. S. Tiwari, L. P. Gite, M. M. Pandey, and a. K. Shrivastava, "Pedal power for occupational activities: Effect of power output and pedalling rate on physiological responses," *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 41, no. 3, pp. 261–267, May 2011.
- P. Sánchez and P. Linares, "Modelos matemáticos de optimización," 2010.
- P. V. Rao, S. S. Baral, R. Dey, and S. Mutnuri, "Biogas generation potential by anaerobic digestion for sustainable energy development in India," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 7, pp. 2086–2094, Sep. 2010.

P. Zamparo, A. Minetti, and P. di Prampero, "Mechanical efficiency of cycling with a new developed pedal-crank.," *Journal of biomechanics*, vol. 35, no. 10, pp. 1387–98, Oct. 2002.

PRESEID SOLAR, "Solar PV module catalog," p. 6.

R. K. Akikur, R. Saidur, H. W. Ping, and K. R. Ullah, "Comparative study of stand-alone and hybrid solar energy systems suitable for off-grid rural electrification: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 27, pp. 738–752, Nov. 2013.

R. Baños, F. Manzano-Agugliaro, F. G. Montoya, C. Gil, a. Alcayde, and J. Gómez, "Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 4, pp. 1753–1766, May 2011.

R. Cottureau, D. Clouteau, H. Ben Dhia, and C. Zaccardi, "A stochastic-deterministic coupling method for continuum mechanics," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 200, no. 47–48, pp. 3280–3288, Nov. 2011.

R. K. Megalingam, "Pedalite : Lighting Up Lives in Un-electrified Villages," pp. 12–17, 2012.

R. Luna-Rubio, M. Trejo-Perea, D. Vargas-Vázquez, and G. J. Ríos-Moreno, "Optimal sizing of renewable hybrids energy systems: A review of methodologies," *Solar Energy*, vol. 86, no. 4, pp. 1077–1088, Apr. 2012.

R. Viral and D. K. Khatod, "Optimal planning of distributed generation systems in distribution system: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 7, pp. 5146–5165, Sep. 2012.

S. Ashok, "Optimised model for community-based hybrid energy system," *Renewable Energy*, vol. 32, no. 7, pp. 1155–1164, Jun. 2007.

S. Bracco, F. Delfino, F. Pampararo, M. Robba, and M. Rossi, "The University of Genoa smart polygeneration microgrid test-bed facility: The overall system, the technologies and the research challenges," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 18, pp. 442–459, Feb. 2013.

S. C. Bhattacharya and P. A. Salam, "Low greenhouse gas biomass options for cooking in the developing countries," vol. 22, pp. 305–317, 2002.

- S. C. Lee, "Numerical estimation model of energy conversion for small hybrid solar–wind system," *Solar Energy*, vol. 86, no. 11, pp. 3125–3136, Nov. 2012.
- S. Carley, "Distributed generation: An empirical analysis of primary motivators," *Energy Policy*, vol. 37, no. 5, pp. 1648–1659, May 2009.
- S. Conti, "Protection Issues and State of the Art for Microgrids with Inverter-Interfaced Distributed Generators," pp. 643–647, 2011.
- S. D. Pohekar, D. Kumar, and M. Ramachandran, "Dissemination of cooking energy alternatives in India—a review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 9, no. 4, pp. 379–393, Aug. 2005.
- S. Essalaimeh, a. Al-Salaymeh, and Y. Abdullat, "Electrical production for domestic and industrial applications using hybrid PV-wind system," *Energy Conversion and Management*, vol. 65, pp. 736–743, Jan. 2013.
- S. Fazlollahi, P. Mandel, G. Becker, and F. Maréchal, "Methods for multi-objective investment and operating optimization of complex energy systems," *Energy*, vol. 45, no. 1, pp. 12–22, Sep. 2012.
- S. Kuravi, J. Trahan, D. Y. Goswami, M. M. Rahman, and E. K. Stefanakos, "Thermal energy storage technologies and systems for concentrating solar power plants," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 39, no. 4, pp. 285–319, Aug. 2013.
- S. Lansing, R. B. Botero, and J. F. Martin, "Waste treatment and biogas quality in small-scale agricultural digesters.," *Bioresource technology*, vol. 99, no. 13, pp. 5881–90, Sep. 2008.
- S. Leduc, F. Starfelt, E. Dotzauer, G. Kindermann, I. McCallum, M. Obersteiner, and J. Lundgren, "Optimal location of lignocellulosic ethanol refineries with polygeneration in Sweden," *Energy*, vol. 35, no. 6, pp. 2709–2716, Jun. 2010.
- S. Ólafsson, "Metaheuristics," vol. 13, no. 06, pp. 633–654, 2006.
- S. Yilmaz and H. Selim, "A review on the methods for biomass to energy conversion systems design," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 25, pp. 420–430, Sep. 2013.

“SICEL 2013,” 2013. [Online]. Available: <http://sichel.org/index.php>. [Accessed: 22-Jul-2013].

“SunMaxx Product Documents - Solar Thermal Manufacturer Solar Hot Water & Heating Manufacturer.” .

T. Abbasi and S. a. Abbasi, “Biomass energy and the environmental impacts associated with its production and utilization,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 3, pp. 919–937, Apr. 2010.

T. Bond and M. R. Templeton, “History and future of domestic biogas plants in the developing world,” *Energy for Sustainable Development*, vol. 15, no. 4, pp. 347–354, Dec. 2011.

T. Grupo, “Todo sobre construcción sostenible,” *Página CONSTRUIBLE.ES*, 2012. [Online]. Available: <http://www.construible.es/noticiasDetalle.aspx?c=10>.

TAGEX and TASOL, “Catálogo de Energía Solar Térmica,” pp. 1–21.

“Unveiling the Hidden Connections between E-mobility and Smart Microgrid - Optical Zeitgeist Laboratory.” [Online]. Available: http://zeitgeistlab.ca/doc/Unveiling_the_Hidden_Connections_between_E-mobility_and_Smart_Microgrid.html. [Accessed: 03-Jun-2013].

UPME, “FORMULACIÓN DE UN PROGRAMA BÁSICO DE NORMALIZACIÓN PARA APLICACIONES DE ENERGÍAS ALTERNATIVAS Y DIFUSIÓN,” pp. 1–47, 2003.

V. Morisson, M. Rady, E. Palomo, and E. Arquís, “Thermal energy storage systems for electricity production using solar energy direct steam generation technology,” *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, vol. 47, no. 3, pp. 499–507, Mar. 2008.

W. El-Khattam and M. M. . Salama, “Distributed generation technologies, definitions and benefits,” *Electric Power Systems Research*, vol. 71, no. 2, pp. 119–128, Oct. 2004.

W. T. Chong, M. S. Naghavi, S. C. Poh, T. M. I. Mahlia, and K. C. Pan, “Techno-economic analysis of a wind–solar hybrid renewable energy system with rainwater collection feature for urban high-rise application,” *Applied Energy*, vol. 88, no. 11, pp. 4067–4077, Nov. 2011.

“WorldGBC 3.” [Online]. Available: <http://www.worldgbc.org/>. [Accessed: 05-Jun-2013].

Y. Chen, “Optimal Design and Operation of Energy Polygeneration Systems by,” 2013.

Y. Tripanagnostopoulos, “Aspects and improvements of hybrid photovoltaic/thermal solar energy systems,” *Solar Energy*, vol. 81, no. 9, pp. 1117–1131, Sep. 2007.

Z. Dongmei, Z. Nan, and L. Yanhua, “Micro-grid connected/islanding operation based on wind and PV hybrid power system,” *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies*, pp. 1–6, May 2012.

ZED factory ltd, “Micro-Generation Small Scale Energy production,” pp. 1–12.

ANEXO A. GENERALIDADES ENERGÍA BIOMASA

PRINCIPIOS DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA

El proceso de digestión anaerobia es considerado como un mínimo de dos reacciones biológicas que implican al menos dos grupos diferentes de microorganismos, bacterias formadoras de ácido (saprofitas) y la formación de bacterias de metano; estas descomponen la materia orgánica en un equipo/dispositivo llamado biodigestor [30], [32], [33].

Los biodigestores son estructuras físicas que proporcionan un ambiente anaeróbico para los organismos responsables de la digestión. Inicialmente, la descomposición aeróbica tiene lugar donde se consume oxígeno formando dióxido de carbono, agua y calor. Tras el agotamiento del oxígeno, la descomposición anaeróbica se caracteriza por una producción constante de biogás. Este gas se satura normalmente con vapor de agua, y contiene principalmente metano (40%-60%) y dióxido de carbono (35%-50%), con cantidades más pequeñas de oxígeno (<1%) y nitrógeno (3%-5%) [33], [34].

Características del biogás

- Es inflamable, potencialmente explosivo y una fuente fácilmente controlable de energía [32].

- Su uso ayuda a reducir la cantidad que de otro modo se libera de forma natural en la atmósfera, y por lo tanto reduce el exceso de efecto invernadero. Aunque en la quema de biogás, se libera dióxido de carbono, que no se considera como un contribuyente neto al nivel de dióxido de carbono mundial ya que se originó a partir de plantas, que han absorbido de la atmósfera [32].
- El aprovechamiento de biogás también ayuda a minimizar la descomposición de olores desagradables producidos en los vertederos, porque, de lo contrario, estos gases serían liberados directamente a la atmósfera. Por lo tanto, sobre todo en los vertederos situados cerca de las zonas habitadas, el aprovechamiento de biogás hace los vertederos más aceptable socialmente.

