

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO – CHILE
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**METODOLOGÍAS DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE ABASTECIMIENTOS EN
ZONAS INSULARES**

Carlos Andrés Fuentes Lobos

**INFORME FINAL DEL PROYECTO
PRESENTADO EN CUMPLIMIENTO DE
LOS REQUISITOS PARA OPTAR AL
TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO**

JUNIO DE 2017

**METODOLOGÍAS DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE ABASTECIMIENTOS
EN ZONAS INSULARES**

INFORME FINAL

Presentado en cumplimiento de los requisitos
para optar al título profesional de
INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO
otorgado por la
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
de la
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO

Carlos Andrés Fuentes Lobos

Profesor Guía:	Sr. Patricio Robles Calderón
Profesor Correferente	Sr. Paulino Alonso Rivas

JUNIO DE 2017

ACTA DE APROBACIÓN

La Comisión Calificadora designada por la Escuela de Ingeniería Eléctrica ha aprobado el texto del Informe Final de Proyecto de Titulación, desarrollado entre el Segundo Semestre de 2014 y el Primer Semestre de 2015 y denominado

METODOLOGIAS DE SISTEMAS ELECTRICOS DE ABASTECIMIENTOS EN ZONAS INSULARES

Presentado por el Señor
Carlos Andrés Fuentes Lobos

Sr. Patricio Robles Calderón
Profesor Guía

Sr. Paulino Alonso Rivas
Segundo Revisor

Sr. Sebastián Fingerhuth Massmann
Secretario Académico

Valparaíso, JUNIO DE 2017

AGRADECIMIENTOS

Gracias a mis padres y hermanos que siempre me acompañaron durante esta etapa de mi vida.

Gracias a mi madre que en ausencia de su apoyo este proceso no habría posible.

Gracias a mis amigos por ser pilares fundamentales en los que construyo mi vida.

METODOLOGÍAS DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE ABASTACIMIENTO EN ZONAS INSULARES

CARLOS ANDRÉS FUENTES LOBOS

Profesor Guía Sr. Patricio Robles Calderón

RESUMEN

El presente trabajo de título tiene como objetivo la implementación de una planta de generación de energía eléctrica a través de recursos eólicos y estiércol de bovino en las islas Robinson Crusoe y Quenu. Este estudio pretende buscar soluciones a los altos costos de operación del sistema actual de generación eléctrica, así como abordar las problemáticas sociales y ambientales.

En este trabajo, se describe las islas Robinson Crusoe y Quenu bajo los siguientes puntos: la situación geográfica, información demográfica y social, además se describe el comportamiento climático, el sistema actual de generación eléctrica y se determinan las demandas energéticas de las islas en estudio.

En segundo lugar se evalúan los antecedentes de la velocidad del viento de las islas, para obtener los indicadores como la velocidad media anual y diaria, las cuales nos permiten estimar el contenido energético de los aerogeneradores. En el caso de la generación de energía eléctrica a partir de biogás desarrollado por el proceso de digestión anaerobia del estiércol de bovino, este depende de las características del estiércol.

El tercer punto de este estudio fue realizar un dimensionamiento de las centrales eólicas y biomasa. En el caso de la generación eólica, se debe proceder en primer lugar a seleccionar el aerogenerador a utilizar en la planta. Con respecto a la generación eléctrica por biomasa lo importante es conocer el número de bovinos para satisfacer la demanda energética. Posteriormente, se indica el lugar más apto dentro de la isla para ubicar los sistemas eólicos o de biomasa.

En el último punto, se realizó un estudio económico, que permite apreciar aspectos como: inversión inicial, costos operación y los ingresos generados por el proyecto, lo cual permite conocer y analizar la viabilidad de este.

Finalmente, se determinó la posibilidad de realizar los proyectos eólicos en las islas Robinson Crusoe y Quenu. En el caso del proyecto de biomasa su alto consumo de energía eléctrica lo hace poco rentable para reproducirlos en las zonas insulares del país.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1

ASPECTOS GENERALES ERNC EN CHILE

1.1	Fuentes de energías renovables no convencionales	1
1.2	Situación en Chile	2
1.3	Legislación aplicable a los purines en Chile	2
1.4	Indicadores a nivel mundial energía eólica	4
1.5	Indicadores a nivel mundial energía biomasa	4

CAPÍTULO 2

GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA POR FUENTE EÓLICA

2.1	Desarrollo histórico de sistemas eólicos	6
2.2	Origen del viento	7
2.2.1	Vientos dominantes	7
2.2.2	Vientos locales	8
2.3	Fuentes de información del recurso eólico	8
2.3.1	Inspección visual	8
2.3.2	Mapas eólicos	8
2.3.3	Estacionales Meteorológicas	9
2.3.4	Perfiles diarios y por estaciones del año	9
2.4	Aerogeneradores	9
2.5	Turbinas de eje vertical	10
2.6	Turbinas de eje Horizontal	10
2.7	Torres y estructuras de soporte	11
2.8	Origen del viento y sus manifestaciones	12
2.8.1	Clases de vientos	12
2.8.2	Distribución de Probabilidad de Weibull	13
2.9	Energía Utilizable del Viento: Ley de Betz	14
2.10	Aplicaciones de la Energía eólicas	15
2.10.1	Bombeo de Agua	15
2.10.2	Aplicaciones térmicas	15
2.10.3	Sistemas Aislados	15
2.10.4	Sistema Híbrido Aislado	16
2.10.5	Sistemas conectados a la red	16
2.11	Parques eólicos	18

CAPÍTULO 3

GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA POR FUENTE BIOMASA

3.1	Biomasa	19
3.2	Estiércol de Vacuno	19
3.3	Tratamientos aplicables a los purines	20
3.4	Biogás	21

3.4.1	El dióxido de carbono en el biogás.	21
3.4.2	Nitrógeno y Oxígeno presentes en el biogás	22
3.4.3	Amoníaco presente en el biogás	22
3.4.4	Ácido Sulfhídrico presentes en el biogás	22
3.4.5	Siloxenos presentes en el biogás	22
3.4.6	Biodigestores	23
3.5	Digestión Anaerobia	23
3.5.1	Hidrólisis	24
3.5.2	Etapa Acidogénica	25
3.5.3	Etapa Acitogenica	25
3.5.4	Etapa Metanogénica	26
3.6	Factores que influyen en la producción de biogás	26
3.7	Resumen del proceso	29

CAPÍTULO 4

CASO DE ESTUDIO ISLA QUENU

4.1.1	Aspectos generales de la isla Quenu	33
4.1.2	Situación social	33
4.2	Estimación de la demanda	34
4.3	Estudio de generación eléctrica por biogás	36
4.3.1	Diseño del tanque de almacenamiento	36
4.3.2	Diseño del digestor	37
4.3.3	Requerimientos de calor para el digestor	38
4.3.4	Diseño del intercambiador de calor de doble tubo	40
4.3.5	Diseño de planta de biomasa	46
4.3.6	Conducción del biogás	47
4.3.7	Antorcha de biogás	47
4.3.8	Determinación de potencia de una bomba	48
4.3.9	Determinación de potencia de los agitadores	48
4.3.10	Calculando la potencia de soplates	49
4.3.11	Sistema de generación de energía eléctrica	50
4.3.12	Balance de masa y energía	50
4.3.13	Consumo energético del establo de los bovinos	53
4.4	Estudio de sistema híbrido eólico-diésel	53
4.4.1	Selección del lugar	53
4.4.2	Análisis de los datos de los vientos	54
4.4.3	Características del sitio	54
4.4.4	Características del Aerogenerador Bergey Excel-R	55
4.5	Estimación de energía no servida con fuente renovable	57
4.6	Funcionamiento de la Planta	58
4.6.1	Sistema híbrido aislado	58

CAPÍTULO 5

CASO DE ESTUDIO ISLA ROBINSON CRUSOE

5.1.1	Situación geográfica	60
5.1.2	Información demográfica	60
5.1.3	Situación social	60
5.1.4	Situación climática	61
5.2	Estimación de la demanda	62
5.3	Costo del combustible diésel	63
5.4	Selección del lugar del aprovechamiento eólico	63
5.5	Análisis de los datos de los vientos	64
5.5.1	Características del sitio	64
5.6	Características de 2 aerogeneradores seleccionados	64
5.6.1	Aerogenerador Enercon E-33/330 kW	65
5.6.2	Aerogenerador tipo Vergnet MP C/R	67
5.6.3	Selección de aerogenerador más adecuado	69
5.7	Estimación de energía no servida con fuente eólica	69
5.8	Funcionamiento de la Planta	69

CAPÍTULO 6

ESTUDIO ECONÓMICO EN LAS ISLAS

6.1	Evaluación del costo de electrificación con sistema híbrido isla Quenu	71
6.1.1	Costo de inversión del sistema híbrido eólico-diésel isla Quenu	72
6.1.2	Costos fijos sistema eólico diésel isla Quenu	72
6.1.3	Evaluación técnica económica de isla Quenu	72
6.2	Evaluación económica fuentes eólicas isla Robinson Crusoe	73
6.2.1	Estudios de costos isla Robinson Crusoe	75
6.2.2	Beneficios generados por el proyecto isla Robinson Crusoe	76
6.2.3	Estudio financiero del proyecto eólico isla Robinson Crusoe	77

CONCLUSIONES	79
--------------	----

BIBLIOGRAFÍA	81
--------------	----

APÉNDICE A

VIENTOS Y POTENCIAS DE AEROGENERADORES

A.1	Introducción	A-2
A.2	Ciclos medios de los vientos	A-2
A.3	Ciclos medios de potencia de los aerogeneradores	A-4

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2-1 Distribución de Weibull	14
Fig. 3-1 Diagrama del Proceso de Digestión Anaerobia.	30
Fig. 3-2 Intercambiador de doble tubo.	31
Fig. 3-3 Sistema de Cogeneración CHP.	32
Fig. 4-1 Archipiélago de Calbuco	34
Fig. 4-2 Distribución de frecuencia isla Quenu	55
Fig. 4-3 Curva de potencia Berkey Excel- R.	56
Fig. 5-1 Archipiélago Juan Fernández	61
Fig. 5-2 Distribución de frecuencia isla Robinson Crusoe.	65
Fig. 5-3 Curva de potencia Enercon E-33/330 KW	66
Fig. 5-4 Curva de potencia Vergnet MP C/R	68

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Clasificación de vientos	13
Tabla 2-2 Parques eólicos en Chile.	18
Tabla 3-1 Características del estiércol producido diariamente.	20
Tabla 3-2 Parámetros operacional seleccionado para el diseño	20
Tabla 3-3 Composición del biogás	29
Tabla 4-1 Cuadro resumen del sistema.	35
Tabla 4-2 Proyección del consumo de energía isla Quenu.	35
Tabla 4-3 Requerimientos de potencia isla Quenu.	36
Tabla 4-4 Dimensionamiento del tanque de almacenamiento.	37
Tabla 4-5 Datos del diseño del digestor.	38
Tabla 4-6 Parámetros para el cálculo del intercambiador de calor.	40
Tabla 4-7 Requerimientos de calor para la planta.	41
Tabla 4-8 Área de flujo y diámetro del intercambiador de calor.	43
Tabla 4-9 Diseño de los intercambiadores de calor.	46
Tabla 4-10 Diseño de planta de biomasa.	47
Tabla 4-11 Capacidad de las tuberías.	47
Tabla 4-12 Capacidad de la antorcha de biogás.	48
Tabla 4-13 Parámetros y potencia de la bomba de alimentación.	48
Tabla 4-14 Datos y potencia de agitadores.	49
Tabla 4-15 Diseño de los sopladores para la eliminación de azufre.	50
Tabla 4-16 Balance energético.	50
Tabla 4-17 Resultados de balance de masa y energía.	53
Tabla 4-18 Características principales del sitio seleccionado.	54
Tabla 4-19 Velocidad del viento a 25 metros.	55
Tabla 4-20 Características del aerogenerador Bergey Excel-R.	56
Tabla 4-21 Potencia a 25 metros.	57
Tabla 4-22 Consumo de combustible grupos electrógenos Diperk.	58
Tabla 4-23 Estimación de energía producida por sistema híbrido.	59
Tabla 5-1 Cuadro resumen del sistema actual de diésel.	62
Tabla 5-2 Consumo de combustible y generación de energía eléctrica.	63
Tabla 5-3 Características principales del sitio seleccionado.	64
Tabla 5-4 Velocidad del viento a 35 metros.	65
Tabla 5-5 Características del aerogenerador Enercon.	66
Tabla 5-6 Potencia a 35 metros.	67
Tabla 5-7 Características del aerogenerador Vergent.	67
Tabla 5-8 Potencia a 35 metros.	68
Tabla 5-9 Estimación de energía producida por sistema híbrido.	70
Tabla 6-1 Costos de planta híbrido eólica-diésel isla Quenu.	72
Tabla 6-2 Costos fijos sistema híbrido isla Quenu.	73
Tabla 6-3 Costo total sistema híbrido eólico-diésel isla Quenu.	75
Tabla 6-4 Costo central eólica isla Robinson Crusoe.	76
Tabla 6-5 Costos y beneficios de planta eólico isla Robinson Crusoe.	77

GLOSARIO DE TÉRMINOS

CER:	Centro de Energías Renovables
ERNC:	Energías Renovables No Convencionales
HAWT:	Turbina eólica de eje horizontal
SIC:	Sistema Interconectado Central
SING:	Sistema Interconectado del Norte Grande
VAWT:	Turbina eólica de eje vertical
CHP:	Cogeneracion de energia térmica y eléctrica

INTRODUCCIÓN

Debido a la diversidad de la geografía, existen zonas aisladas de los sistemas interconectados centrales de la electricidad, los cuales, en su mayoría, son alimentados por grupos electrógenos en base a combustibles fósiles.