Aunque hay varios tipos de aplicaciones, las nuevas alternativas de biogás necesitan ser explotados de manera estratégica para consolidar su potencial de generación de energía. Una posibilidad prometedora es la obtención de H_2 a partir del biogás para su uso en pilas de combustible de carga. El H_2 tiene la capacidad de alta energía, con la mayor cantidad de energía por unidad de masa que cualquier otra sustancia conocida (121.000 kJ / kg) [32].

Los procesos de producción más comunes para la obtención de hidrógeno a partir del metano son: el reformado con vapor (SR), la reforma de la oxidación parcial (POR), reformado auto térmico (ATR), la reforma en seco (DR) y la reforma de la oxidación seca (DOR) [32].

CÉLULAS DE COMBUSTIBLE PARA LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Mientras que la tecnología para convertir de manera eficiente H_2 en energía eléctrica y en los niveles de potencia requeridos están más cerca de la comercialización, los intentos paralelos se han hecho para el uso directo de biogás en pilas de combustible, conocido como "reforma interna". Una desventaja del proceso de reforma interna es la formación de CO, que actúa como un veneno para la pila de combustible [19].

Una tecnología emergente que tiene posibilidades de cogeneración es la célula de combustible. Esta es un dispositivo que convierte el hidrógeno en energía eléctrica sin combustión, además de producir calor. La mayoría de las pilas de combustible utilizan el gas natural (compuesto principalmente de metano) como la fuente de hidrógeno. La mayor utilización de las células de combustibles es en modo de cogeneración, pero las nuevas instalaciones se encuentran como un sistema de trigeneración, donde también se genera refrigeración, además de calor y energía eléctrica [95].

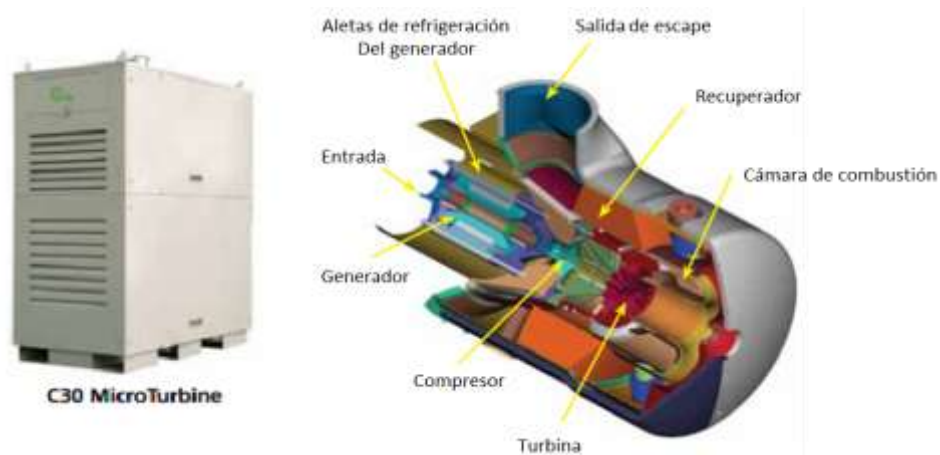
GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y CALOR CON MICROTURBINAS ACCIONADAS CON BIOGÁS

Las microturbinas Capstone pueden quemar limpiamente gases residuales para generar energía renovable y calor. Esta marca particular, ofrece su línea de Microturbinas CR (*Renewable Capstone*) específicamente diseñadas para funcionar en estos combustibles que a pesar de contener energía utilizable, tienen una baja densidad de energía y por lo general están contaminados con otros gases como el sulfuro de hidrógeno.

Las microturbinas Capstone se diseñan para permitir un uso de tecnologías más fácil que la generación tradicional, ya que pueden operar en una amplia gama de contenidos de energía, se ajustan automáticamente a los cambios en densidades de energía en el tiempo y pueden aceptar altos niveles de contaminantes, tales como sulfuro de hidrógeno (H_2S). Se puede obtener una mejor información de estas turbinas y detalles de diseño en la referencia [37]. Se puede observar en la Figura A.1 la microturbina para producción de energía eléctrica a pequeña escala.

Esta contaminación hace problemático su uso y requiere conocimientos específicos de los componentes de los gases residuales y la forma de tratarlos de una instalación de generación de energía fiable y de bajo mantenimiento. Las microturbinas Capstone se diseñan para permitir un uso de tecnologías más fácil que la generación tradicional, ya que pueden operar en una amplia gama de contenidos de energía, se ajustan automáticamente a los cambios en densidades de energía en el tiempo, y pueden aceptar altos niveles de contaminantes, tales como sulfuro de hidrógeno (H_2S) [37]. Se puede obtener una mejor información de estas turbinas y detalles de diseño en esta referencia: [37].

Figura A.1. Microturbina Capston CR para la producción a pequeña escala a través de biogás.



Adaptada de la fuente: (<http://www.capstoneturbine.com/prodsol/solutions/rbiogas.asp> 2013).

BIOGAS PARA COCCIÓN DE ALIMENTOS

Una pequeña cantidad de aire debe ser inyectado en el espacio de la cabeza del digestor con el fin de facilitar la oxidación bioquímica de sulfuro de hidrógeno. Es posible conseguir la extracción de agua mediante enfriamiento, tal como en una tubería subterránea, para condensar la humedad [40].

El cocinar con los combustibles sólidos en fuegos abiertos o estufas tradicionales manifiesta altos niveles de contaminación del aire, debido a contaminantes como partículas pequeñas y monóxido de carbono. La contaminación del aire, una proporción significativa generada a partir de las cocinas tradicionales, se cree que es responsable de 2,7% de la carga mundial total de morbilidad. Sin embargo, hay ciertos problemas como la tecnología y la actualización, la reducción en los costes iniciales, los

problemas de comportamiento asociados con el uso de esta tecnología para cocinar [40], [41].

ANEXO B. GENERALIDADES DE *PEDAL POWER*

LA ESTRUCTURA DEL SISTEMA MECÁNICO

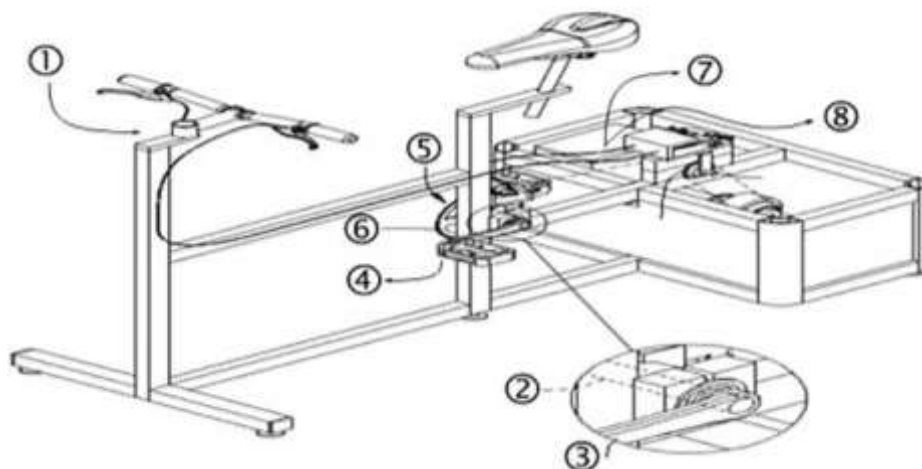
La estructura mecánica consiste en un cuerpo y un mecanismo de transmisión. El mecanismo del cuerpo está constituida por:

- ① Marco
- ② Eje de giro
- ③ Un par de manivelas
- ④ Pedales.
- ⑤ El mecanismo de transmisión, compuesto a su vez por:
- ⑥ Conducción disco estriado

- ⑦ Cenador disco estriado
- ⑧ Conjunto de engranajes

Este mecanismo puede ser utilizado para regular la velocidad del sistema de cambio, lo que permite al usuario regular la velocidad y la potencia libremente. Además, la cadena de enclavamiento acciona el sistema de potencia de los pedales. La Figura B1 muestra la estructura del sistema mecánico [44].

Figura B.1. Estructura del sistema mecánico.



Fuente: (Wang & Su 2012).

GENERADOR ELÉCTRICO

El corazón de los proyectos de energía de pedal es el dínamo. Los dínamos son los generadores eléctricos que pueden producir corriente continua. Hay dos tipos de dínamos disponibles, dínamos de botella y dínamos de buje [45].

El dínamo de botella gira a una frecuencia mucho más baja que el dínamo de buje a pesar de tener más polos. Una de las desventajas del dínamo de buje es que a pesar de su alto rendimiento a baja frecuencia, no se puede instalar en una bicicleta ya existente y en dado caso el dínamo de botella es la mejor opción [45].

CONCEPTO PACE

PACE, es un término que cuantifica la cantidad de energía (en términos de calorías de los alimentos) requerida en la realización de una actividad en particular. El ritmo de cada cultura es muy diferente, y por lo tanto se puede utilizar para comparar una determinada actividad en varios países. Además, ilustra que hay algunos dispositivos de generación de energía eléctrica que tienen sentido en una cultura, mientras que en otra no debido a su situación específica [46].

Los cuerpos humanos se han convertido en aproximadamente el 25% de los organismos eficientes en términos de energía biológica (química) en alimentos y trabajo mecánico. En el mundo moderno industrializado, los

seres humanos trabajan menos mecánicamente porque las máquinas están disponibles para hacer la mayor parte de este trabajo [46].

POTENCIAL DEL SISTEMA *PEDAL POWER*

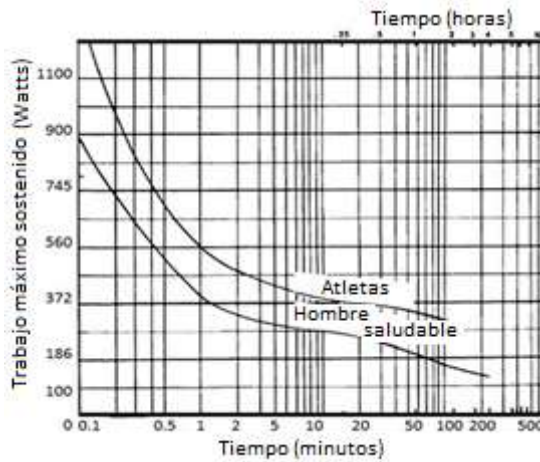
Una de las limitaciones de los dispositivos de potencial humano es la cantidad de energía que este puede producir. La siguiente ecuación representa la relación entre el potencial humano y la energía eléctrica [138]:

$$P_{eléctrica} = \eta_{dispositivo} * P_{salida\ mecánica\ humana} \quad (B.1)$$

Donde $\eta_{dispositivo}$ es la eficiencia del dispositivo, $P_{salida\ mecánica\ humana}$ es la potencia de salida mecánica de los músculos humanos, y $P_{eléctrica}$ es la potencia de salida eléctrica de los dispositivos de generación de energía eléctrica. Por lo tanto, es importante conocer la cantidad de energía que una persona puede producir en promedio [46].

La potencia máxima depende del tiempo sobre el que se puede sostener. La investigación de la NASA sobre el máximo trabajo mecánico sostenido se muestra en la Figura B.2 donde se pueden mantener 100 W de salida de energía mecánica por 4 h. Por supuesto, la potencia de salida puede variar entre las personas de acuerdo a la salud y la edad del individuo, pero teniendo una idea general de las potencias posibles, se puede diseñar el sistema, anotando que cuanto menor es la demanda de energía total, menos pedaleo sería necesario por día (menos producción mecánica) [46].

Figura B.2. Comparación entre la energía producida por un humano y el tiempo de sostenibilidad en la bicicleta.



Adaptada de la fuente: (Kaygusuz 2012).

CASO EJEMPLO

El potencial humano es una manera de obtener energía eléctrica necesaria para el desarrollo, a continuación, se muestran un ejemplo con aplicación práctica para la utilización de la generación de energía eléctrica a través de una bicicleta estática [46].

Una persona puede producir en una bicicleta hasta 125 W de potencia durante 1 h, por lo tanto se tienen 125 Wh de energía eléctrica generada, pero tendrá que ser almacenada en una batería para ser utilizada más adelante. Suponiendo que la eficiencia de la batería en carga y descarga es del 90% y la eficiencia del generador de la bicicleta es de 80%, la energía eléctrica total disponible para el consumo sería de 90 W [46].

Por lo tanto, para el día, la potencia media de base para esta cantidad de energía disponible (y lista para ser consumido) sería 3,75 W para esta persona, suponiendo 1 h de generación por día. Debido a la baja

disponibilidad de energía, la eficiencia de los dispositivos de uso final es aún más crítica para los dispositivos de potencial humano [46].

ANEXO C. GENERALIDADES DE LA ENERGÍA EÓLICA

CONTROL DE POTENCIA DE LA ENERGÍA EOLICA

La energía eólica no es un recurso controlable debido a su naturaleza intermitente y estocástica. La mayoría de las turbinas eólicas operan a velocidades de rotación fijas. Sin embargo, la operación de velocidad fija significa que el máximo coeficiente de rendimiento sólo está disponible a una velocidad del viento en particular. Si la velocidad de la turbina se puede ajustar en relación con la velocidad del viento, sería posible obtener una mayor potencia de salida [49].

El potencial de la energía eólica en la tierra es enorme y suficiente para satisfacer las necesidades energéticas mundiales. Todos los países tienen sitios con velocidades medias de viento de más de 5 m/s medidos a una altura de 10 m, que son suficientes para su desarrollo. Tanto las velocidades de viento fuerte como las velocidades de viento bajas tienen un riesgo potencial importante para la generación de la energía eléctrica [53].

La determinación del potencial de la energía eólica para un sitio seleccionado se hace mediante la investigación de un conocimiento detallado de las características del viento, como la velocidad, la dirección, la continuidad y disponibilidad para la selección de la turbina. Además, para utilizar toda la potencia del viento, la turbina debe estar ubicada en una zona de velocidad de viento determinada y constante [54].

Los mapas de velocidad de viento muestran curvas a las mismas velocidades promedio del viento. Las investigaciones en la energía eólica se basan principalmente en la media aritmética de la velocidad del viento. En general, la función de distribución de Weibull indica con qué probabilidad se puede observar una determinada velocidad de viento con las muestras obtenidas de las frecuencias relativas de velocidad a lo largo de un año. El viento promedio se define como aquel que corta el área bajo la curva justo en la mitad [52].

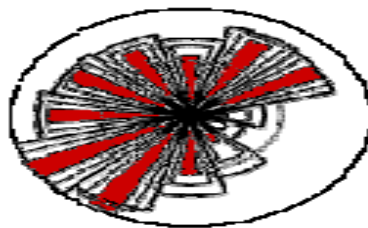
Los datos en su mayoría son promedio durante los meses de calendario y puede ser descrito por la función de probabilidad de Weibull, $\phi(v)$ que depende de dos parámetros ajustables ($k;c$), donde c es un factor de escala (m/s) que suele ser próximo a la velocidad media, y k es un factor de forma

que caracteriza la asimetría de la función de probabilidad y viene dada por la expresión [52]:

$$\varphi(v) = \left[\frac{k}{c} \left(\frac{v}{c} \right)^{k-1} \right] e^{-\left(\frac{v}{c} \right)} \quad (\text{C.1})$$

La dirección del viento se define como la orientación del vector del viento en la horizontal expresada en grados, contados a partir del norte geográfico, en el sentido de las manecillas del reloj. Una herramienta muy útil para determinar esta es por medio de la Rosa de los vientos como se puede observar en las Figura C1, la cual indica cual es el la dirección predominante del viento en una determinada zona, también existe la rosa de frecuencias y de rugosidad del terreno [139].

Figura C.1. Rosa de los vientos.



Fuente: (Martín 2006).

CONTROL PITCH Y CONTROL STALL

Las turbinas de viento alcanzan la más alta eficiencia en la velocidad del viento diseñado, que es por lo general entre 12 y 16 m/s, a estas velocidades de viento, la potencia llega a su capacidad nominal. Por encima de esta velocidad del viento, la salida de potencia del rotor debe limitarse a mantener la potencia de salida cerca de la capacidad nominal y reducir con ello las fuerzas motrices en la pala de rotor individual, así como la carga en toda la estructura de la turbina de viento [49].

Por los motivos expuestos anteriormente, todas las turbinas eólicas utilizan algún tipo de control de potencia. Hay dos métodos principales utilizados por las turbinas eólicas modernas, los cuales son:

- Control Pitch o de paso: Cuando la potencia de salida de la turbina es demasiado alta, el sistema de control envía la señal al mecanismo de paso de las palas que posiciona inmediatamente al rotor fuera de viento de manera ligera. Por el contrario, cuando la fuerza del viento es baja, el rotor vuelve a su posición original. El ángulo de las palas del rotor se puede ajustar por el sistema de control de la máquina, donde el controlador electrónico controla la potencia de salida de la turbina varias veces por segundo [49], [140].
- Control Stall o regulación por pérdida aerodinámica: Algunas veces se describe como control pasivo, ya que tiene las propiedades aerodinámicas inherentes de la hoja, que determinan la potencia de salida, sin partes móviles para ajustar. Este tipo de control requiere una regulación de la velocidad y una característica intrínseca adecuada del par de velocidad el diseño aerodinámico del rotor. El giro y el grosor de la pala del rotor varían a lo largo de su longitud de tal manera que la turbulencia se produce detrás de la hoja cada vez que la velocidad del viento llega a ser demasiado fuerte. [140].

RESTRICCIONES DE LA ENERGÍA EÓLICA

El uso de la energía eólica en los sistemas eléctricos depende de factores tales como las reacciones de las personas involucradas a nivel local y algunos aspectos técnicos. Las preocupaciones de las personas se centran principalmente en cuestiones de uso del suelo, el ruido, la estética y los posibles efectos sobre las aves [51].

La regulación y la frecuencia es probable que sean afectadas de manera sensible, así como problemas de regulación de voltaje pueden ocurrir especialmente cuando las plantas eólicas se conectan a las redes de distribución de media tensión débil, que es un caso muy común en las zonas rurales. Además, la conexión de instalaciones de energía eólica a los sistemas eléctricos existentes puede plantear problemas técnicos, por ejemplo, si una red adecuada no está disponible a una distancia aceptable de la planta eólica, esto trae consigo la necesidad de construir costosas líneas y subestaciones [51].

ANÁLISIS DE COSTOS DE LA ENERGÍA EÓLICA

Estudios muestran que la energía del viento es una fuente de energía económicamente eficiente y accesible para la utilización a gran escala en el futuro próximo. Las turbinas eólicas pueden ser totalmente automatizadas y necesitan poco tiempo para la puesta en marcha [49].