Las energías renovables no convencionales, se presentan como una posible solución, al problema de los altos precios de combustibles fósiles, emisión de contaminantes producto de su quema, dependencia de países extranjeros, factores geopolíticos y posible agotamiento de este recurso en el mediano plazo.

Las ERNC corresponden a energías limpias y de fuentes inagotables que pueden ser la solución a la problemática energética. Entre estas se encuentran la energía eólica, la energía hidráulica, la energía solar, la energía solar fotovoltaica y solar térmica, la energía de biomasa y la energía marina.

En esta memoria nos concentraremos en la generación de energía eléctrica a partir de biogás obtenido de la digestión anaeróbica de estiércol de bovino y la generación de energía eléctrica mediante el aprovechamiento de energía eólica, como posibles soluciones a la problemática energética en la zona insular.

CAPÍTULO 1

ASPECTOS GENERALES ERNC EN CHILE

La maduración tecnológica de las ERNC y el aumento de los precios de la energía, son parte de las condiciones que han ayudado al desarrollo de estas energías. Las medidas realizadas por el Estado, en la eliminación de alguna de las barreras que restringen el desarrollo de proyectos basados en ERNC. Esto se ha logrado mediante la revisión y el mejoramiento del marco regulatorio del mercado eléctrico chileno.

1.1 Fuentes de energías renovables no convencionales

Según lo expuesta en el artículo 225 de la LGSE, los medios de generación de generación renovables no convencionales poseen las siguientes características:

- Aquellos cuya fuente de energía primaria sea la energía de la biomasa correspondiente a la obtenida de materia orgánica y biodegradable, la que puede ser usada directamente como combustible o convertida en otros biocombustibles líquidos, sólidos o gaseosos. Se entenderá incluida la fracción biodegradable de los residuos sólidos domiciliarios y no domiciliarios.
- Aquellos cuya fuente de energía primaria sea la energía hidráulica y cuya potencia máxima sea inferior a 20.000 kW.
- Aquellos cuya fuente de energía primaria sea la energía geotérmica, entendiéndose por tal la que se obtiene del calor natural del interior de la tierra.
- Aquellos cuya fuente de energía primaria sea la energía solar, obtenida de la radiación solar.
- Aquellos cuya fuente de energía primaria sea la energía eólica, correspondiente a la energía cinética del viento.
- Aquellos cuya fuente de energía primaria sea la energía de los mares, correspondiente a toda forma de energía mecánica producida por el movimiento de las mareas, de las olas y de las corrientes, así como la obtenida del gradiente térmico de los mares.
- Otros medios de generación determinados fundadamente por la Comisión Nacional de Energía, que utilicen energías renovables para la generación de electricidad, contribuyan a diversificar las fuentes de abastecimiento de energía en los sistemas eléctricos y causen un bajo impacto ambiental, conforme a los procedimientos que establezca el reglamento.

1.2 Situación en Chile

La ley 20.257 establecía que toda empresa generadora convencional perteneciente al SIC o al SING, y con capacidad instalada mayor a 200 MW debía comercializar un 10% de su energía a base de ERNC, ya sea por generación propia o contratada a terceros, para el año 2024. Este porcentaje se planificó de la siguiente manera: un aumento gradual del 5%, entre el 1 de enero de 2010 y el 31 de diciembre de año 2014; luego con incrementos fijos del 0,5% anual hasta el 2024. Sin embargo, en octubre de 2013 se promulgó la Ley 20.698, que modifica el porcentaje de la anterior ley de 10% a un 20% para el año 2025 con el siguiente detalle: definir una base del 5% de generación nacional en base a ERNC para el 2013, con incrementos anuales del 1% a partir de 2014 hasta llegar al 12% en 2020, luego desde 2021 la cuota anual será del 1,5% hasta 2024 para finalizar con un incremento del 2% en 2025 [1].

Actualmente la capacidad nacional instalada en base a ERNC llega al 7,43% (1.414 GW) del total, que es conformado por energía eólica, solar, de biomasa, y pequeñas hidráulicas. La matriz eólica se posiciona en el segundo lugar de la generación en base a ERNC, pero en referencia a las predicciones del CER, la energía eólica superará por fin a la basada en biomasa para finales de este año. Anexo al recurso viento, cabe destacar la penetración que tendrán la primera tecnología geotérmica en Chile con las centrales Curacautín y Cerro Pabellón de potencias nominales de 70 MW y 50 MW respectivamente; así como el apogeo paulatino que mantendrá la generación solar dentro de los próximos años, debido a que el estado de proyectos de esta índole supera la potencia neta de los 6 [GW] con RCA aprobado [2].

Como consecuencia directa de las leyes en pro de las ERNC, la condición de los proyectos eólicos en Chile está representada por 421 MW en operación (equivalente a un 2,21% del total nacional), 671 MW en construcción, el Servicio de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) ha declarado 4359 MW con Resolución de Calificación Ambiental (RCA) aprobada sin construir, y 1624 MW aún en calificación [3].

Para el estudio de ERNC en esta tesis se descartó la posibilidad de realizar un proyecto mareomotriz, debido al alto costo que este posee y además, esta tecnología al no contar con un prototipo homogéneo, actualmente no resulta razonable realizar un proyecto para ser implementado. Tampoco se incluye un estudio de generación con energía solar para las dos islas. En la Isla Quenu no resulta conveniente implementar esta tecnología debido a su clima, no se encuentran meses que no sean lluvioso y la radiación solar es muy pobre, dejando la energía eólica como una mejor alternativa al contar con una excelente calidad de vientos. En el caso de la Isla Robinson Crusoe, al necesitar una gran cantidad de espacio para instalar los módulos fotovoltaicos, se necesita visitar la isla para conversar con los pobladores de forma de tener mayor información sobre el uso de suelo de la zona insular.

1.3 Legislación aplicable a los purines en Chile

En la actualidad, no existe normativa que señale como se deben tratar los purines, sin embargo, su acumulación y disposición puede provocar daños a los suelos, por lo tanto, se infringen algunas normas de la legislación chilena. A continuación se describen las principales normas que están relacionadas con esta actividad.

- **Norma Chilena Oficial NCh.1.333**, Requisitos de Calidad de Agua para Diferentes Usos.
- **Decreto con fuerza de ley N° 294**. Establece funciones y estructuras del ministerio de agricultura. Ministerio de hacienda. Diario Oficial del 5 de abril de 1960.
- **Decreto Ley N° 3.557** de 1980 del Ministerio de Agricultura, que establece Disposiciones sobre Protección del Suelo, Agua y Aire. Este decreto establece los requerimientos que deben tener los envases de fertilizantes que son utilizados en la agricultura, para que no existan errores en las compras de los distintos productos, debiendo utilizarse aquello que no causen daño al medio ambiente y sean asimilados correctamente por los cultivos.
- **D.F.L N° 725** de 1967 del Ministerio de Salud, [link](#) Código Sanitario, Diario Oficial, 31.01.1968. Artículos 71, 72 ,73 y 75.
- **Decreto Supremo N°46/2002**. Norma de emisión de residuos líquidos a aguas subterráneas. Esta norma, en el artículo 2 establece que no es aplicable a las labores de riego, se debe cuidar el rebalse de los sistemas de tratamiento o almacenamiento y todo tipo de escurrimiento superficial que pueda ser potencial contaminante de los cursos superficiales.
- **Decreto Supremo N° 351** de 1992 del Ministerios de Obras Públicas, Diario Oficial, 17.02.1988. “Reglamento para la Neutralización y Depuración de los Residuos Líquidos Industriales a que se refiere la Ley N°3.133 “Modificado por el Decreto Supremo N°1.172/98.
- **Decreto Supremo N°90/01**. Establece norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales. Se debe tener especial cuidado en el destino de descargas del agua tratada, la cual solo puede ser depositada a los cursos superficiales cercanos con concentraciones inferiores a las que establecen la norma.
- **Decreto Supremo N°745/92, art.16**. Prohibición de Descarga de Residuos en Cursos de Agua. Esta prohibición de descarga de residuos en cursos de agua, está contenida en uno de los principales decretos que deben ser considerados y evaluados durante del desarrollo de este proyecto ya que uno de los problemas que presenta el Fundo Santa Teresa es el rebalse de los purines hacia cursos de agua superficiales y por ende se encuentra infringiendo la ley.

- **Decreto Supremo N°30** de 1997 del Ministerio Secretaria General de la Presidencia. Reglamento del sistema de Evaluación de Impacto Ambiental.
- **Ley 19.300 “Bases Generales del Medio Ambiente “.** Ministerio Secretaria General de la Presidencia. Diario Oficial, 09.04.94. La ley de las Bases del medio ambiente reconoce el derecho de las personas de vivir en un ambiente libre de contaminación, por lo que cualquier tipo de empresa debe respetar el derecho de las personas, incluyendo las pequeñas y medianas empresas, evitando la contaminación y de degradación del medio ambiente.
- **Norma NCh 1.333/Of .87.** Requisitos de Calidad de Agua para Diferentes Usos. Esta norma es directamente aplicable a todos los predios.

1.4 Indicadores a nivel mundial energía eólica

Según los resultados realizados por la World Wind Energy Association para el año 2013, la capacidad de generación eólica mundial instalada alcanzó los 318,529 GW, lo que corresponde cerca del 4% de la generación global.

Al finalizar el año 2013, los países que actualmente utilizan la energía eólica dentro de su matriz energética son 103, donde las cinco naciones líderes en capacidad instalada de este mercado son China con 91,324 GW, EE.UU. generando 61,108 GW, Alemania produciendo 34,66 GW, España con 22,959 GW, e India con 20,15 GW. Mientras que en América latina el líder es Brasil con 3,399 GW, seguido por México con 1,992 GW, luego Chile y Argentina con una generación que no supera los 500 MW.

La distribución continental de la generación eólica a la fecha se segrega principalmente en Europa y Asia con una capacidad instalada del 37% mundial cada uno, notándose increíblemente el desarrollo de proyectos por parte China que en 2012 y 2013 años ha mantenido un índice de crecimiento interno del 20%, es decir, ha construido parques por un total de 13 GW y 16 GW a fines de los respectivos años pudiendo por primer lograr que las nuevas inversión en energías renovables supera a la inversión en combustibles fósiles para la producción de energía. América del Norte por su parte, produce el 22% del total eólico global, aportando EE.UU. con el 19%. En tanto el centro-sur de América, Oceanía y África en conjunto sólo representan el 4% de la totalidad mundial instalada [4].

Dentro de los países que cuentan con mayor generación eólica destacan Dinamarca con 34% (4.772 GW) de su capacidad instalada, España con un 21% (22.959 GW), Portugal con un 23% (4.724 GW) e Irlanda con el 16% (2.037 GW); lo que implícitamente lleva a concluir que los países desarrollados apuestan por una matriz energética más limpia.

1.5 Indicadores a nivel mundial energía biomasa

Según la IEA indican que la generación de electricidad a partir de biomasa debiera crecer desde el actual 1,3% a un 5% para el año 2050. En términos absolutos, el crecimiento neto podría ser 5-8 veces la producción actual, con un importante efecto en la reducción de

emisiones de gas efecto invernadero. Esto no parece ser considerable comparado con el potencial estimado total, 10%-20% de la energía primaria para el 2050, donde la biomasa también es usada para generación de calor y para producir combustibles para el transporte.

Las principales barreras para su implementación apuntan a la baja eficiencia de conversión, la disponibilidad y transporte de la biomasa, y la escasa logística de suministro y los riesgos asociados a la agricultura intensiva.

En Chile en la actualidad los procesos de generación de electricidad existentes se basan de manera principal en la combustión directa de la biomasa. Adicionalmente, existen proyectos de generación a partir de la combustión de gases obtenidos a partir de procesos de transformación de la biomasa, como la extracción de biogás desde vertederos o sistemas de tratamiento anaeróbico.

CAPÍTULO 2

GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA POR FUENTE EÓLICA

El viento como fuente energética, tiene todas las facilidades y ninguno de los inconvenientes que a menudo presentan otras formas de energía. Es gratuito, limpio y de bajo mantenimiento. Es un subproducto de la energía solar y además está caracterizado por dos grandes variables, las cuales son la velocidad y la dirección del viento.

2.1 Desarrollo histórico de sistemas eólicos

El viento ha sido utilizado por el hombre como fuente de energía durante miles de años, iniciando con las primeras embarcaciones impulsadas a vela empleadas por los antiguos egipcios hace más de cinco mil años, así como la clásica aplicación para moler el grano a través de molinos de viento desde la Edad Antigua, y para el bombeo de agua utilizado en la Europa de la Época Moderna para drenar las aguas de territorios antes inundados, cuya utilidad data hasta el día de hoy.

La energía eólica es la energía cinética de una masa de aire en movimiento, producto de una diferencia de temperatura originada por el calentamiento desigual sobre ellas a causa del Sol, lo que provoca en la atmósfera las corrientes de aire. La energía eólica es por consiguiente, y de manera indirecta, un pequeño porcentaje de la energía solar que es irradiada al planeta, al igual que el petróleo, el gas natural, el carbón, la biomasa y la energía hidráulica.