El costo de la energía eólica es una función costo entre la construcción y operación del proyecto, y la cantidad de energía producida por la instalación

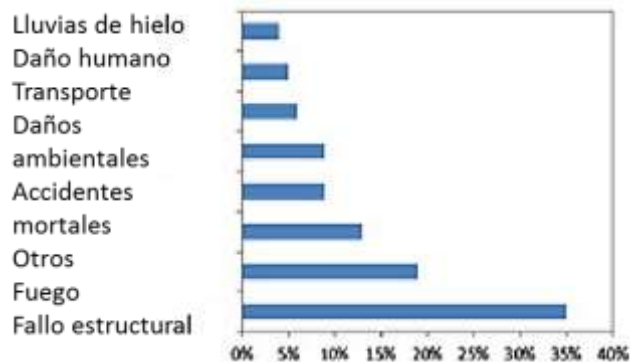
durante su vida útil [54]. Los principales parámetros que rigen la economía de energía eólica son los siguientes [54]:

- Los costos de inversión, incluidos los gastos auxiliares para la fundación, la conexión de la red, etc.
- Costos de operación y mantenimiento (O & M).
- La producción de energía eléctrica / velocidad media del viento.
- Vida útil de la turbina.
- Tasa de descuento.

GESTIÓN DE RIESGOS DE LA ENERGÍA EÓLICA

Un análisis y el riesgo de fallas determina las causas más probables de falla de la turbina eólica y su resultado puede prevenir futuras interrupciones y accidentes. En el primer paso del procedimiento se deben investigar los datos del sitio y la información, incluyendo los datos de compilación, el informe de diseño de torre original, manual de instalación, los registros de velocidad del viento y estudios de casos similares. En línea con esta etapa, debe llevarse a cabo un análisis experimental y numérico incluyendo pruebas de laboratorio y de análisis de la torre. En el siguiente paso, todos los documentos de certificación, la construcción y los registros de operación son revisados. Por último, los resultados de los registros llevados a cabo probados y revisados necesitan un análisis crítico. La Figura C.2 muestra las causas más comunes de las fallas en las turbinas eólicas [50].

Figura C.2. Causas de las fallas de las turbinas eólicas.



Adaptada de la fuente: (BoroumandJazi, Rismanchi & Saidur 2013).

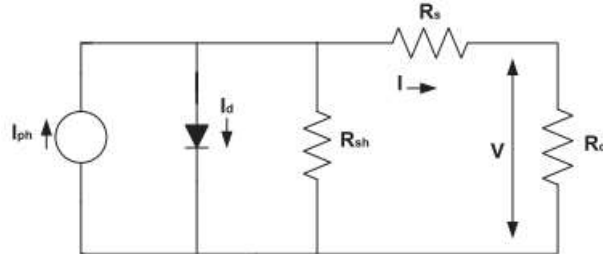
Las turbinas comerciales de hoy en día en su mayoría son de este tipo: eje horizontal con rotor de tres palas con eje rígido, hojas de fibra de vidrio de plástico reforzado o en madera laminada unidos por una resina, la regulación de potencia se lleva a cabo ajustando el paso de las palas, a pesar de regulación de pérdida de sustentación generador asíncrono (de inducción), acero tubular o torre de celosía de acero [51].

ANEXO D. GENERALIDADES ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

MODELADO DE LAS CÉLULAS SOLARES

El circuito equivalente de una célula fotovoltaico se representa en la Figura D.1.

Figura D.1. Circuito equivalente simplificado de una célula fotovoltaica.



Adaptada de la fuente: (Singh 2013).

Donde, I es la corriente de salida fotovoltaica hasta el generador, la fuente de corriente I_{ph} representa la corriente de foto, I_d es la corriente de saturación inversa del diodo, R_{sh} y R_s son la derivación intrínseca y resistencia en serie de la célula, respectivamente [56].

El diodo de bloqueo del panel permite que la energía fluya solo hacia el lado de la carga. Sin un diodo de bloqueo, la batería se descargaría a través del panel durante baja insolación [56].

La corriente de salida fotovoltaica está dada por [56]:

$$I = N_p I_{pn} - N_p I_d \left[\exp\left(\frac{qV}{kTAN_s} - 1\right) \right] \quad (D.1)$$

Donde, V es la tensión de salida del generador fotovoltaico, N_s y N_p es el número de células conectadas en serie y paralelo respectivamente, q es la carga de un electrón, k es la constante de Boltzmann, A es el factor de idealidad de la unión pn , I_d es la corriente de saturación inversa celular, T es la temperatura de la célula. El factor A determina la desviación de células de

la característica ideal de la unión *pn*, esta varía de 1 a 5, siendo 1 el valor ideal [56].

La corriente *I_d* de saturación inversa de la célula varía con la temperatura de acuerdo con la siguiente ecuación [56]:

$$I_d = I_c \left[\frac{T}{T_c} \right]^3 \exp \left[\left(q \frac{E_g}{KA} \right) \left(\frac{1}{T_c} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (D.2)$$

Donde, *T_c* es la temperatura de referencia de la celda, *I_c* es la corriente de saturación inversa a *T_c*. La corriente de foto *I_{ph}* depende de la radiación solar y la temperatura de la célula dada por [56]:

$$I_{ph} = [I_{scr} + K_i(T - T_c)] \left[\frac{S}{100} \right] \quad (D.3)$$

Donde, *I_{scr}* es la corriente de cortocircuito de la célula a la temperatura de referencia, la radiación, *K_i* es el coeficiente de temperatura de la corriente de cortocircuito, y *S* es la radiación solar en mW/cm² [56].

La potencia del panel PV puede ser calculada por [56]:

$$P = i * V \quad (D.4)$$

$$P = N_p I_{ph} V - N_p I_d V \left[\exp \left(\frac{qV}{KTAN_s} \right) - 1 \right] \quad (D.5)$$

La tensión de salida de la célula fotovoltaica es una función de la corriente de foto que está determinada principalmente por la corriente de carga en función del nivel de radiación solar durante la operación, y viene dada por [56]:

$$V = \left(\frac{AKT}{q} \right) \ln \left[\frac{(I_{ph} + I_d - I)}{I_d} \right] \quad (D.6)$$

En general, estos parámetros son funciones de la radiación solar incidente y la temperatura de la célula. Los valores de referencia de estos parámetros están determinados por las condiciones de operación y los factores de campo. Tres parejas de corriente-voltaje están normalmente disponibles en las condiciones estándar de calificación (SRC): tensión de circuito abierto, corriente de corto circuito, y el voltaje y la corriente en el punto de máxima potencia. Una cuarta pieza de información puede ser obtenida mediante el establecimiento de la derivada de la potencia en el punto de máxima potencia a cero [56].

Los hallazgos notables basados en los diversos estudios realizados en el modelado y análisis de sistemas fotovoltaicos son [56]:

- El voltaje de circuito abierto aumenta logarítmicamente con la irradiación ambiente.
- La corriente de cortocircuito varía linealmente con la radiación ambiental.
- El aumento de la temperatura de la célula causa la disminución lineal en el voltaje de circuito abierto que conduce a la disminución de la eficiencia de la célula.
- El aumento de la temperatura de la célula provoca ligero aumento en la corriente de corto circuito.
- La corriente foto y la temperatura tienen relación lineal.
- No existe una degradación significativa en el rendimiento de la célula PV entre pleno sol y nublado.

- La potencia de salida disminuye de forma casi lineal con la energía solar incidente, pero la eficiencia es casi plana en la región de interés.
- La potencia de salida de las células solares depende del valor absoluto y la distribución espacial de la radiación en el plano de la célula solar y la temperatura de la célula.
- El valor absoluto de la radiación directa normal aumenta con el aumento de la altura atmosférica.
- La producción de energía en comparación con la irradiación puede proporcionar una mejor comparación entre los diferentes módulos en caso de alto valor de la fluctuación de la radiación diaria.
- La potencia máxima disminuye con el aumento en el factor de calidad del diodo.
- Para extraer la máxima potencia de la célula solar, el valor de la resistencia en serie se debe mantener mínimo.

La energía producida por una instalación fotovoltaica conectada a la red depende de (i) los factores climáticos (radiación incidente y la temperatura de trabajo del módulo), (ii) las características del inversor (rendimiento, punto de trabajo y el umbral de la operación, que se define como la potencia mínima necesaria para conectarse al inversor a la red) y (iii) el sistema de acoplamiento a la red, que depende de las características de la energía producida por el inversor y en la estabilidad de la red y la disponibilidad [141].

MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Un módulo solar produce energía eléctrica en corriente continua, la salida DC de los módulos solares está calificada por los fabricantes en condiciones de prueba estándar (STC). Las STC requieren una temperatura de la célula solar igual a 25 °C, una radiación solar igual a 1000 W/m² y un espectro solar

que es filtrado al pasar a través de un espesor de la atmósfera de 1,5 m (espectro estándar norma ASTM) [142].

Múltiples módulos pueden ser conectados en serie para aumentar la tensión de salida y en paralelo para aumentar la corriente para la expansión de la capacidad de potencia. Se debe tener en cuenta que la tolerancia de fabricación de un módulo es a menudo es de $\pm 5\%$ del valor nominal [56], [143].

El fenómeno de los picos de potencia de salida puede aparecer en una salida de la curva (tensión-corriente) de un generador fotovoltaico, lo que aumenta las dificultades en el seguimiento del punto de máxima potencia y luego disminuye el rendimiento del sistema en general [143].

PÉRDIDAS EN LOS PANELES SOLARES

Las pérdidas en los paneles solares pueden ser causadas principalmente por: sombreado sobre los paneles PV, por conductores eléctricos y por pendiente, orientación y reflexividad en la superficie de los paneles fotovoltaicos [142].

Pérdidas por sombreado sobre los paneles fotovoltaicos

Este tipo de pérdidas pueden ser debido a sombras lejanas (árboles, postes, edificios, etc.) las cuales se interponen entre el sol y los paneles durante el día, o debido a la sombra directa, si hay varias filas de paneles dispuestos en el mismo plano. Las pérdidas son de gran importancia, por eso, la ubicación debe ser elegida con cuidado. Para evitar sombras directas, se puede optar por dividir cada fila de paneles dispuestos en el mismo plano,

o elevarlos sobre una superficie inclinada. Para estimar las pérdidas por sombreado distante se utiliza el método propuesto por el Instituto para la diversificación y ahorro de la energía (IDAE) de España, mediante la superposición del perfil de obstáculos visibles [142].

Pérdidas por conductores eléctricos

Estas pérdidas son importantes en DC, cuando la tensión es baja. Es crucial seleccionar convenientemente el tamaño del conductor buscando, que la caída de tensión sea inferior a 1,5%. También es importante colocar los generadores cerca de los inversores, para que funcione con la tensión de corriente continua máxima que los paneles y los inversores pueden soportar, para así aumentar el rendimiento de conversión, y reducir las pérdidas óhmicas [142].

Pendiente, orientación y reflexividad en la superficie de los paneles

Si los paneles fotovoltaicos no son perfectamente orientados al sur (azimut de 0° en el hemisferio norte), su orientación puede originar una pérdida considerable de eficiencia. Del mismo modo, la pendiente de los paneles debe ser cambiada de dos a cuatro veces al año para maximizar la absorción de energía solar, ya que la pendiente óptima en el verano no es la misma que en invierno [142].

BALANCE DE ENERGÍA

El balance de energía de un sistema fotovoltaico se expresa por el EPBT, que es el tiempo que el sistema toma para generar la cantidad de energía igual a la utilizada. Este depende de varios factores: la tecnología de células, el tipo de encapsulación, el marco y la matriz de soporte, el tamaño del módulo, el tipo de aplicación y el rendimiento. También se ve afectado por

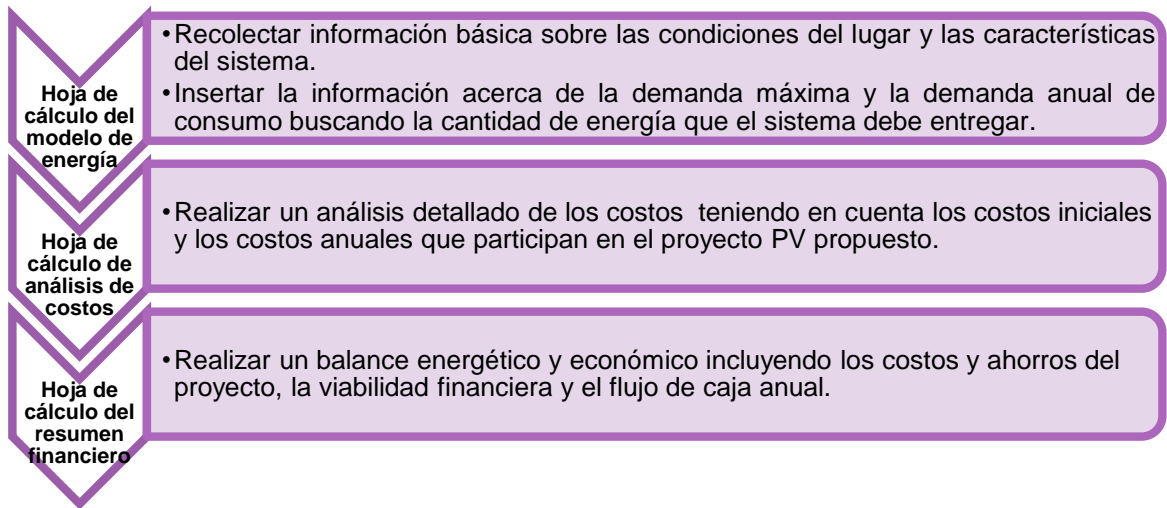
factores que no se relacionan directamente con las características del sistema, en sí: la eficiencia de conversión del sistema y los requisitos de energía de materiales como el vidrio, el aluminio y otros [57].

EVALUACIÓN ECONÓMICA SISTEMÁTICA

El modelo general de análisis tecno-económico utilizado actualmente es el TER “Tecnologías de Energía Renovable” computarizado con la herramienta de evaluación “RETSscreen”, se utiliza para la evaluación preliminar de la factibilidad técnica y la viabilidad financiera de las posibles instalaciones fotovoltaicas conectadas a la red en cualquier parte del mundo [142].

El programa de ordenador consta de un procedimiento de tres etapas para evaluar el potencial de la instalación fotovoltaica específica. La Figura D.2 muestra el diagrama de flujo de la herramienta de evaluación de la TER [142].

Figura D.2. Diagrama de flujo de la herramienta de evaluación de las TER.

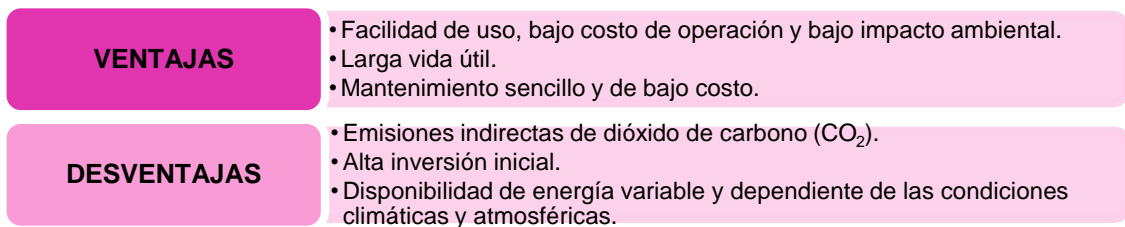


Adaptada de la fuente: (Fernández-Infantes, Contreras & Bernal-Agustín 2006).

VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA INSTALACIÓN PV

Los sistemas fotovoltaicos tienen una serie de ventajas y desventajas, las cuales se deben tener en cuenta para su viabilidad, como se observa en la Figura D.3 [57].

Figura D.3. Ventajas y desventajas de la instalación fotovoltaica.



Fuente: (Singh 2013).

ANEXO E. GENERALIDADES ENERGÍA SOLAR TÉRMICA

MÉTODOS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA TÉRMICA

Debido a la variabilidad tanto de la carga como la incidencia de los rayos de luz, es necesario buscar la forma de almacenamiento de energía en cualquiera de sus formas, buscando mayor fiabilidad del sistema. Las diferentes formas de energía que pueden ser almacenados, incluyen la energía mecánica, eléctrica y térmica.

Almacenamiento de energía mecánica

Los sistemas de almacenamiento de energía mecánica incluyen el almacenamiento de energía gravitacional o bombas hidroeléctricas de almacenamiento (PHPS), almacenamiento de energía por aire comprimido (CAES) y volantes. Estos sistemas se pueden utilizar para el almacenamiento de energía a gran escala, mientras que los (volantes) son más adecuados para el almacenamiento intermedio. El almacenamiento se descarga debido a la insuficiente oferta de la planta de carga base [144].

Almacenamiento eléctrico

El almacenamiento de energía a través de las baterías es una opción para almacenar la energía eléctrica. Una batería se carga, mediante la conexión a una fuente de corriente eléctrica continua y cuando se descarga, la energía química almacenada se convierte en energía eléctrica. Las aplicaciones potenciales de las baterías son la nivelación de carga y almacenamiento de la energía eléctrica generada por turbinas eólicas o fotovoltaicas. El tipo más común de baterías de almacenamiento es la de plomo y Ni-Cd [145], [146].

Almacenamiento de energía térmica

El sistema de almacenamiento no sólo asegura la generación de energía eléctrica en la noche, sino también influye en el inicio del sistema en la mañana. Desempeña un papel importante para hacer que la estación genere energía eléctrica de manera estable y continua. Se compone principalmente de tres partes, el medio de almacenamiento, el mecanismo de transferencia de calor y el sistema de contención [61].

La Figura E.1 muestra los diferentes tipos de almacenamiento de la energía térmica.

Figura E.1. Tipos de almacenamiento térmico de la energía.



Adaptada de la fuente: (Sharma, Tyagi, Chen & Buddhi 2009).

El medio de almacenamiento almacena la energía térmica ya sea en forma de calor sensible, calor latente de fusión o vaporización, o en forma de reacciones químicas reversibles. La energía térmica se puede almacenar como un cambio en la energía interna de un material en forma de calor sensible, calor latente y termoquímico o combinación de éstos. Hoy en día, los sistemas de almacenamiento de energía térmica más disponibles en el

mercado se basan en el almacenamiento de calor sensible utilizando tanques de almacenamiento de agua o el calor latente de almacenamiento utilizando los materiales de cambio de fase (PCM) [146].

COLECTORES PVT

Los colectores solares térmicos, se clasifican de acuerdo con el tipo de fluido de calor utilizado, el sistema PVT de agua y de aire, que son fluidos de remoción de calor. Los sistemas PVT de agua son más eficientes que los de aire, debido a la alta conductividad de calor, alta capacidad calorífica, y alta densidad que resulta en una transferencia de gran volumen. Pueden funcionar de manera eficaz en todas las estaciones, en lugares de latitudes bajas donde generalmente existen condiciones atmosféricas favorables respecto a la operación eficiente de los colectores térmicos, o en latitudes medias para evitar la congelación Pero el uso del agua requiere más modificaciones y una construcción a prueba de agua y resistente a la corrosión [62], [63].