El avance más significativo en materia científica fue la primera turbina eólica utilizada para producir electricidad construida por el Estadounidense Charles F. Brush en 1889 [5], cuyo diseño sentó las bases de las actuales turbinas fabricadas en el mercado a pesar de ser un modelo experimental.

La implementación a gran escala de los aerogeneradores tuvo su apogeo, en una primera instancia, durante la década de los años 20 y 30 con la creación de los diseños del francés Georges J. Darrieus y del finlandés Sigurd J. Savonius que llevan sus nombres, diseños utilizados en la época para el autoconsumo de privados en zonas alejadas de los sistemas de distribución de esos años. El incremento en la utilización de aerogeneradores conllevó a un rápido aumento de la capacidad de cada uno de ellos, desde los modelos de 35 kW de los años veinte, hasta la turbina más grande creada hasta ya entrados los años setenta y también la primera en sobrepasar el MW de potencia, esta fue la turbina eólica de Smith-Putnam construida a principio de la década de los cuarenta en la ciudad de Castleton, EE.UU; el modelo tenía una potencia nominal de 1,25 MW y velocidad de 600 RPM manteniéndose operativa hasta 1945 cuando sufrió un colapso mecánico irreparable.

La masificación de la red eléctrica de distribución a nivel mundial, y el bajo precio del crudo en los mediados del Siglo XX, hicieron que la innovación en los generadores eólicos tuvieran una caída en su desarrollo ante lo llamativo que resultaba invertir en investigaciones basadas en nuevas tecnologías que utilizaban como fuente energética al combustible fósil. Esto no se vería contrastado hasta la crisis del petróleo en la década de

los 70, lo que obligó a los actores involucrados en el sector de la producción energética a buscar independencia en la generación eléctrica; y es aquí donde la energía eólica logró hacerse un espacio en el mercado dejando atrás el viejo paradigma de la generación exclusivamente *off-grid* y así entrar de lleno en el despacho a gran escala.

Durante los últimos 30 años la tecnología ha permitido que los grandes aerogeneradores sean cada vez de más capacidad, llegando hasta los 6 MW cada uno, los cuales en su conjunto componen los conocidos parques eólicos que suministran su energía por medio del sistema de transmisión hacia los centros de distribución. Por otro lado, también ha crecido el interés por innovar en pequeñas turbinas eólicas (disponibles desde los pocos kW de potencia) tal como se hacía en un principio, pero esta vez con el enfoque de realizar instalaciones con conexión a la red de distribución para disminuir las facturas de electricidad y, si la legislación lo permite, tener la posibilidad de vender esta energía al inyectarla directamente a la red por medio de lo que conoce como generación *on-grid* [6].

2.2 Origen del viento

El viento está compuesto por partículas de aire que forman una masa en movimiento. Se forma debido a la radiación solar que incide sobre la tierra, produciendo un calentamiento mayor en las regiones ecuatoriales respecto de las regiones polares.

Este gradiente térmico da lugar a movimientos de aire de gran magnitud: el aire caliente se eleva en las regiones ecuatoriales y se desplaza hacia los polos. Cuando las masas de aire se enfrían, a los 30° de latitud (norte y sur), comienzan a bajar y retornan hacia las regiones ecuatoriales. La rotación terrestre tiene también una gran influencia sobre los vientos, las fuerzas de aceleración ocasionan que los flujos de aire caliente (del Ecuador a los polos) se desvíen hacia el este, y los flujos de retorno se desvíen hacia el oeste. Por otro lado, para latitudes mayores a los 30°, la rotación terrestre provoca vientos con sentido de oeste a este.

Se estima que entre un 2%-3% del total de la energía del sol que llega a la superficie terrestre es transformada en energía cinética de los vientos. De esta cantidad de energía eólica, el porcentaje de utilización real es bajo debido a la dispersión del recurso [6].

2.2.1 Vientos dominantes

Los vientos predominantes en la superficie terrestre en base a los fenómenos antes descritos son los siguientes:

El conocimiento del comportamiento del viento a gran escala permite discriminar emplazamientos en las primeras fases del proyecto, principalmente por motivos de la orientación respecto a la dirección predominante del viento [6].

2.2.2 Vientos locales

Si bien los vientos globales son importantes para la descripción del viento en un emplazamiento, las condiciones climáticas y geográficas locales tienen en la mayoría de los casos una influencia en la dirección y magnitud de los vientos locales.

Un ejemplo de este fenómeno son las brisas marinas, las cuales se generan debido a la diferencia de temperatura producida durante el día entre las masas de tierra del continente y el océano. Durante la noche, las temperaturas del continente y el océano se igualan, de forma tal que la velocidad del viento disminuye. Otros vientos locales importantes son las brisas de valle y montaña, y los efectos de aceleración debido a valles, cadenas montañosas o estrechos [6].

2.3 Fuentes de información del recurso eólico

Existen disponibles distintas fuentes de información para realizar una aproximación al recurso eólico y al potencial de generación. Esta primera aproximación permite descartar sitios con bajo potencial de desarrollo eólico y priorizar a aquellos emplazamientos que muestren un alto potencial.

Sin embargo, para proyectos eólicos de potencia mayor (del orden de [MW]), se requiere de estudios y herramientas adicionales de caracterización del recurso eólico para determinar la rentabilidad de un proyecto, como se describirá más adelante en este capítulo [6].

2.3.1 Inspección visual

A través de una simple inspección visual de la copa de los árboles y arbustos en el emplazamiento es posible obtener una noción de la magnitud y dirección predominante del viento presente.

Cabe destacar que el criterio de evaluación preliminar visual del recurso eólico depende del tipo de vegetación que se encuentre disponible y la estación del año, entre otros factores, por lo que no es un método de estimación de potencial definitivo [6].

2.3.2 Mapas eólicos

A través de los últimos años y en conjunto con el crecimiento de la industria de la energía eólica, se han desarrollado a través de iniciativas académicas y gubernamentales una serie de mapas eólicos que describen a gran escala el potencial mundial, nacional y local del recurso eólico. Estos mapas son de uso público y permiten generar datos suficientes para una evaluación preliminar del recurso. Para Chile, existe el Explorador del Ministerio de Energía/GIZ/Universidad de Chile.

El Explorador Eólico es una herramienta de análisis del recurso viento, que entrega resultados de una simulación numérica de las condiciones de viento y densidad del aire, de manera gráfica y cómoda para el usuario. Estas simulaciones fueron realizadas por el modelo WRF (Weather Research and Forecasting), un modelo avanzado, ampliamente

utilizado para analizar el recurso eólico en el mundo. La información entregada por el Explorador Eólico permite realizar una evaluación preliminar del recurso eólico en un determinado lugar [6].

2.3.3 Estacionales Meteorológicas

Las estaciones meteorológicas cuentan con datos de velocidad y dirección del viento, temperatura, radiación, humedad, entre otros datos climatológicos de utilidad para la prospección del recurso eólico. Se debe tener cuidado de no tomar los datos de las estaciones meteorológicas como definitivos, dado que muchas veces las estaciones se encuentran a una distancia considerable del emplazamiento definitivo del proyecto o bien son mediciones irregulares, hechas a baja altura (<10 m), por lo que pueden presentar un importante contenido de turbulencias. Aeropuertos y aeródromos cuentan con este tipo de instalaciones, por lo que generalmente se pueden solicitar datos con registros de varios años. Otra fuente importante de información es la Dirección Meteorológica de Chile (<http://www.meteochile.gob.cl/>), que reúne datos de varias estaciones [6].

2.3.4 Perfiles diarios y por estaciones del año

Con la información recopilada en las fuentes anteriores es importante definir un perfil del viento diario y estacional, denominado ciclos medios. A través de esta caracterización es posible observar cuáles son los meses del año de mayor presencia de viento, así como la variación del recurso dentro de un día típico.

Es improbable que el perfil del viento se comporte exactamente de la forma descrita por los ciclos medios, dada la aleatoriedad del recurso; sin embargo, en la práctica es posible observar una tendencia en torno a los valores indicados en los ciclos medios, tanto en el comportamiento diario como entre estaciones.

Esta caracterización estacional resulta útil para definir los periodos en los cuales es posible esperar un mayor aporte energético del aerogenerador [6].

2.4 Aerogeneradores

En términos generales, un aerogenerador eólico toma la energía cinética contenida en el viento y la transforma en energía eléctrica. Este proceso comienza al transferirse la fuerza del viento sobre el aspa del aerogenerador, generando un movimiento rotatorio que a su vez es transferido a un generador eléctrico a través del eje del aerogenerador: al girar, produce energía eléctrica.

Las familias de aerogeneradores se pueden agrupar en dos grandes categorías de acuerdo a la orientación de las aspas respecto de su eje: Turbinas de Eje Vertical y Turbina de Eje Horizontal [6].

2.5 Turbinas de eje vertical

Denominadas VAWT (Vertical Axis Wind Turbine) por su sigla en inglés, este tipo de turbinas se caracteriza porque el eje se ubica verticalmente y los componentes principales del aerogenerador se encuentran en la base de la turbina. Las principales ventajas de esta configuración son que no se necesita orientar en la dirección del viento, y que puede operar a bajas velocidades. Algunos modelos desarrollados en esta familia de turbinas incluyen el Savonius, el Darrieus y el Giromill.

Los principales tipos de turbinas de eje vertical que se han empleado a lo largo de la historia son las Savonius y las Darrieus [6]:

- **Turbina Savonius:** Está formada por dos palas que corresponden a dos mitades de un cilindro cortado en la mitad. Su sencilla construcción y capacidad para operar a bajos vientos, facilita su implementación. Además, cuentan con torque de arranque propio, sin embargo, su rendimiento es inferior a las turbinas de eje horizontal.
- **Turbina Darrieus:** Consiste de dos o mas palas dispuestas en forma similar a una cuerda sujeta en sus extremos. Se requiere de un motor de arranque y de refuerzos en la estructura para la sujeción. Las turbinas tipo Darrieus tienden a detenerse ante la presencia de vientos fuertes.

2.6 Turbinas de eje Horizontal

Es clase más utilizada en el mundo y es también conocida como HAWT si bien sus aspas o palas se ubican perpendicularmente respecto al suelo, el eje al que van acopladas es horizontal. Las HAWT se sitúan a grandes alturas para captar vientos más fuertes, por lo mismo los sistemas de conversión deben ubicarse a la misma altura complicando la mantención y debiéndose ampliar la seguridad de la turbina, de la misma forma se necesita obligatoriamente de un sistema de posicionamiento en su diseño para seguir la dirección del viento, que en pequeños modelos se trata sólo de las clásicas colas de orientación, no siendo el caso de los grandes aerogeneradores donde se prefieren los servomecanismos.

Existen variados modelos de turbinas de eje vertical que vienen, en primera instancia, determinados por las características constructivas y estructurales como se indica a continuación [7]:

- a) **Cantidad de Aspas o Palas:** Lo más general es usar el diseño tripala, conocido usualmente como el “*modelo danés*” por su procedencia. Esto debido a que en condiciones dinámicas, dicha configuración no compromete la estabilidad estructural de la turbina y que además en estas condiciones sus aspas se consideran como un disco giratorio para términos de diseño de la torre. En las estructuras monopala o bipala existe el problema de necesitarse mayor velocidad de giro para producir la misma energía que en turbinas tripala, por otro lado es también necesario la construcción de un eje basculante u oscilante que acople las aspas al eje del generador, puesto que cuando la pala (la de mayor tamaño en el caso bipala) pasa por encima de la turbina genera fuertes

vibraciones y sacudidas que dañan la estructura. Una configuración especial es la llamada turbina Americana, la cual cuenta con múltiples palas, cuya utilidad es exclusivamente para el bombeo de agua debido al alto torque de partida y operación a bajas velocidades.

Las aspas del rotor de la turbina juegan un papel fundamental en la extracción de energía proveniente del viento, pues su tamaño determina el área de barrido que abarcará el aerogenerador, y por consiguiente representa una referencia a la potencia nominal del generador eléctrico que se utilizará.

b) Captación del viento: Las opciones en relación al posicionamiento de la turbina para la captación de la energía eólica son *a barlovento*, donde el viento entra por en dirección frontal a las aspas, y *a sotavento* donde el viento vendría desde la sección posterior de la turbina. La variedad que más se emplea es *a barlovento* ya que la corriente de aire impacta de lleno sobre la turbina sin obstrucciones como en la configuración *a sotavento* donde la cola o góndola de la turbina interfiere en la energía del viento recibido.

2.7 Torres y estructuras de soporte

Las torres de las turbinas eólicas pueden ser tipo enrejada o tubular; en general, el mercado tiene una clara preferencia por las de tipo tubular a pesar de los mayores costos de implementación, debido a aspectos relacionados con la estabilidad estructural y la estética.

Para proyectos pequeños, las alturas pueden variar típicamente de 10 a 25 metros de altura aproximadamente, debido a que sobre esta altura se puede alcanzar flujos de viento lo más laminares posibles. Respecto de los tipos de torre a utilizar, la gama es bastante amplia: torres tubulares, con y sin amarre y torres de reticulado. Las torres pueden contar con una base de concreto y con cables de amarre para mayor firmeza. Esto último es particularmente recomendado en zonas de vientos fuertes.