Los Módulos fotovoltaicos refrigerados por aire pueden cubrir necesidades de calefacción y ventilación. Estos colectores operan con eficacia principalmente en lugares de latitudes medias y altas sin problemas de congelación, pero para aplicaciones de baja latitud, con altas temperaturas ambiente, el enfriamiento PV por la circulación de aire es menos eficaz [63].

Una combinación de ambos modos de extracción de calor en un dispositivo es interesante y, posiblemente, podría superar las limitaciones de los dos colectores de tipo PVT. Basándose en este principio, se ha investigado un nuevo tipo de colector PVT con la operación de extracción de

calor doble (PVT/doble) tanto para calentar el agua como calentar el aire en función de las condiciones climáticas y las necesidades de construcción [63].

PLANTA CSP

Para el diseño de la de una planta CSP se debe tener en cuenta, la selección del material de almacenamiento, el diseño de los componentes que incorporan los materiales de almacenamiento del sistema, que consiste en el diseño del sistema de tanques de almacenamiento, intercambiadores de calor, tuberías y bombas, que cumplan con los requisitos de la planta de energía [60].

El diseño general del sistema TES incluye consideraciones de eficiencia, espacio y costo. Por lo tanto, se debe tener en cuenta [60]:

- Nivel de la planta: Este nivel de diseño se centra en las necesidades de la planta CSP en general, la estrategia de diseño para cumplir con las exigencias de la instalación e integración del sistema de en la planta de energía, así como su capacidad de ser compatible con las demás unidades / sistemas central. En una planta de CSP, el desarrollo de una estrategia de diseño y operación para cumplir con los requerimientos de las plantas, por ejemplo, a largo plazo frente a almacenamiento a corto plazo, el número de horas de almacenamiento, carga / tasas de descarga y almacenamiento de cómo se integra con la captación solar debe ser considerado sistema en un lado y el bloque de potencia en el otro lado [60].

- Nivel de componentes: Este nivel de diseño se refiere a la selección de los componentes básicos que se utilizan para formar el sistema de almacenamiento de energía térmica, incluyendo material de almacenamiento,

tipo de contacto y la transferencia de calor entre el material de almacenamiento y el HTF, y las mejoras de transferencia de calor a ser incorporados [60].

- A nivel de sistema: El diseño del sistema TES se centra en la integración de los componentes, tales como tanques de almacenamiento, bombas e intercambiadores de calor, y los controles de las operaciones de carga y descarga, lo que reduce las pérdidas a nivel de sistema, mejorando la eficiencia y los costos del sistema [60].

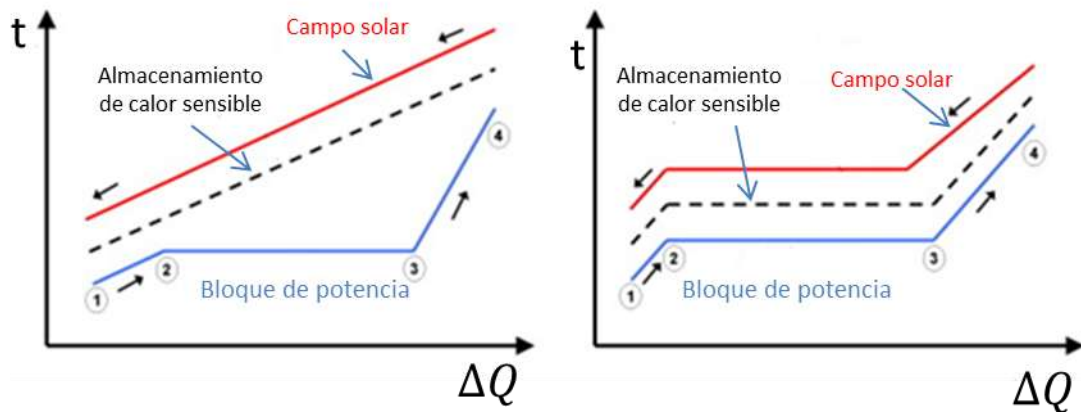
SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO PARA LA GENERACIÓN DIRECTA DE VAPOR

Los sistemas de almacenamiento eficaces exigen la adaptación de la tecnología de almacenamiento de la fuente de calor y el consumidor. Para la generación directa de vapor, hay una ventaja significativa, cuando se aplican módulos de almacenamiento adaptadas para el precalentamiento, evaporación y sobrecalentamiento. El diagrama de la izquierda de la Figura E2, muestra la curva de temperatura-entalpía para una planta de energía solar térmica con un único fluido de transferencia de calor en fase (por ejemplo, aceite térmico) [147].

El diagrama de la derecha muestra la característica correspondiente para un sistema con generación directa de vapor en los tubos usando un concepto de almacenamiento razonable / PCM combinado. Mientras que una unidad de almacenamiento sensible se utiliza para el precalentamiento y sobrecalentamiento, un almacenamiento de PCM se aplica para la evaporación. Esto implica pequeñas diferencias de temperatura entre el

fluido y el material de almacenamiento y por lo tanto, es más eficiente para almacenamiento térmico [147].

Figura E.2. Características de temperatura-entalpía para los sistemas de almacenamiento de calor sensible con sensata fluido de transferencia de calor en absorbedores (izquierda) y en combinación sensata / PCM de almacenamiento para la generación directa de vapor.



Adaptado de la fuente: (Morisson, Rady, Palomo & Arquis 2008).

ANEXO F. MODELADO SISTEMAS DE GENERACIÓN

MODELOS SISTEMA DE ENERGÍA FOTOVOLTAICO

El sistema fotovoltaico define una fuente de energía que transforma la radiación solar en energía eléctrica.

Durante el día, las radiaciones solares que llegan a la superficie exterior de la atmósfera se dividen en haz y las radiaciones difusas a través de la atmósfera llegan a la superficie de la tierra. La radiación de haz, difusa y reflejada desde el suelo contribuye energía al módulo PV determinada por los ángulos de incidencia. Además del nivel de la radiación solar, la temperatura del módulo fotovoltaico también afecta a la potencia de salida. El comportamiento local de la radiación incidente sobre la tierra está indicado por el índice de claridad al azar, y una vez que se muestrea, se determina la radiación local total [83].

Modelo 1. Generador fotovoltaico

La potencia de salida del generador fotovoltaico se determina por la relación efectiva absorbida solar, $S_{ratio} = S / S_{ref}$, la temperatura del módulo T_{mod} , y la tensión de funcionamiento V_{mod} . Bajo las condiciones de referencia, $G_{ref} = 1000 \text{ W/m}^2$, $m = 1,5$, y $T_{mod} = 25^\circ \text{ C}$, la masa de aire modificador, es igual a 1, por lo que $S_{ref} = M_{air}$.

Sobre la base del circuito equivalente, la característica I-V del módulo fotovoltaico está dada por [83].

$$I_{PV} = I_L - I_d \left(\exp \left(\frac{V_{PV} + I_{PV} R_s}{a} \right) - 1 \right) - \frac{V_{PV} + I_{PV} R_s}{R_{sh}} \quad (F.1)$$

Donde, I_L es la corriente de luz, I_d es la corriente inversa del diodo, R_s es la resistencia serie y R_{sh} es la resistencia shunt.

$$E_{pv}^t = P_{pv}^t \Delta t \quad t = 0, \dots, T - 1 \quad (F.2)$$

Modelo 2. Generador fotovoltaico

La condición de funcionamiento de máxima potencia de salida para un panel es obtenida a una radiación de 1000 W/m^2 a $25 \text{ }^\circ\text{C}$ de temperatura ambiente, está dada por [82]:

$$P_m = V_m I_m \quad (F.3)$$

La tensión y corriente máxima están dada por [82]:

$$V_m = V_T N_s \cdot \ln \left(1 + \frac{I_{SC} - I_m}{I_{SC}} \left(e^{\frac{V_{OC}}{V_T N_s}} - 1 \right) - I_m \cdot R_s \right) \quad (F.4)$$

$$I_m = I_{mpr} \frac{G}{1000} (1 + \alpha_{mpr} \cdot (T_{cell} - T_r)) \quad (F.5)$$

Donde, V_T es el voltaje térmico, N_s es el número de células por panel, V_{oc} es el voltaje de circuito abierto, I_{sc} es el voltaje de corto circuito, R_s es la resistencia en serie de la célula, I_{mpr} es la corriente a condiciones SCT, G la

insolación, α_{mp} es el coeficiente termico a máxima corriente de salida, T_r es la temperatura de referencia, T_{cell} es la temperatura de la celula, NOCT es la temperatura de la célula a SCT, T_a es la temperatura [82].

Modelo 3. Potencia y energía modelado fotovoltaico

La generación de energía solar para cualquier radiación se puede predecir mediante el uso de la siguiente ecuación [81].

$$P = A_{pv}x^2 + B_{pv}x + C_{pv} \quad (F.6)$$

Donde, x es la radiación en $[W/m^2]$, P es la potencia generada en $[W]$ y A , B , C son constantes que se pueden derivar a partir de datos medidos. Esta ecuación también es útil para la estimación de los paneles fotovoltaicos solares adecuados para las diferentes cargas [81].