Las torres con cables de sujeción son la opción más económica, sin embargo, requieren una mayor área para la instalación de los cables de sujeción. Este tipo de torres se recomienda sólo para pequeños aerogeneradores, cuya potencia no supere los 20 [kW] como máximo. Además, este tipo de torre requiere mayor mantención dado que los cables pueden sufrir modificaciones con el tiempo, extendiéndose en longitud. Por otra parte, una torre con poste tubular requiere menos área para su instalación, sin embargo el costo es mayor debido a que aumenta la cantidad de acero utilizado en su construcción. La torre tubular tipo péndulo es un diseño especial que facilita la mantención del aerogenerador, las Torres tipo de reticulado representan una opción intermedia desde el punto de vista económico entre las torres con cables de sujeción y las torres con poste tubular, sin embargo poseen un impacto visual mayor y facilita la anidación de aves, por lo cual se ha desechado su uso en proyectos de mediana y gran escala. Otro criterio a considerar en la selección de la altura de la torre es la captura de energía. Tal como se señaló en capítulos anteriores,

normalmente la velocidad del viento aumenta al aumentar la altura, por lo que se debe realizar un balance entre el costo de una torre de mayor altura versus el beneficio de acceder a un mejor recurso eólico. A modo de ejemplo, existen estudios que demuestran que para turbinas del orden de 10 kW, la energía que producen a 30 metros de altura es el doble de lo que producen a 18 metros de altura, considerando un aumento en el costo del sistema instalado a 30 metros de altura de 10% superior con respecto al sistema instalado a 18 metros de altura. No obstante, para hacer una correcta cuantificación se hace imprescindible medir el viento con torre meteorológica al menos a dos niveles para evaluar la cortadura vertical del mismo. Es recomendable realizar mecánicas de suelo para evaluar las condiciones del terreno y si fuese requerido, realizar un proyecto estructural por un especialista para el diseño de la estructura de soporte. Existen empresas proveedoras de turbinas eólicas que en base a las mecánicas de suelo entregan soluciones estándar de anclajes y cables de sujeción [6]

2.8 Origen del viento y sus manifestaciones

El viento está compuesto por partículas de aire que forman una masa en movimiento. Se forma debido a la radiación solar que incide sobre la tierra, produciendo un calentamiento mayor en las regiones ecuatoriales respecto de las regiones polares. Este gradiente térmico da lugar a movimientos de aire de gran magnitud: el aire caliente se eleva en las regiones ecuatoriales y se desplaza hacia los polos. Cuando las masas de aire se enfrían, a los 30° de latitud (norte y sur), comienzan a bajar y retornan hacia las regiones ecuatoriales. La rotación terrestre tiene también una gran influencia sobre los vientos, las fuerzas de aceleración ocasionan que los flujos de aire caliente (del Ecuador a los polos) se desvíen hacia el este, y los flujos de retorno se desvíen hacia el oeste. Por otro lado, para latitudes mayores a los 30°, la rotación terrestre provoca vientos con sentido de oeste a este.

Se estima que entre un 2%-3% del total de la energía del sol que llega a la superficie terrestre es transformada en energía cinética de los vientos. De esta cantidad de energía eólica, el porcentaje de utilización real es bajo debido a la dispersión del recurso [6].

2.8.1 Clases de vientos

Un parámetro de diseño de las turbinas eólicas que es importante conocer, es la clase de viento que alimentara al aerogenerador; definición que se encuentra en la norma IEC 61.400. Las clases de viento a la que hace mención la norma determinan cual turbina es la adecuada de acuerdo al perfil de viento de un sitio en particular. El perfil de viento al que hace mención la norma se refiere al valor medio de la velocidad del viento medido a la altura del buje de la turbina, velocidad de ráfagas extremas que puedan ocurrir en un periodo de 50 años y nivel de turbulencias en el lugar [6].

Tabla 2-1 Clasificación de vientos

Clase de turbina	Vientos altos	Vientos medios	Vientos bajos
Velocidad promedio del viento anual	10 m/s	8.5 m/s	7.5 m/s
Ráfagas extremas en 50 años	70 m/s	59.5 m/s	52.5 m/s
Clases de turbulencias	A 18 % B 16 %	A 18 % B 16 %	A 18 % B 16 %

2.8.2 Distribución de Probabilidad de Weibull

La Distribución de Weibull es una herramienta matemática que permite modelar el comportamiento de las frecuencias del viento en un emplazamiento, a partir de las velocidades promedio y de la desviación estándar de los registros de viento medidos. cuyo modelo matemático se define como:

$$f(v) = \frac{k}{c} \cdot \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (3-1)$$

Donde:

$f(v)$: Función de densidad de probabilidad de Weibull

v : Velocidad del viento en [m/s]

c : Factor de escala [m/s], valor que suele acercarse a la velocidad media

k : Factor de forma que define la asimetría de la función de probabilidad

La Fig. 2-1 corresponde a las curvas típicas siguiendo la función de Weibull para valores de factor de forma constante ($k=2$) y factor de escala variable. Se observa que mientras menor es el factor de escala, la densidad de probabilidad se acumula en un pequeño rango de velocidades de viento como en el caso de $c=1$ los vientos más frecuentes serían menores a 2 m/s. No obstante lo más usual es encontrar distribuciones con $k>2.5$, donde se ve que en tanto mayor es el factor de escala (o velocidad media de viento en las mediciones en terreno) menor es la concentración de probabilidad de cada una de las velocidades de viento, es decir, se pueden esperar una mayor variedad de vientos en el lugar de medición.

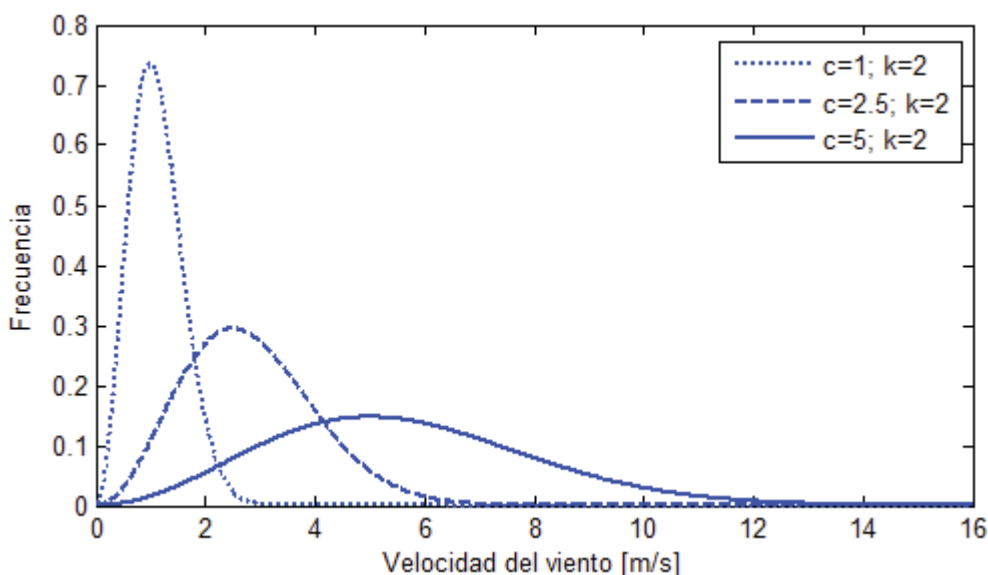


Fig. 2-1 Distribución de Weibull

El área bajo la curva de la Distribución de Weibull es siempre exactamente igual a 1, dado que la suma de todas las probabilidades de ocurrencia del viento debe cubrir el 100% del rango de velocidades. El punto de la Distribución de Weibull donde se alcanza a cubrir el 50% del área bajo la curva corresponde al valor de la velocidad media en el emplazamiento. La distribución de probabilidades del viento varía de sitio en sitio, dependiendo del clima, la ubicación geográfica, la topografía del terreno, los accidentes geográficos, entre otros factores.

2.9 Energía Utilizable del Viento: Ley de Betz

El porcentaje teórico máximo de extracción de potencia que un aerogenerador puede obtener a partir de una masa de aire en movimiento es un 59,3%. Este valor fue calculado en 1919 por el científico alemán Albert Betz, por lo que se le conoce como Límite de Betz. Si bien el Límite de Betz está en torno al 60%, sólo las turbinas con dos y tres aspas se aproximan a ese valor, llegando a un límite máximo del 50%. Esta razón explica en parte por qué la industria eólica ha preferido utilizar tres aspas por sobre dos, en parte debido a que las velocidades de vientos aprovechables por la turbina de tres aspas poseen mayor frecuencia. Además, las turbinas de dos aspas presentan mayores grados de inestabilidad aerodinámica que las turbinas de tres aspas, lo que impone una mayor complejidad a la operación y control de éstas, implicando esfuerzos mecánicos cíclicos inconvenientes sobre la torre de sujeción [6]

2.10 Aplicaciones de la Energía eólicas

Existen variadas aplicaciones para el uso de la energía eólica, estas se describirán de forma general en los siguientes puntos:

2.10.1 Bombeo de Agua

La aplicación mecánica más frecuente de la energía eólica es el bombeo de agua, para lo cual son especialmente adecuadas las turbinas de baja potencia. Esta aplicación demanda un alto par de arranque y de una baja velocidad específica de viento, por lo que se conoce como un “sistema eólico lento”.

Se aprovecha el viento para el bombeo de agua en áreas aisladas de la red eléctrica. Los sistemas mecánicos operan prácticamente con la misma tecnología, desarrollada en el siglo IX, mientras que los nuevos están más adaptados a la variabilidad del viento. También se usan sistemas eólicos eléctricos para bombeo de agua, los que generalmente no requieren baterías. Al comparar sistemas mecánicos y eléctricos para bombeo de agua, se puede decir que los primeros son más baratos y que pueden operar a velocidades del viento más bajas.

Adicionalmente, su mantenimiento es más simple y barato. Sin embargo, los sistemas eléctricos tienen la ventaja de que la turbina no tiene que instalarse en el sitio del pozo, sino en un punto más ventoso [8].

2.10.2 Aplicaciones térmicas

La energía mecánica de una máquina eólica se puede transformar directamente en térmica por dos mecanismos: calentamiento de agua por rozamiento mecánico o compresión del fluido refrigerante de una bomba de calor. En ambos casos, el calor producido se puede enviar, a través de un cambiador de calor, a un sistema de calefacción convencional. Sin embargo, el desarrollo de este tipo de aplicación no ha resultado económicamente factible. Es más costo efectivo generar electricidad de alta calidad, pues se puede aplicar en diferentes casos, que construir un sistema eólico sólo para una aplicación térmica [8].

2.10.3 Sistemas Aislados

Un sistema aerogenerador sin conexión a la red (Off Grid en inglés) que alimenta cargas que funcionan aisladas.

El factor clave en el diseño de este tipo de sistemas es la contar con sistemas de respaldo, tales como bancos de baterías que permitan mantener un suministro continuo de energía.

Dado que este tipo de sistemas no inyecta energía a la red, la normativa asociada no es tan extensa como para los sistemas conectados a la red. En Chile, se encuentra la siguiente normativa vigente para sistemas de baja tensión ($<1000[V]$) y corrientes fuertes respectivamente [6].

- Norma Chilena Eléctrica 4/2003, en aspectos relacionados a diseño, seguridad y

especificaciones de componentes del sistema eléctrico.

- Norma Chilena Eléctrica 5/2001 “Instalación de Corrientes Fuertes” en aspectos relacionados a diseño, seguridad y especificaciones de componentes del sistema eléctrico.

2.10.4 Sistema Híbrido Aislado

Un sistema híbrido es un tipo de sistema aislado en el cual se utiliza una matriz de diversas tecnologías de generación para alimentar un consumo eléctrico. Típicamente, estos sistemas utilizan tecnologías de energía renovable como fotovoltaica, minihidro y eólica, dependiendo de la disponibilidad del recurso solar, hídrico y eólico respectivamente, así como un generador convencional en base a diésel, gasolina o gas para suplir el déficit de energía. Adicionalmente, estos sistemas utilizan un banco de baterías para el almacenamiento de la energía.

En un sistema híbrido aislado, el control de la generación es crítico. Para maximizar la eficiencia en la operación debe priorizarse la carga de las baterías a partir de la generación de energía renovable, dado que este tipo de fuentes no tiene costo asociado a la generación, y utilizar el respaldo de energía convencional solo cuando la carga de las baterías se aproxime al límite de descarga.

Los componentes de este tipo de sistemas son los mismos especificados para un sistema aislado, pero incorporando en este caso también nuevas fuentes de generación como paneles fotovoltaicos, generación minihidro, generación convencional, entre otras. Dado que este tipo de sistemas no inyecta energía a la red, la normativa asociada es, al igual que en el caso anterior, la Norma Chilena Eléctrica 4/2003 en aspectos relacionados a diseño, seguridad y especificaciones de componentes del sistema eléctrico, para proyectos de corrientes débiles y la Norma Chilena Eléctrica 5/2001 “Instalación de Corrientes Fuertes” [6].

2.10.5 Sistemas conectados a la red

Un sistema aerogenerador con conexión a la red (On Grid en inglés) es aquel que funciona sincronizado con un sistema eléctrico mayor, tal como el Sistema Interconectado Central (SIC), el Sistema Interconectado del Norte Grande (SING), el Sistema de Aysén o el Sistema de Magallanes. Esta conexión podrá ser a través de las redes de transmisión para grandes proyectos o bien a través de las redes de distribución para proyectos pequeños y medianos.

En un sistema conectado a la red, el aerogenerador puede destinarse en forma exclusiva a entregar energía al sistema (red central) o bien alimentar una carga interna (por ejemplo, los consumos de un hogar) y entregar los excedentes a la red. En el segundo caso, el sistema aerogenerador alimenta la carga cuando hay suficiente energía contenida en el viento. Si la generación de energía eléctrica del aerogenerador supera la energía consumida desde la carga, entonces los excedentes pueden ser inyectados a la red. En contraparte, si la generación de energía eléctrica generada a partir del aerogenerador no alcanza a suplir la

demanda de la carga, este déficit se suple consumiendo energía desde la red eléctrica. En este tipo de sistemas, por tanto, no se utilizan baterías para el almacenamiento de energía ya que el déficit de energía se suple desde la red [6].

Los componentes de un sistema eólica conectado a la red son:

- Equipo aerogenerador: el aerogenerador se compone por aspas, bujes, ejes de transmisión, caja multiplicadora y generador eléctrica.
- Medidor: Este elemento puede ser bidireccional, si la energía fluye en ambos sentidos desde y hacia la red, o bien, unidireccional, si toda la energía generada se inyecta a la red.
- Inversor de potencia: Este componente se encarga de transformar la energía eléctrica generada en corriente continua a corriente alterna para alimentar cargas o inyectar a la red.
- Sistemas de control y seguridad: regulan la operación y control de potencia del aerogenerador.

Dado que este tipo de sistemas inyecta energía a la red, existe una normativa y procedimientos para la conexión, operación y calidad del suministro eléctrico. En Chile, se encuentran actualmente vigentes las siguientes normativas:

- Si la potencia del equipo aerogenerador es menor o igual a 100 [kW], los excedentes de generación pueden ser vendidos al sistema al precio que determine el reglamento de la denominada “Ley Net Billing” (Ley 20.571/2012). El reglamento determina los procedimientos, requisitos y montos de valorización de las inyecciones a la red de distribución.
- Adicionalmente, para proyectos de corrientes débiles, aplica la Norma Chilena Eléctrica 4/2003 en aspectos relacionados a diseño, seguridad y especificaciones de componentes del sistema eléctrico.
- Si la potencia del aerogenerador supera los 100 [kW] y posee una potencia máxima de 9 MW, entonces aplica el Decreto Supremo 244 (DS 244) y la Norma Técnica de Conexión y Operación (NTCO) en lo que respecta a condiciones y procedimientos de conexión y operación para pequeños medios de generación (PMG).
- Para proyectos de mayor potencia, se debe consultar a la Norma Técnica de Calidad y Servicio (NTCS) y las resoluciones de la Comisión Nacional de Energía (CNE), así como los procedimientos dictados por los Centros de Despacho Económico de Carga (CDEC).

2.11 Parques eólicos

El aporte de energía eléctrica debido al recurso viento se integra a la fecha por once parques eólicos que operan a lo largo con un total de 413 MW, cuya concentración radica principalmente en la cuarta región, y en consecuencia conectadas al SIC, a excepción de la central Alto Baguales, constituida por tres aerogeneradores de 660 kW cada uno y que además fue la primera en conectarse a un SI (Aysén) en 2001; de igual manera la central Valle de los Vientos conectada al SING, que entró en operación en el mes de enero de 2014 luego de dos años de iniciada su construcción y que, específicamente, cuenta con un conjunto de 45 turbinas del fabricante danés *Vestas* de una potencia nominal 2 MW por cada una .

Tabla 2-2 Parques eólicos en Chile.

	Nombre de la Central	Región	Comuna	Potencia (MW)	Sistema	Año Ingreso
1	Valle de los Vientos	II	Calama	90,0	SING	2014
2	Canela I	IV	Canela	18,2	SIC	2007
3	Canela II	IV	Canela	60,0	SIC	2009
4	Parque Eólico Monte Redondo	IV	Ovalle	30,0	SIC	2009
	Ampliación Monte Redondo	IV	Ovalle	10,0	SIC	2011
5	Totoral	IV	Canela	46,0	SIC	2009
6	Parque Eólico Punta Colorada	IV	Punta Colorada	20,0	SIC	2011
7	Talinay Oriente	IV	Ovalle	90,0	SIC	2013
8	Ucuquer	VI	Litueche	7,2	SIC	2013
9	Cristoro Lebu	VIII	Lebu	3,6	SIC	2009
	Ampliación Lebu	VIII	Lebu	3,0	SIC	2011
10	Negrete-Cuel	VIII	Los Ángeles	33,0	SIC	2013
11	Alto Baguales	XI	Coyhaique	2,0	Aysén	2001

En lo que respecta al SIC el 76% de la capacidad eólica instalada a nivel nacional se conecta a él, donde la mayor parte de la producción eléctrica se concentra en la región de Coquimbo que genera un 66% del total nacional. Dentro de sus parques destaca la central Canela por el motivo de ser el primer gran proyecto eólico emplazado en el país, en contraste al parque Alto Baguales por su baja capacidad. La composición de turbinas que se utilizaron en Canela son, para la primera etapa, 11 modelos del fabricante *Vestas* de 1650 kW de potencia nominal cada una, la segunda etapa se sustenta con un conjunto de 40 aerogeneradores del fabricante *Acciona* de 1500 kW por turbina. Así mismo, otra de las centrales que se destaca, debido a su reciente inicio de actividades durante el año 2013, es el parque Talinay Oriente cuya capacidad instalada es de 90 MW, al igual que Valle de los Vientos, está compuesta por un grupo 45 aerogeneradores *Vestas*, cada uno con potencia de 2 MW [2].

CAPÍTULO 3

GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA POR FUENTE BIOMASA

El término biomasa se refiere a toda la materia orgánica que proviene de árboles, plantas y desechos de animales que pueden ser convertidos en energía; o las provenientes de la agricultura (residuos de maíz, café, arroz) del aserradero (podas, ramas, aserrín, cortezas) y de los residuos urbanos (aguas negras, basura orgánica y otros). Esta es la fuente de energía renovable más antigua conocida por el ser humano, pues ha sido usada desde que nuestros ancestros descubrieron el secreto del fuego.

El objetivo del estudio de biomasa en esta memoria, es transformar el estiércol de vacuno en biogás mediante el proceso digestión anaerobia, para que luego este biogás se pueda transformar en electricidad.

3.1 Biomasa

En general cualquier sustrato puede ser utilizado como biomasa en cuanto contengan carbohidratos, proteínas, grasas, celulosa y hemicelulosa como componentes principales [9].

Para seleccionar la biomasa se deben tener en cuenta los siguientes puntos.

- El contenido de sustancias orgánicas debe ser el apropiado para el tipo de fermentación elegido.
- El valor nutricional de la sustancia orgánica se relaciona directamente con el potencial de formación de biogás, por ende se busca que sea lo más alto posible.
- El sustrato debe estar libre de agentes patógenos que puedan inhibir el proceso de fermentación.
- El contenido de sustancias perjudiciales o tóxicas debe ser controlado para permitir una tranquila evolución de la fermentación.
- Es importante que el resultado final del sustrato (después de haber aprovechado la fermentación para generar biogás) sea un desecho utilizable como por ejemplo fertilizante.

3.2 Estiércol de Vacuno

Como el principal sustrato disponible en el sector económico involucrado se refiere a los animales, se utiliza como combustible para producir electricidad el estiércol de vacuno.

La composición del estiércol depende de muchos factores, como los sistemas de limpieza, el tipo de alimento, la época del año, y el tipo de alojamiento en que se encuentren los vacunos.

La Tabla 3-1 se aprecia la cantidad y características del estiércol producido diariamente por una vaca de 600 Kg.

Tabla 3-1 Características del estiércol producido diariamente.

Cantidad y características	Unidad	Valor
Estiércol generado.	Kg/d	50,8
Densidad del estiércol.	Kg/L	0,994
Sólidos totales.	%	12,5
Sólidos volátiles.	%	10,63

El estiércol de vacuno es una mezcla semisólida, obteniéndose el gas a partir de los sólidos contenidos en esta mezcla, por lo que el digestor debe ser capaz de convertir los sólidos a gas.

La Tabla 3-2 se describen los parámetros operacionales, ya que para el tratamiento del estiércol vacuno se selecciona el proceso de digestión anaerobia en reactores de mezcla completa [10].

Tabla 3-2 Parámetros operacional seleccionado para el diseño

Parámetro	Unidad	Valor
Temperatura	°C	35
Tiempo de retención hidráulico	D	30
Sólidos totales alimentados	%l ^v	12.5
Sólidos volátiles alimentados	%	10.63
Velocidad específica de producción de gas	m ³ /KgSV	0.327
CH ₄	%	60
H ₂ S	%	0.03

3.3 Tratamientos aplicables a los purines

Los purines pueden considerarse de manera similar al agua residual doméstica, con una carga orgánica de 15 a 80 veces mayor y alta generación de lodos, donde el tratamiento y eliminación de los residuos animales es más complicado por su naturaleza y por los grandes volúmenes en son generados.

Para el tratamiento de los purines es posible utilizar tanto los sistemas anaerobios como aerobios, sin embargo, según el aumento de la materia orgánica no permite mantener las condiciones aeróbicas durante las épocas de invierno, lo que implica al menos seis a ocho semanas para estabilizar los sistemas aeróbicos durante la primavera, tiempo durante el cual la generación de olores es un problema significativo, que es casi imposible de eliminar.

El purín por si solo o mezclado con agua durante la limpieza de los alojamientos generalmente se encuentra con una concentración demasiado alta para ser descompuesto aeróbicamente en una estructura de tratamiento o almacenamiento de estiércol, debido a que el oxígeno no se puede disolver lo suficientemente rápido para soportar las bacterias

aeróbicas. Por lo tanto, el estiércol se descompone secuencialmente en grupos de bacterias anaeróbicas.

En estudios se ha logrado establecer que el tratamiento y eliminación de los residuos orgánicos animales (ganado) es complicado por su naturaleza y por el volumen a manejar.

Se ha concluido en estudios que el tratamiento anaerobio en lagunas ofrece una posibilidad para tratar grandes cantidades de purines que se originan en las locaciones donde se ubica el ganado en terrenos cerrados. En 1974 se concluyó por estudios que los métodos anaerobios son más baratos que los métodos aerobios. En este ámbito se reafirma que para el tratamiento de residuos agrícolas ganadero el uso de sistemas anaerobios, sobre todo el de digestión son los procesos unitarios que más han contribuido a la reducción de la contaminación agrícola [9].

3.4 Biogás

El biogás está constituido principalmente de Metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) y una serie de impurezas que dependen del origen primario del biogás.

El gas más conocido que posee metano es el biogás, existen muchas variantes de gas natural dependiendo de su lugar de origen y se diferencian en su composición química, en su razón de elementos químicos y por ende en sus propiedades.

Internacionalmente Alemania lidera la utilización de Biogás, este procede en un 51% de Europa del Oeste (Dinamarca, Holanda, Noruega y Reino Unido) y un 31% se importa desde Rusia [11].

3.4.1 El dióxido de carbono en el biogás.

La presencia de CO_2 en el gas se mide en la razón de CO_2 /metano [%vol] y puede ser controlada parcialmente debido a que es esencial en la formación de metano en el gas, por lo que no se busca hacerlo desaparecer [9].

Los factores que afectan la composición de CO_2 son:

- La presencia de compuestos con largas cadenas de hidrocarburos por ejemplo compuestos con alto contenido en grasas ayudan a mejorar la calidad del gas cuidando de no afectar la acidez, la cantidad de átomos de Carbono presentes en el sustrato se relaciona directamente con el porcentaje en volumen de metano presente en el biogás.
- Generalmente la descomposición anaeróbica de la biomasa mejora con el tiempo de exposición, cercano al final del tiempo de residencia el contenido de metano aumenta desproporcionadamente a medida que el contenido de CO_2 va desactivando el proceso de hidrólisis.
- El proceso de fermentación toma lugar de manera más rápida si el material en el reactor está distribuido homogéneamente.

- Un alto contenido de líquido en el reactor influye en una alta concentración de CO_2 disuelto en el agua, lo que disminuye el nivel de CO_2 presente en la fase gaseosa.
- A mayor temperatura de fermentación, disminuye la cantidad de CO_2 disuelto en el Agua) [9].

3.4.2 Nitrógeno y Oxígeno presentes en el biogás

El nitrógeno y oxígeno presente en el biogás se encuentran normalmente en proporción 4:1 y usualmente se incorporan en las etapas de ventilación que tienen como objetivo eliminar el ácido sulfhídrico presente en el reactor, estos gases pueden entrar también normalmente en pequeñas cantidades si el sistema de tuberías no está perfectamente hermético [9].

3.4.3 Amoníaco presente en el biogás

Normalmente la concentración de amoníaco es baja ($<0,1 \text{ mg/m}^3$), cuando los substratos usados provienen de excremento de aves o algunos casos particulares de basura la presencia de amoníaco se puede incrementar hasta no superar los 1.5 mg/m^3 , por sobre este límite existe riesgo para los quemadores inclusive para la vida de los motores utilizados [9].

3.4.4 Ácido Sulfhídrico presentes en el biogás

La cantidad de H_2S presentes en los gases de escape depende principalmente del proceso utilizado para la obtención del biogás y del tipo de substrato involucrado, si no existe un paso de desulfurización, la concentración de H_2S puede exceder el 0.2% volumen.