Modelo 4. Potencia de salida generador solar

La potencia de salida por hora de generador solar está dada por la expresión [80]

$$P_{pv} = \eta_{pv}N_{pvp}N_{pvs}V_{pv}I_{pv} \quad (F.7)$$

Donde, η_{pv} la eficiencia de la conversión de un módulo fotovoltaico, V_{pv} la tensión de funcionamiento del módulo, I_{pv} corriente de operación del módulo, N_{pvp} , N_{pvs} , el número de células solares en paralelo y serie, respectivamente [80].

MODELOS ENERGÍA SOLAR TÉRMICA

A continuación se muestran los modelos para energía solar térmica.

Modelo 1. Potencia térmica útil

La potencia térmica útil P_{th} se puede aproximar por la siguiente ecuación:

$$P_{th} = \dot{m}C_p(T_{out} - T_{in})/A_{col} \quad (F.8)$$

Donde, \dot{m} es la tasa de flujo de masa del líquido, C_p es la capacidad calorífica del fluido, $(T_{out} - T_{in})$ es la diferencia de temperatura de entrada y salida del fluido y A_{col} es el área de absorción del colector [148].

Modelo 2. Eficiencia de sistema térmico

La eficiencia de un sistema térmico está dada por la ecuación:

$$n = \rho \cdot Q C_p \cdot (T_{fluido\ salida} - T_{fluido\ entrada}) / (\varphi \cdot S) \quad (F.9)$$

Donde, ρ es la densidad del agua, Q el caudal volumétrico, C_p la capacidad térmica, φ la irradiancia solar del colector con un área de superficie S .

MODELOS DE ENERGÍA EÓLICA

Una gran cantidad de factores afectan la capacidad en el viento debido a la radiación solar. Gracias al efecto de la convección de calor, la velocidad del viento se fortalece después de la salida del sol, llega a la cima después del mediodía solar, y baja al mínimo después de la puesta del sol. Este estado versátil de la velocidad del viento, afecta de manera significativa el

desarrollo y la producción de energía por parte de un sistema eólico, y permite un alto grado de incertidumbre de la potencia generada [83].

La energía del viento es proporcional al cubo de la velocidad, pero la potencia de salida real del proceso se reduce debido a la transmisión mecánica, la relación de velocidad de la punta, el ángulo de paso del álabe de turbina y el efecto de límite de Betz. Las características de la conversión de energía dependen de los radios de la cuchilla y deben determinarse ya que el modelo de estimación numérica encuentra todas las soluciones con base en estas y los dispositivos del sistema [83].

Buscando darle solución al desconocimiento de producción de energía en un sistema eólico, surgen modelos que intentan predecir la velocidad del viento por largos periodos de tiempo de manera confiable [55].

Modelo 1. Formulación de la energía del viento

En la energía eólica, E es equivalente al flujo de la masa de aire en movimiento, m la energía cinética con una velocidad v como [140]:

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (F.10)$$

Dado que, la medición de m es casi imposible, en la aerodinámica se puede expresar en términos del volumen V. Es preferible convertir el volumen a masa específica $\rho = m/V$. El volumen puede ser expresado como $V=A*L$ en la que A es la sección transversal de control vertical y L es la distancia horizontal. Físicamente, $L=v*t$ y su sustitución en la ecuación anterior lleva a [140].

$$E = \frac{1}{2} \rho A t v^3 \quad (\text{F.11})$$

Habitualmente, es preferible tener en cuenta la energía eólica en unidad de superficie vertical por unidad de tiempo como unidad de energía eólica E_u [140].

$$E_u = \frac{1}{2} \rho v^3 \quad (\text{F.12})$$

La densidad del aire se asume como una constante igual a 1.263 kg/m³ al nivel del mar. Esta expresión es válida para las mediciones instantáneas de la densidad del aire y velocidad del viento en un sitio dado. Por otro lado, las posibles variaciones al azar, en consideración la densidad del aire y velocidad del viento pueden dar lugar a una expresión paramétrica general de la energía del viento en la forma de una función de potencia como [140].

$$E = aV^b \quad (\text{F.13})$$

Donde a y b son referidos como los parámetros de escala y potencia, respectivamente. Estos parámetros son reflejos de las variabilidades regionales en las evaluaciones reales de energía eólica. Las características homogéneas y teóricas del aire conducen a asumir los valores de a y b como: $a=0,62$ y $b=3$ [140].

La velocidad del viento también se puede expresar en términos de la velocidad media del viento W y la fluctuación plazo, como [140]:

$$E = \frac{1}{2} \rho (W^3 + 3W\sigma_e^2) \quad (\text{F.14})$$

Donde σ_e es la desviación estándar de la velocidad del viento. Una mejora adicional en los cálculos de energía eólica se puede lograr teniendo en cuenta la dependencia de la densidad del aire en los cambios de presión y temperatura [140].

Modelo 2. Conversión de la energía del viento

La energía eólica se puede transformar en energía eléctrica por la turbina eólica, y la potencia de salida del proceso de conversión de energía eólica (WEC) se determina por la presión de aire dinámica, el área efectiva abarcada por las cuchillas giratorias, y el coeficiente de potencia de la turbina de viento. Donde entre mayor sea el largo de las cuchillas mayor será el área barrida por el rotor que conduce a las salidas de energía. El coeficiente de potencia de la turbina eólica se puede definir como sigue [83].

$$P_w = 0.5C_p\rho AW_{rand}^3 \quad (F.15)$$

La turbina eólica de eje horizontal necesita una paleta para obtener el área efectiva de $0,25 D^2\pi$, pero la energía eólica puede accionar la turbina de viento de eje vertical en cualquier dirección por el área efectiva de DH . De acuerdo con el límite de Betz, la fracción de máxima potencia con la corriente en función del viento que se puede extraer es $16/27$ [83].

En funcionamiento, el coeficiente de potencia C_p de la turbina eólica de eje horizontal se determina por la relación de velocidad de punta y el ángulo de inclinación de acuerdo con una relación no lineal. El coeficiente de potencia obtiene su máximo de acuerdo a una relación de velocidad punta si el ángulo de inclinación es fijo; el máximo disminuirá si este ángulo aumenta. Cuando el ángulo de inclinación es cero, el coeficiente de potencia de la

turbina eólica de eje horizontal a una velocidad de punta dada λ se puede obtener [83]:

$$C_p = 1.9 \left(\frac{64}{\lambda} - 5 \right) \exp \left(-\frac{21}{\lambda} \right) \quad (\text{F.16})$$

El coeficiente de potencia de la turbina eólica de eje vertical es diferente al de la turbina eólica de eje horizontal [83].

Modelo 3. Potencia de salida de una turbina eólica

Este modelo utilizado para simular la salida de potencia de la turbina eólica es el siguiente:

$$P_{wt}^t = \begin{cases} 0 & v^t < v_c \\ P_r \frac{(v^t)^2 - v_c^2}{v_r^2 - v_c^2} & v_c \leq v^t \leq v_t \\ P_r & v_r \leq v^t \leq v_f \\ 0 & v^t > v_f \end{cases} \quad t = 0, \dots, T - 1 \quad (\text{F.17})$$

Donde v_t es la velocidad del viento pronosticada en cada intervalo de tiempo. P_r la potencia eléctrica nominal, V_c la velocidad del viento reducida, V_r la velocidad nominal del viento, y V_f el corte de la velocidad del viento. En general, las mediciones de velocidad del viento se dan a una altura diferente a la altura de buje de la turbina eólica.

La siguiente ecuación se utiliza para evaluar la velocidad del viento a la altura deseada [79]:

$$v^t = v_{data}^t \frac{\ln(H_{hub}/z)}{\ln(H_{data}/z)} \quad t = 0, \dots, T - 1 \quad (\text{F.18})$$

Donde H_{data} es la altura de la medición, H_{hub} es la altura del cubo, Z es la longitud de rugosidad de la superficie, y V_{data}^t es la velocidad del viento pronosticado a la altura de las mediciones [79].

Entonces la energía obtenida de la turbina eólica es:

$$E_{wt}^t = P_{wt}^t \Delta t \quad t = 0, \dots, T - 1 \quad (F.19)$$

Donde, E_{wt}^t es la energía producida a la salida de la turbina en un intervalo de tiempo.

Modelo 4. Producción de energía en la turbina

El método presentado es una técnica estadística simplificada, como una función de variables de entrada para el cálculo de la producción anual de energía de las turbinas eólicas de generación de energía eléctrica a gran escala [149].

Para calcular la potencia eólica disponible, se sugiere la siguiente expresión:

$$P_a = \frac{1}{2} \rho [\bar{V}^3 + 3\bar{V}\sigma^2] \quad (F.20)$$

Donde, ρ es la densidad del aire en el sitio bajo consideración, \bar{V} es la velocidad media del viento y σ^2 es la varianza de la velocidad del viento [149].

Modelo 5. Potencia salida del aerogenerador

La potencia de salida de un aerogenerador puede determinarse a partir de su curva de potencia de generación de energía contra la velocidad del viento a través de los álabes de la turbina. La Figura F.1 muestra una curva de

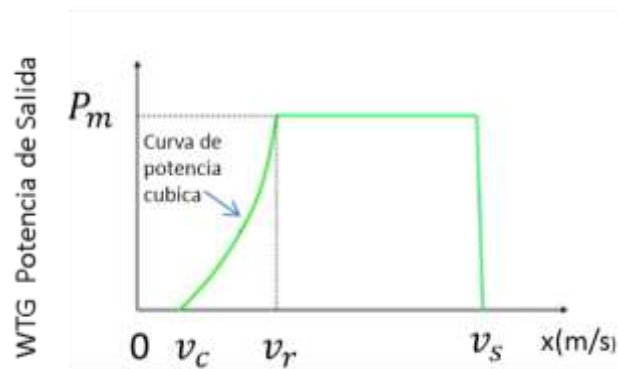
potencia de turbina eólica típica en el que están implicadas tres velocidades del viento características: v_c , v_r y v_s que son el límite de velocidad, la velocidad nominal y la velocidad de corte respetivamente [53].