Cuando el substrato fermentado es viscoso el contenido de H_2S es menor que en el caso de un substrato líquido.

Un objetivo primordial es mantener el contenido de ácido sulfhídrico a los niveles más bajos posibles, porque aguas abajo la mayoría de los componentes sufren daños irreversibles debido al alto potencial de corrosión del H_2S , usualmente el biogás es desulfurizado aún mientras permanece en el reactor [9].

3.4.5 Siloxenos presentes en el biogás

Los siloxenos son variantes de la silicona y se presentan como grupos separados en el biogás, estos componentes pueden ser hallados principalmente en cosméticos, detergentes, tintas de impresión y en materiales de construcción, es por esto que en los desechos domésticos, que son substrato principal para el biogás obtenido de plantas de tratamientos de agua o de vertederos, se encuentran muchos de los compuestos derivados de la silicona [9].

3.4.6 Biodigestores

Un digestor de desechos orgánicos o biodigestor es, en su forma más simple, un contenedor cerrado, hermético e impermeable, dentro del cual se deposita el material orgánico a fermentar (excrementos de animales y humanos, desechos vegetales, etcétera) en determinada dilución de agua para que se descomponga, produciendo gas metano y fertilizantes orgánicos ricos en nitrógeno, fósforo y potasio.

Este sistema también puede incluir una cámara de carga y nivelación del agua residual antes del reactor, un dispositivo para captar y almacenar el biogás y cámaras de presión hidrostática y postratamiento (filtro y piedras, de algas, secado, entre otros) a la salida del reactor [12].

Hay muchos tipos de plantas de biogás, pero los más comunes son el dosel flotante y el domo fijo. La baja aceptación de muchos de estos biodigestores ha sido principalmente debida a los costos altos, la dificultad de instalación y problemas en la consecución de las partes y repuestos [13].

3.5 Digestión Anaerobia

El proceso unitario de tratamiento de digestión anaerobia se emplea en todo el mundo para la depuración de aguas residuales y fangos procedentes de la industria, la agricultura y de origen urbano [14].

Utilizando el proceso de digestión anaerobia es posible convertir gran cantidad y variedad de desechos, residuos vegetales, estiércol, efluentes de la industria alimentaria y fermentativa, de la industria papelera y de algunas industrias químicas, en subproductos útiles.

En la digestión anaeróbica más del 90% de la energía disponible por oxidación directa se transforma en metano, consumiéndose sólo un 10% de la energía en crecimiento bacteriano frente al 50% consumido en un sistema aeróbico [14]. La digestión anaeróbica es uno de los procesos más utilizados, para el tratamiento de purines, en el que la materia orgánica es transformada biológicamente, bajo condiciones anaeróbicas, en metano y Dióxido de carbono. Además de esta corriente gaseosa, se produce también una suspensión acuosa de materiales sólidos (lodos), en los que se encuentran los componentes más difíciles de degradar, la mayor parte del nitrógeno y el fósforo y la totalidad de los elementos minerales.

El gas producido puede ser recogido y utilizado como combustible. El fango final estabilizado, que se extrae no es putrescible y su contenido en organismos patógenos es nulo o muy bajo. Esta conversión biológica del sustrato complejo, en el que se encuentra materia orgánica en suspensión o disuelta, se realiza a través de una serie de reacciones bioquímicas que transcurren tanto consecutiva como simultáneamente. Este proceso biológico natural, es realizado por grupos o comunidades de bacterias en reactores.

La permanencia de las aguas en la laguna de almacenamiento proporciona un tratamiento adicional al purín, debido a que en ella disminuye el contenido de nitrógeno y otros nutrientes de las aguas. Se debe descartar que el efluente proveniente del digestor, posea una carga orgánica muy baja, lo que implica que la laguna deja de tener actividad

microbiana de descomposición o es escasa, con lo que los sólidos que salen del digestor solo tienden a decantar.

La fermentación metánica es un proceso complejo que se divide en etapas de Degradación, estas son: Hidrólisis, Acidogénesis, Acetogénesis y Metanización [9] .

La primera fase es la hidrólisis de partículas y moléculas complejas (proteínas, carbohidratos y lípidos) que son hidrolizadas por enzimas extracelulares producidas por los microorganismos acidogénicos o fermentativos. Como resultado se producen compuestos solubles más sencillos (aminoácidos, azúcares y ácidos grasos de cadena larga) que serán metabolizados por las bacterias acidogénicas dando lugar, principalmente, a ácidos grasos de cadena corta, alcoholes, hidrógeno, dióxido de carbono y otros productos intermedios. Los ácidos grasos de cadena corta son transformados en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono, mediante la acción de los microorganismos acetogénicos. Por último, los microorganismos metanogénicos producen metano a partir de ácido acético, H_2 y CO_2 . [15]

3.5.1 Hidrólisis

La materia orgánica polimérica no puede ser utilizada directamente por los microorganismos a menos que se hidrolicen en compuestos solubles, que puedan atravesar la pared celular. La hidrólisis es el primer paso necesario para la degradación anaeróbica de sustratos orgánicos complejos. Por tanto, es el proceso de hidrólisis el que proporciona sustratos orgánicos para la digestión anaeróbica. La hidrólisis de estas moléculas complejas es llevada a cabo por la acción de enzimas extracelulares producidas por microorganismos hidrolíticos.

La etapa hidrolítica puede ser el proceso limitante de la velocidad global del proceso sobre todo cuando se tratan residuos con alto contenido de sólidos. Además, la hidrólisis depende de la temperatura del proceso, del tiempo de retención hidráulico, de la composición bioquímica del sustrato (porcentaje de lignina, carbohidratos, proteínas y grasas), del tamaño de partículas, del nivel de pH, de la concentración de NH_4 y de la concentración de los productos de la hidrólisis.

Cualquier sustrato se compone de tres tipos básicos de macromoléculas: hidratos de carbono, proteínas y lípidos. Las proteínas constituyen un sustrato muy importante en el proceso de digestión anaeróbica debido a que además de ser fuente de carbono y energía, los aminoácidos derivados de su hidrólisis tienen un elevado valor nutricional. Las proteínas son hidrolizadas en péptidos y aminoácidos por la acción de enzimas proteolíticas llamadas proteasas. Parte de estos aminoácidos son utilizados directamente en la síntesis de nuevo material celular y el resto son degradados a ácidos volátiles, dióxido de carbono, hidrógeno, amonio y sulfuro en posteriores etapas del proceso. La degradación de los lípidos en ambientes anaeróbicos comienza con la ruptura de las grasas por la acción de enzimas hidrolíticas denominadas lipasas produciendo ácidos grasos de cadena larga y glicerol.

La velocidad de degradación de los materiales lignocelulósicos compuestos principalmente por lignina, celulosa y hemicelulosa, es tan lenta que suele ser la etapa limitante del proceso de hidrólisis. Esto es debido a que la lignina es muy resistente a la

degradación por parte de los microorganismos anaeróbicos afectando también a la biodegradabilidad de la celulosa, de la hemicelulosa y de otros hidratos de carbono. Los principales productos de la hidrólisis de la celulosa son celobiasa y glucosa, mientras que la hemicelulosa produce pentosas, hexosas y ácidos urónicos. La tasa de hidrólisis, en general, aumenta con la temperatura. La tasa de hidrólisis depende, también, del tamaño de las partículas, debido fundamentalmente a la disponibilidad de superficie para la adsorción de las enzimas hidrolíticas. Los pretratamientos físico-químicos, cuyo principal efecto es la reducción del tamaño de las partículas, producen un aumento en la tasa de hidrólisis, y si esta fase es la limitante del proceso anaerobio, supone un beneficio para el proceso general, produciendo menores tiempos de retención y tamaños de reactor menores [15].

3.5.2 Etapa Acidogénica

Durante esta etapa tiene lugar la fermentación de las moléculas orgánicas solubles en compuestos que puedan ser utilizados directamente por las bacterias metanogénicas (acético, fórmico, H_2) y compuestos orgánicos más reducidos (propiónico, butírico, valérico, láctico y etanol principalmente) que tienen que ser oxidados por bacterias acetogénicas en la siguiente etapa del proceso. La importancia de la presencia de este grupo de bacterias no sólo radica en el hecho que produce el alimento para los grupos de bacterias que actúan posteriormente, sino que, además eliminan cualquier traza del oxígeno disuelto del sistema. Este grupo de microorganismos, se compone de bacterias facultativas y anaeróbicas obligadas, colectivamente denominadas bacterias formadoras de ácidos [15].

3.5.3 Etapa Acitogenica

Mientras que algunos productos de la fermentación pueden ser metabolizados directamente por los organismos metanogénicos (H_2 y acético), otros (etanol, ácidos grasos volátiles y algunos compuestos aromáticos) deben ser transformados en productos más sencillos, como acetato e hidrógeno, a través de las bacterias acetogénicas. Representantes de los microorganismos acetogénicos son Syntrophomonas wolfei y Syntrophobacter wolini. Un tipo especial de microorganismos acetogénicos, son los llamados homoacetogénicos. Este tipo de bacterias son capaces de crecer heterotróficamente en presencia de azúcares o compuestos monocarbonados produciendo como único producto acetato. Al contrario que las bacterias acetogénicas, éstas no producen hidrógeno como resultado de su metabolismo, sino que lo consumen como sustrato. Según se ha estudiado, el resultado neto del metabolismo homoacetogénico permite mantener bajas presiones parciales del hidrógeno y, por tanto, permite la actividad de las bacterias acidogénicas y acetogénicas. Los principales microorganismos homoacetogénicos que han sido aislados son Acetobacterium woodii o Clostridium aceticum. A esta altura del proceso, la mayoría de las bacterias anaeróbicas han extraído todo el alimento de la biomasa y, como resultado de su metabolismo, eliminan sus propios productos de desecho de sus células. Estos productos, ácidos volátiles sencillos, son los que van a utilizar como sustrato las bacterias metanogénicas en la etapa siguiente [15].

3.5.4 Etapa Metanogénica

En esta etapa, un amplio grupo de bacterias anaeróbicas estrictas, actúa sobre los productos resultantes de las etapas anteriores. Los microorganismos metanogénicos pueden ser considerados como los más importantes dentro del consorcio de microorganismos anaerobios, ya que son los responsables de la formación de metano y de la eliminación del medio de los productos de los grupos anteriores, siendo, además, los que dan nombre al proceso general de biometanización. Los microorganismos metanogénicos completan el proceso de digestión anaeróbica mediante la formación de metano a partir de sustratos monocarbonados o con dos átomos de carbono unidos por un enlace covalente: acetato, H_2/CO_2 , formato, metanol y algunas metilaminas. Los organismos metanogénicos se clasifican dentro del dominio Archaea y tienen características comunes que los diferencian del resto de procariotas. Se pueden establecer dos grandes grupos de microorganismos, en función del sustrato principal que metabolizan: hidrogenotróficos, que consumen H_2/CO_2 y fórmico y acetoclásticos, que consumen acetato, metanol y algunas aminas. Se ha demostrado que un 70% del metano producido en los reactores anaeróbicos se forma a partir de la descarboxilación de ácido acético, a pesar de que, mientras todos los organismos metanogénicos son capaces de utilizar el H_2 como aceptor de electrones, sólo dos géneros pueden utilizar acetato. Los dos géneros que tienen especies acetotróficas son *Methanosarcina* y *Methanotrix*. El metano restante proviene de los sustratos ácido carbónico, ácido fórmico y metanol. El más importante es el carbónico, el cual es reducido por el hidrógeno, también producido en la etapa anterior [15].

3.6 Factores que influyen en la producción de biogás

Existen diversos factores que influyen en la calidad de biogás que se va a producir, estos serán descritos a continuación:

- Tipos de materia prima.

Se deben utilizar para este proceso, materias primas fermentables, como por ejemplo excrementos, aguas residuales orgánicas de industrias, restos de cosechas, basura. Estas materias primas deben contener fuentes de carbono y nitrógeno, y estar en ciertos equilibrios sales minerales (azufres, fósforos, potasio, calcio, magnesio, hierro, manganeso, molibdeno, zinc, cobalto, selenio, tungsteno, níquel y otros menores).

Normalmente, las sustancias orgánicas como el estiércol y lodos cloacales presentan estos elementos en proporciones adecuadas. Sin embargo, en la digestión de ciertos desechos industriales puede presentarse casos en que es necesaria la adición de los compuestos enumerados, o bien en post tratamiento aeróbico.

- Temperatura

La digestión anaerobia se puede llevar a cabo a cualquier temperatura entre 5 y 70°C, existiendo tres rangos de temperatura: el rango psicrófilo (menor a 20 °C) en el cual se produce un mínimo de bacterias activas, el rango mesófilo (20-40°C) con un óptimo entre 35 y 37 °C, y el rango termófilo (40-47°C) con un óptimo entre 60 y 63 °C.

La velocidad con que se lleva a cabo la digestión es muy sensible a la temperatura, produciéndose a mayor temperatura, mayor degradación del sustrato, mayor producción de biogás, y requiere tiempos de retención menor. Sin embargo, la cantidad de metano en el biogás es menor, y las bacterias son más susceptibles a variaciones en la temperatura.

En cambio, en el rango mesófilo, las bacterias resisten pequeñas variaciones de temperatura y el biogás generado es de mejor calidad (mayor cantidad de metano), debido que a tiempos de retención bajo (alta temperatura), se alcanza a degradar las sustancias fácilmente degradables que, generalmente, producen un biogás con menor contenido de metano y, por lo tanto, se obtienen conversiones menores.