La curva de potencia consta de cuatro fases: fase de operación en espera, es decir, no hay salida de potencia para ($0 < x < v_c$); fase no lineal de producción de energía para ($v_c < x < v_r$), región de potencia nominal ($v_r < x < v_s$); y fase de corte (si $x > v_s$), (el generador se apaga por protección). Básicamente, la salida de potencia P , es proporcional a la velocidad del viento cúbico para $v_c \leq x \leq v_r$. La función analítica se da como [53]:

$$P(x) = \begin{cases} 0 & 0 < x < v_c, x > v_s \\ 0,5 n_{max} \rho A x^3 & v_c \leq x \leq v_r \\ P_m & v_r \leq x \leq v_s \end{cases} \quad (F.21)$$

Donde ρ es la densidad del aire, A es el área cubierta por los álabes de la turbina y P_m la potencia nominal o máxima de salida [31].

Figura F.1. Curva de potencia del aerogenerador.



Adaptado de la fuente: (Novoa & Jin 2011).

MODELADO *PEDAL POWER*

A continuación se muestra un modelo de *pedal power*.

La velocidad angular instantánea del plato se calcula como una función del ángulo del cigüeñal como:

$$V_{nc}(\theta) = V_c \left(\frac{r_c}{r_{nc}} \right) \quad (\text{F.22})$$

Donde, V_{nc} es la velocidad angular instantánea del plato no circular a un ángulo del cigüeñal θ , V_c es la velocidad angular del plato circular (una constante basada en la restricción de frecuencia de pedaleo); r_c es el radio del plato de 42 dientes circulares; r_{nc} es el radio instantáneo de la plato no circular en cada θ .

MODELADO DE LA BATERÍA

La batería almacena energía en forma electroquímica y es el dispositivo más utilizado para los sistemas de energía híbridos. Siempre, no es posible satisfacer la demanda de carga en todo momento, el almacenamiento de energía es un futuro deseado para incorporar los sistemas de energía renovables en plantas independientes. Se puede mejorar significativamente la disponibilidad de carga, que es un requisito clave para cualquier sistema autónomo [81].

El suministro de las energías solar y eólica por hora debe cumplir con la demanda horaria, d . Esta expresión se puede formular como [150].

$$S \cdot a_s + W \cdot a_w \geq d \quad (\text{F.23})$$

Donde, S es la densidad de la energía solar en la superficie inclinada en (kW h/m^2), a_s es el área del arreglo PV, a_w el tamaño del sistema eólico. Si la ecuación anterior no se cumple, se utiliza la energía almacenada en la batería [150].

Ecuación de estado del sistema de almacenamiento

El sistema de almacenamiento funciona como un inventario para la energía eléctrica que puede ser almacenada. Específicamente, una ecuación de estado para el sistema de almacenamiento se muestra a continuación [79]:

$$\begin{aligned}
 CB^{t+1} &= CB^t + E_{wt,st}^t + E_{pv,st}^t - CH_p^t - CH_h^t - CH_e^t \quad t \\
 &= 0, \dots, T - 1
 \end{aligned}
 \tag{F.24}$$

Donde, CB^{t+1} es una variable de entrada y es el nivel de sistema de almacenamiento [kWh] al instante de tiempo, wt, wt, b son sistemas de energía fotovoltaica, eólica y biomasa respectivamente; h es el sistema de calefacción [79].

MODELADO DEL GENERADOR DIÉSEL

El uso de generador diésel es común en muchas combinaciones híbridas para asegurar la continuidad del suministro. Para un intervalo de tiempo, la tasa de combustible F , consumida por el generador diésel para la entrega de la potencia P , se expresa en general como [80]:

$$F = aP^2 + bP + c
 \tag{F.25}$$

Donde a , b , c los coeficientes de generador diésel que se obtienen a partir de los datos de los fabricantes [80].

ANEXO G. GENERALIDADES SOBRE OPTIMIZACIÓN

FORMULACIÓN GENERAL DE UN PROBLEMA LIMITADO MULTI OBJETIVO

Definición de optimalidad para problemas multiobjetivo:

Al igual que muchos ejemplos del mundo real, el problema en estudio consiste en una serie de medidas competitivas de rendimiento u objetivos. Un problema multiobjetivo en general se compone de un conjunto de n criterios f_k , $k=1, \dots, n$ a ser minimizados o maximizados. Cada f_k puede ser no lineal, pero también discontinuo con respecto a algunos componentes de las decisiones generales, variables x en un universo tridimensional U [151].

$$f(x) = (f_1(x), \dots, f_n(x)) \quad (G.1)$$

Este tipo de problema no tiene una solución única en general, sino que presenta un conjunto de soluciones no dominadas llamado conjunto Pareto-óptimo o Pareto-óptimo frontal. El concepto de denominación de Pareto se posiciona en dos reglas básicas: en el universo U dado un vector $u=(u_1, \dots, u_n)$ domina a otro vector $v=(v_1, \dots, v_n)$, si y sólo si,

$$\forall i \in \{1, \dots, n\}: u_i \leq v_i \wedge \exists i \in \{1, \dots, n\}: u_i < v_i \quad (G.2)$$

Para un problema matemático concreto, la Ecuación G.3 da la siguiente definición de la frente de Pareto: para un conjunto de n criterios, una solución $f(x)$, en relación con un vector variable de decisión $x=(x_1, \dots, x_m)$, domina otra solución $f(y)$, en relación con $Y=(y_1, \dots, y_m)$ cuando se comprueba la siguiente condición (para un problema de minimización),

$$\forall i \in \{1, \dots, n\}: f_i(x) \leq f_i(y) \wedge \exists i \in \{1, \dots, n\}: f_i(x) < f_i(y) \quad (\text{G.3})$$

En un conjunto dado de soluciones, es posible distinguir conjuntos no dominados. Esta propiedad implica una posible reducción de un problema de optimización de dimensión n, a una sola dimensión [151].

Manejo de restricciones

La optimización multiobjetivo restringida es el tipo más común de problemas en aplicaciones de ingeniería. En general, se consideran tres tipos de restricciones: la desigualdad simples (\leq), la desigualdad estricta ($<$), y la igualdad ($=$):

$$\begin{cases} g(x) \leq C_1 \\ r(x) < C_2 \\ h(x) = C_3 \end{cases} \leftrightarrow \begin{cases} \text{Restricción 1 } (x) = C_1 - g(x) \geq 0 \\ \text{Restricción 2 } (x) = C_2 - r(x) > 0 \\ \text{Restricción 3 } (x) = C_3 - h(x) = 0 \end{cases} \quad (\text{G.4})$$

Donde, (g, r, h) son funciones reales de una variable de decisión $x=(x_1, \dots, x_m)$ en un espacio U de búsqueda decisional de dimensión m y (c_1, c_2, c_3) son valores constantes [151]. En el caso más general, estas limitaciones se escriben como vectores del tipo:

$$\begin{aligned} \text{Restricción 1}(x) &= \left((C_1 - g(x))_1 \dots \dots (C_1 - g(x))_{n1} \right) \\ &= (\text{Restricción1}(x)_1 \dots \text{Restricción}_1(x)_{n1}) \\ &\geq 0 \end{aligned} \quad (\text{G.5})$$

$$\begin{aligned}
\text{Restricción } 2(x) &= \left((C_2 - r(x))_2 \dots \dots (C_2 - r(x))_{n_2} \right) \\
&= (\text{Restricción } 2(x)_2 \dots \dots \text{Restricción } 2(x)_{n_2}) \\
&> 0
\end{aligned} \tag{G.6}$$

$$\begin{aligned}
\text{Restricción } 3(x) &= ((-|C_3 - h(x)|)_3 \dots \dots -|C_3 - h(x)|_{n_3}) \\
&= 0
\end{aligned} \tag{G.7}$$

Donde, n_1, n_2, n_3 son, respectivamente, el número o la desigualdad, la desigualdad estricta y restricciones de igualdad. Esta formulación implica que cada construcción i tendrá valor negativo si y sólo si se infringe esta restricción. La conversión de la ecuación. (G.4), que es una representación clásica de las limitaciones de conjunto, a la representación de la ecuación (G.5) constituye el primer paso de una formulación unificada de problemas de optimización restringida [151]. En la práctica, debido al error de redondeo de los números reales, la restricción de igualdad restricción 3 se modifica de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
\text{Restricción } 3(x)' & \\
&= ((-|C_3 - h(x)|)_1 + \xi_1 \dots \dots -|C_3 - h(x)|_{n_3}) \\
&+ \xi_{n_3} = (\text{Restricción } 3(x)_3) - \xi
\end{aligned} \tag{G.8}$$

$$\xi = (\xi_1, \dots, \xi_{n_3}, \forall i \in \{1 \dots \dots n_3\}, \quad \xi \in \mathbb{R} \tag{G.9}$$

ξ es llamado "vector de precisión" del vector de la igualdad, y toma valores bajos (menos de 10^{-6} por ejemplo). Esta aproximación no es necesaria cuando la restricción de igualdad implica sólo variables de tipo entero o binario [151]. De las ecuaciones (G.5) a (G.8), la satisfacción de restricciones implica la maximización de restricciones violadas en los vectores Restricción 1, Restricción 2, Restricción 3.