Además, la temperatura tiene influencia directa sobre la actividad de las bacterias y sobre la humedad de biogás producido, aumentando exponencialmente la humedad del gas con el aumento en la temperatura [10].

- Velocidad de carga volumétrica

El Volumen de carga volumétrica, es el volumen de sustrato orgánico cargado diariamente en el digestor y existen diferentes formas de expresar este parámetro siendo los más usuales los siguientes: kg de material/día; kg de materia seca/día; kg de sólidos volátiles/día, todos expresados por metro cubico de digestor.

- Tiempos de retención.

El TRH está íntimamente ligado con dos factores: el tipo de sustrato y su temperatura.

La selección de una mayor temperatura implicara una disminución en los tiempos de retención requeridos y consecuentemente, serán menores los volúmenes de reactor necesarios para digerir un determinado volumen de material.

La relación costo beneficio es el factor que finalmente determinara la optimización entre la temperatura y el TRH, ya que varían los volúmenes, los sistemas paralelos de control, la calefacción y eficiencia.

- Acidez.

Una vez estabilizado el proceso fermentativo, el pH se mantiene en valores que oscilan entre 7 y 8.5.

Debido a los efectos buffer que producen los compuestos bicarbonato-dióxido de carbono y Amonio-Amoniaco, el proceso en sí mismo tiene la capacidad de regular diferencias en el pH del material de entrada.

- Factor de Carga.

La carga del digestor corresponde al peso de materia orgánica alimentada por unidad de volumen del digestor por día. Este se puede calcular si se conoce el TRH y la concentración del influente.

Al aumentar la carga se reduce el volumen del digestor, pero se convierte un menor porcentaje de sólidos volátiles a biogás.

Este parámetro describe exactamente el tamaño del reactor necesario para cierta tasa de alimentación. Los otros parámetros, como la concentración de sólidos y el tiempo de retención, no proveen una base válida para la comparación de costos de los digestores. La concentración de sólidos no indica la tasa de alimentación, y el TRH varía significativamente con la concentración de sólidos [10].

- Contenido de sólidos.

La movilidad de las bacterias metanogénicas dentro del sustrato se ve crecientemente limitada a medida que se aumenta el contenido de sólidos y por lo tanto puede verse afectada la eficiencia y producción de gas.

Normalmente el porcentaje de sólidos del estiércol vacuno es de 18 %, por lo tanto, se debe agregar agua para llevar el porcentaje de sólidos al ideal (8 % a 12 %).

- Agitación y mezclado.

Los objetivos buscados con la agitación son varios, se requiere la remoción de los metabolitos producidos por las bacterias metanogénicas, el mezclado del sustrato fresco con la población bacteriana, evitar la formación de costra que se forma dentro del digestor, uniformar la densidad bacteriana y evitar la formación de espacios muertos sin actividad biológica.

- Relación C/N.

La relación entre la cantidad de carbono y nitrógeno presente en la materia orgánica expresada como Carbono/Nitrógeno (C/N).

La relación óptima de C/N es entre 20 y 30.

Si esta relación C/N es muy alta, el Nitrógeno se va a consumir rápidamente por las bacterias metanogénicas, para satisfacer sus necesidades proteicas y no reaccionara más con el contenido restante del Carbono. Como resultado, la producción de gas bajara.

Por otro lado, si la relación C/N es muy baja, el Nitrógeno será liberado y acumulado en forma de amonio. El amonio incrementa el pH del contenido del biodigestor. Un pH mayor 8.5 empezara a mostrar un efecto toxico en la población metanogénica.

- Inhibidores

La presencia de metales pesados, antibióticos y detergentes en determinadas concentraciones pueden inhibir e incluso, interrumpir el proceso fermentativo.

La Tabla 3-3 muestra los diferentes elementos con sus porcentajes respectivos, que componen al biogás.

Tabla 3-3 Composición del biogás

Componente	Porcentaje volumétrico
CH_4	40-70
CO_2	30-60
H_2O	0-1
H_2S	0-3
Otros (NH_3)	0-2

3.7 Resumen del proceso

- Tanque de almacenamiento.

El Tanque de almacenamiento, es necesario para poder proveer una corriente constante de estiércol al digestor. Para esto se usa un tanque generalmente de cemento, que posee un ducto de alimentación que sirve para almacenar los sustratos y así lograr un buen mezclado.

El tamaño de este tanque debe tener un volumen lo suficientemente grande como para poder almacenar hasta 2 días la producción de estiércol [10]

- Bombas.

Para transportar el estiércol, desde el Tanque de almacenamiento hasta el digestor, se utilizan las bombas de émbolos rotativos, de cavidad progresiva, y centrifuga de vórtice.

- Digestor anaeróbico.

El digestor anaeróbico es un contenedor cerrado, hermético e impermeable, dentro del cual se deposita el material orgánico a fermentar y se descomponga, produciendo gas metano y fertilizantes orgánicos ricos en nitrógeno, fósforo y potasio. El tratamiento anaerobio elimina los malos olores y la proliferación de moscas. Se deben controlar ciertas condiciones tales como el pH, la presión y la temperatura a fin de que se pueda obtener un óptimo rendimiento [16].

En la Fig. 3-1 se muestra un diagrama completo del proceso, de una manera muy resumida, se logra observar el tanque de almacenamiento, las bombas, y el digestor anaerobio.

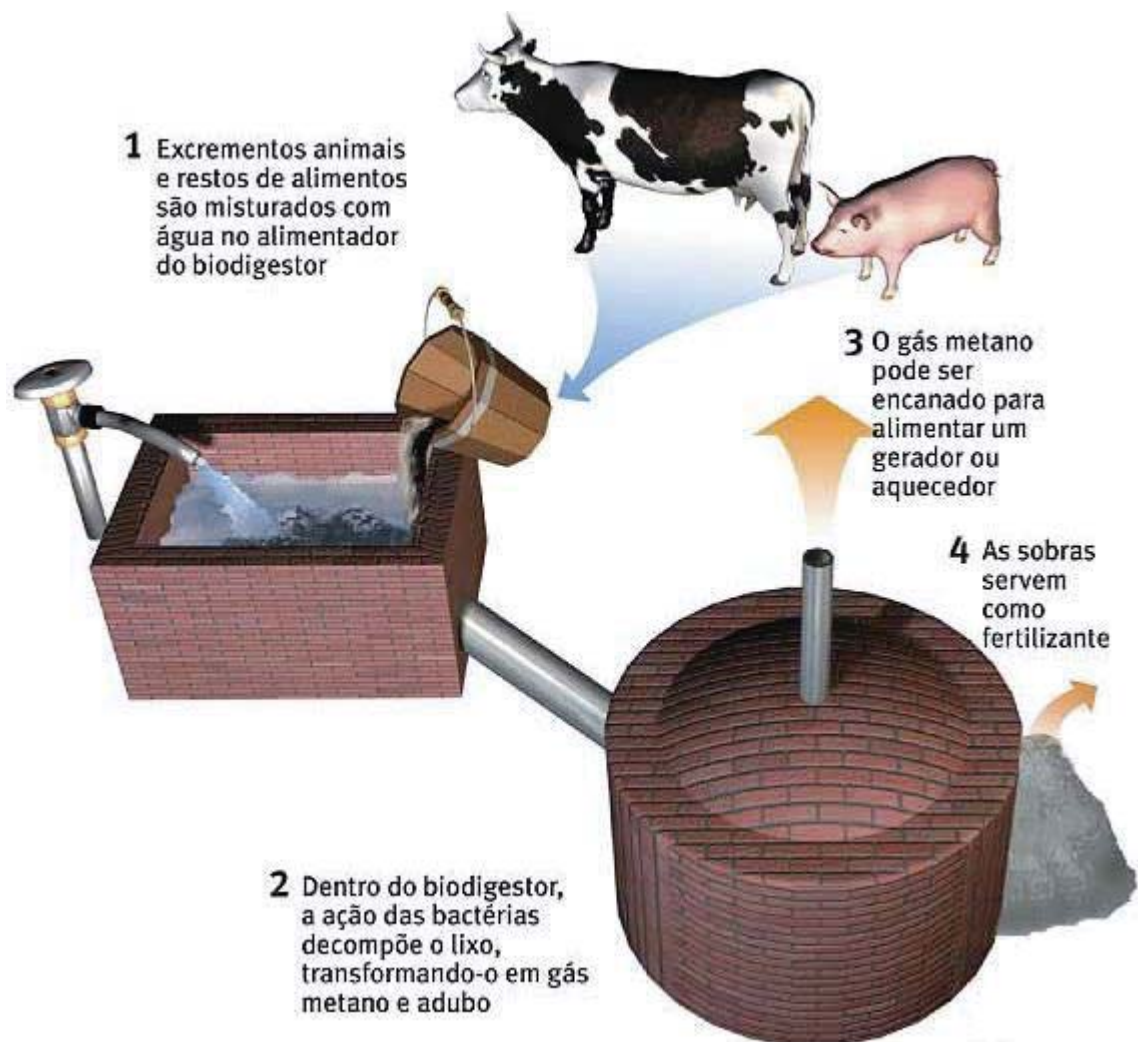


Fig. 3-1 Diagrama del Proceso de Digestión Anaerobia.

- Mezclamiento de los digestores.

El mezclado es muy importante ya que las bacterias se deben adaptar el sustrato, para que se realice una optimización de producción de biogás.

El proceso de digestión anaerobia se lleva a cabo, en un reactor cerrado, por lo que, no es accesible a mantenciones mientras que opera, por lo tanto, es importante que en el reactor requieran de poca mantención.

Para esto se han empleado diversos sistemas, en este caso se utiliza la agitación mecánica interna.

El Agitador de hélice con motor sumergido es el más usado en digestores que tratan purines de animales, puesto que se montan de manera tangencial a la pared del digestor [10].

- Calentamiento de los digestores.

La función de esta operación es mantener el digestor con la temperatura adecuada para el proceso. Para esto deben ser capaz de proveer el calor necesario para calentar al estiércol a una cierta temperatura y además compensar las pérdidas de calor en las paredes del digestor.

La transmisión de calor se realiza indirectamente, a través de intercambiadores de calor externos. Este intercambiador externo, que se selecciona generalmente para estos procesos, es el de doble tubo, este consiste básicamente en dos tubos concéntricos por donde fluyen por un tubo aire caliente y en el otro aire frío. En la Fig. 3-2 se muestra un dibujo explicativo del intercambiador de doble tubo [10].

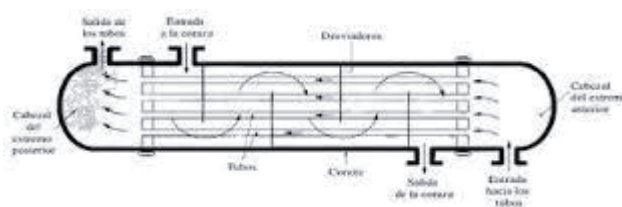


Fig. 3-2 Intercambiador de doble tubo.

- Antorcha de biogás.

La antorcha de biogás, se utilizan para eliminar los gases que se han producido en exceso. Esta antorcha va provista de una llama piloto de quemado continuo, para que cualquier exceso de gas que pase por el regulador se queme, la quema de flujos es hasta 1000 m³/h [10].

- Purificación del Biogás.

El biogás, generado en plantas de biogás a partir de residuos ganaderos, contiene aproximadamente un 0,2 % de sulfuro de hidrogeno, este debe ser removido debido que es un gas altamente corrosivo y puede dañar los equipos eléctricos. Por lo tanto, para eliminar este gas se utilizan dos vías, la vía química o biológica [10].

- Cogeneración de energía térmica y eléctrica.

La generación de calor y electricidad se logra a través de unos módulos compactos que están constituidos por un motor, un generador y un sistema de enfriamiento, llamados CHP.

Este sistema puede operar, además de gas natural, con diversos combustibles como mezclas de butano y propano, gases amargos y biogás, entre otros. Sin embargo, estos combustibles pueden contener contaminantes que deben ser removidos antes de ser alimentados al motor, siendo en el caso de biogás el principal contaminante el sulfuro de hidrogeno. En la Fig. 3-3 se muestra un esquema de un sistema CHP.

La energía térmica generada en los sistemas de CHP se debe aprovechar al máximo, ya sea para el proceso o para calentar viviendas que se ubican en la cercanía de la planta. En el caso de no aprovechar el calor generado se requiere de un sistema de enfriamiento de emergencia para el enfriamiento del motor.

La temperatura a la cual el agua de enfriamiento del motor abandona el sistema es de aproximadamente unos 100 grados Celsius [10]

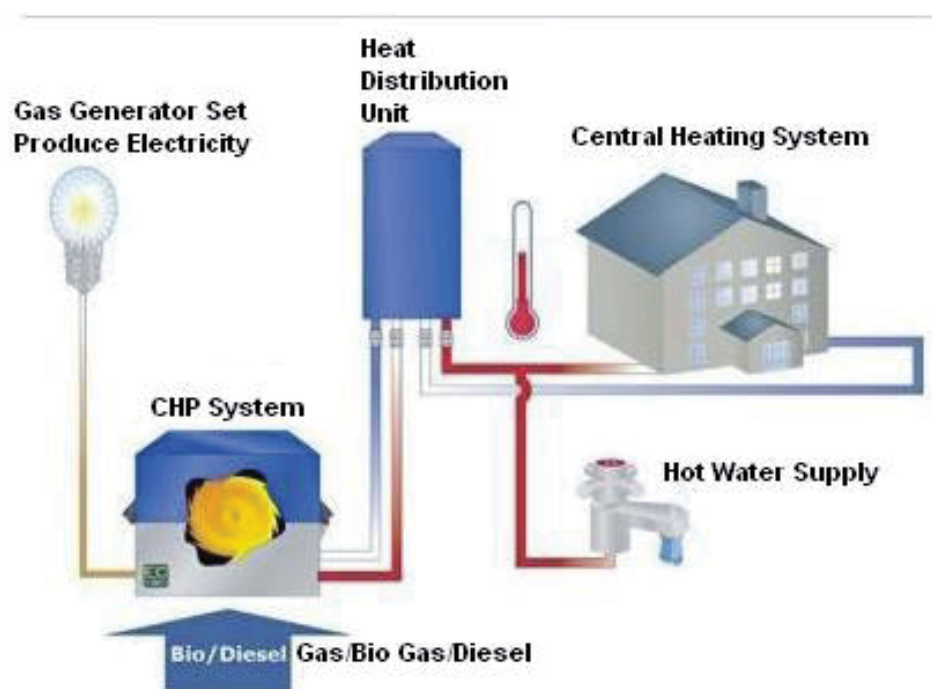


Fig. 3-3 Sistema de Cogeneración CHP.

CAPÍTULO 4

CASO DE ESTUDIO ISLA QUENU

Para poder realizar un proyecto de ERNC se dará a conocer algunas características como: la situación geográfica, topográfica y climática de la zona en estudio, para encaminar el proyecto a soluciones viables y de esta manera se evaluará si el proyecto es realizable.

4.1.1 Aspectos generales de la isla Quenu

En idioma mapuche Quenu significa “el gangoso”, entonces sería “Tierra de Gangoso”. La isla pertenece a la administración de la ciudad de Calbuco, Provincia de Llanquihue, Xª región de Chile, formando parte de las 14 islas del archipiélago de Calbuco, este se muestra en la Fig. 4-1. Se ubica al suroeste de la comuna de Calbuco, específicamente a los 41°49' de latitud y 73°09' de longitud y posee una superficie de 240 hectáreas.

La Isla Quenu se caracteriza por la ausencia de montes, esto da lugar a planicies las que se encuentran en su mayoría cubiertas de matorrales y árboles.

El número de habitantes es de 169 personas, y la forma de vida de los isleños se basa en las actividades como: pesca, agricultura, ganadería ovina y comercio con las ciudades de Calbuco y Puerto Montt.

En cuanto al turismo, se recomienda visitar la capilla “Nuestra Señora del Rosario”, construcción que representa fielmente la religiosidad popular de la zona insular, además, se puede visitar el mirador ubicado en el sector Oeste en donde podrán divisar la isla Tabón, otra de las cuales conforman el archipiélago.

El clima es templado-lluvioso con influencia mediterránea. La temperatura media que alcanza es de 8,7° C. y no es posible encontrar meses secos a lo largo del año.

4.1.2 Situación social

La población se distribuye entre 51 viviendas. Existe una escuela pública llamada, “escuela rural Quenu”, a la que asisten 18 niños que cursan hasta sexto básico. Una vez finalizada esta etapa algunos niños son enviados a terminar su enseñanza básica y proseguir con la enseñanza media a internados ubicados en la Isla Puluqui o en Calbuco.

Los habitantes se organizan a través de una junta de vecinos y existe una parte que se dedican al agroturismo.

Actualmente, la isla cuenta con electricidad, pero antes del año 2013 solo tenían electricidad entre 3 a 4 horas diarias con un costo cercano a los \$70 mil pesos por familia, con el sistema actual este valor no supera los \$ 15 mil pesos, se ha tomado como ejemplo esta isla, ya que, con su información, y con esto poder hacer una comparación entre un sistema eólico y biomasa en una zona insular.

Tabla 4-1 Cuadro resumen del sistema.

Tipo	Cantidad	Consumo promedio (kWh/mes)	Total año (kWh)
Residencial	51	65	39.780
Escuela	1	120	1.440
Iglesias	1	5	60
Posta	1	120	1.440
Porcentaje de pérdidas por distribución 15%			6.870
TOTAL			49.128

Tabla 4-2 Proyección del consumo de energía isla Quenu.

Año	Tasa variable de crecimiento de consumo residencial	Consumo Energía promedio por Familia [kWh/Mes]	N° de viviendas	Energía total anual sector residencial [kWh/Año]	Consumo por Servicios Públicos (Escuela, Posta, Iglesia y Sede social) [kWh/Año]	Consumo de Energía anual más pérdidas [kWh/Año]
0	12,50%	65	51	39.780	2940	49.128
1	9,75%	71	51	43.452	2984	53.401
2	7,61%	77	52	48.048	3029	58.739
3	5,93%	81	52	50.544	3074	61.661
4	4,63%	85	53	54.060	3121	65.758
5	3,61%	88	53	55.968	3168	68.006
6	2,81%	91	54	55.968	3216	68.062
7	2,20%	93	54	60.264	3264	73.057
8	1,71%	94	55	62.040	3313	75.156
9	1,34%	95	55	62.700	3363	75.973
10	1,04%	96	56	64.512	3413	78.114
11	0,81%	97	56	65.184	3465	78.946
12	0,63%	98	57	67.032	3517	81.131
13	0,39%	98	57	67.032	3570	81.192
14	0,30%	99	58	68.904	3624	83.407
15	0,23%	99	58	68.904	3678	83.469
16	0,18%	99	59	70.092	3734	84.900
17	0,14%	99	59	70.092	3790	84.964
18	0,11%	100	60	72.000	3847	87.224
19	0,09%	100	61	73.200	3905	88.671
20	0,07%	100	61	73.200	3964	88.739

Para calcular el requerimiento de potencia, según datos de referencia de isla Guar se establece como potencia instalada de 3 KVA por vivienda y para los servicios públicos empalmes de mayor capacidad, tal como se muestra en la Tabla 4-3.

Tabla 4-3 Requerimientos de potencia isla Quenu.

Tipos de Beneficiarios	Potencia en KVA	Factor de Demanda	Demanda Máxima por Vivienda KVA	Nº Beneficiarios	Demanda Máxima Total	Factor de diversidad	Demanda Máxima Total diversificada KVA	Demanda Máxima Total diversificada KW; FP=0,93
Casas	3	0.5	1.5	51	76.5	0.71	54.3	50.5
Escuela	10	0.7	7	1	7	0.64	4.5	4.19
Posta	10	0.7	7	1	7	0.64	4.5	4.19
Iglesia	5	0.5	2.5	1	2.5	0.7	1.8	1.68
Potencia total							65.1	60.6

4.3 Estudio de generación eléctrica por biogás

El objetivo es conocer la factibilidad técnica y económica de generar energía eléctrica, a partir de biogás obtenido por la digestión anaerobia de estiércol bovino.

A continuación se mostrará el diseño para abastecer un consumo de 122,640 kWh/año, ya que, el diseño se realiza para el consumo de energía para el año 20 y se le suma una proyección del consumo eléctrico de la sala de ordeña.

Este modelo fue obtenido de según (Ramelli, 2007) y fue adaptado para los requerimientos energéticos de la isla Quenu, este modelo se describe en 12 pasos.

4.3.1 Diseño del tanque de almacenamiento

Para asegurar una alimentación constante al digestor, el tanque debe tener una capacidad para almacenamiento para 2 días.

$$Ve = 2 [d] \cdot V1 \quad (4-1)$$

Donde:

Ve: Volumen del tanque de almacenamiento [m^3]

V1: Flujo volumétrico de estiércol diario, $5,97 \left[\frac{m^3}{d} \right]$

En la Tabla 4-4 se muestra el dimensionamiento del tanque de almacenamiento.

Tabla 4-4 Dimensionamiento del tanque de almacenamiento.

Bovinos	Volumen	Diámetro	Altura
Unidad	m^3	M	m
117	11,95	3	1.7

4.3.2 Diseño del digestor

Se debe determinar el volumen útil del digestor (V_n), este se obtiene multiplicando el tiempo de retención hidráulico (TRH) estimado en 30 días con el flujo volumétrico del estiércol diario (V_1).

$$V_n = TRH \cdot V_1 \quad (4-2)$$

El volumen calculado corresponde al 85% del volumen total, por lo tanto, el volumen total del digestor es 211 [m^3]. Luego para efectos de cálculo se determina un diámetro $D = 8$ metros y una altura $H = 4,2$ metros.

Para la cubierta del digestor, se toma una altura de la cubierta (h_c) de 0,64 metros, y tomando en cuenta que la cubierta del digestor es idéntica a la mitad de una esfera se determina mediante la ecuación (4-3) para calcular el radio de la cubierta (R_c).

$$R_c = \frac{D^2}{8h_c} + \frac{h_c}{2} \quad (4-3)$$

Luego el área de la cubierta (A_c) y el volumen de la cubierta flotante (V_c) quedan determinados por las ecuaciones (4-4) y (4-5).

$$A_c = \pi \times 2R_c \times h_c \quad (4-4)$$

$$V_c = \frac{1}{3} \times \pi \times h_c^2 \times (3R_c - h_c) \quad (4-5)$$

Además, se debe incluir un recubrimiento de la cubierta, el cual es 50 % más alto, es decir, tiene una altura (h_{rc}) de 0,96 metros.

$$h_{rc} = 1,5 \times h_c \quad (4-6)$$

El recubrimiento también posee las mismas características que una esfera y su radio queda expresado por:

$$Rrc = \frac{D^2}{8hrc} + \frac{hrc}{2} \quad (4-7)$$

Arc: Área de recubrimiento

$$Vrc = \frac{1}{3} \times \pi \times hrc^2 \times (3Rrc - hrc) \quad (4-8)$$

Vrc:: Volumen de recubrimiento

En la Tabla 4-5 se muestra el cuadro resumen del diseño del digestor.

Tabla 4-5 Datos del diseño del digestor.

Parámetros	Unidad	Cantidad
Volumen necesario del digestor	m^3	179
Volumen real del digestor	m^3	211
Diámetro del digestor	m	8
Altura del digestor	m	4,2
Área digestor	m^2	105,5
Volumen cubierta	m^3	16,21
Área cubierta	m^2	51,53
Altura cubierta	m	0,64
Volumen recubrimiento	m^3	24,56
Área recubrimiento	m^2	53,11
Altura de recubrimiento	m	0,96
Altura entre las cubiertas	m	0,32

4.3.3 Requerimientos de calor para el digestor

El intercambio de calor cumple la función de entregar una suficiente cantidad calor para calentar el estiércol a una temperatura de operación y debe cubrir las pérdidas que existen en las paredes del digestor.

Las pérdidas de calor en las paredes del digestor, se calculan mediante las siguientes ecuaciones:

$$\frac{1}{Up} = \frac{xH}{kH} + \frac{xL}{kL} + \frac{xZ}{kZ} + \frac{1}{ha} \quad (4-9)$$

Up: Coeficiente global de transferencia de calor a través de paredes [$\frac{W}{m^2K}$]

xH: Espesor de la pared de hormigón [m]

xL: Espesor de la pared de Lana mineral [m]

xZ: Espesor la lámina de zinc-alum [m]

kH: Coeficiente de conductividad hormigón [$\frac{W}{m^2K}$]

kL: Coeficiente de conductividad Lana mineral [$\frac{W}{m^2K}$]

kZ: Coeficiente de conductividad zinc-alum [$\frac{W}{m^2K}$]

Ha: Coeficiente de convección aire [$\frac{W}{m^2K}$]

$$Qp = Ap * Up * (Td - Ta) \quad (4-10)$$

Qp: Perdida de calor a través de las paredes del digestor [W]

Ap: Área de paredes [m^2]

Td: temperatura dentro del digestor [K]

Ta: Temperatura ambiente [K]

$$\frac{1}{Ut} = \frac{xPVC}{kPVC} + \frac{xa}{ka} + \frac{1}{hB} + \frac{1}{ha} \quad (4-11)$$

Ut: Coeficiente global de transferencia de calor a través del techo del digestor [$\frac{W}{m^2K}$]

xPVC: grosor cubierta digestor [m]

xa: Grosor de la capa de aire entre las cubiertas del digestor [m]

kPVC: Coeficiente de conductividad PVC [$\frac{W}{m^2K}$]

ka: Coeficiente de conductividad aire [$\frac{W}{m^2K}$]

$$Qt = At * Ut * (Td - Ta) \quad (4-12)$$

Qt: Perdida de calor a través del techo del digestor [W]

Ap: Área del techo [m^2]

$$Q_i = V_2 * C_{pe} * (T_{ic} - T_{if}) \quad (4-13)$$

Q_i : Calor requerido para calentar el influente [$\frac{J}{d}$]

V_2 : Caudal de estiércol que ingresa al digestor [$\frac{m^3}{d}$]

C_{pe} : Calor específico del estiércol [$\frac{J}{tK}$]

T_{ic} : Temperatura influente caliente [K]

T_{if} : Temperatura influente frío [K]

Luego, el calor total requerido se determina mediante:

$$Q_t = Q_i + Q_t + Q_p \quad (4-14)$$

Q_t : Calor total requerido [W]

En la Tabla 4-6, se describen los parámetros para el cálculo del intercambiador de calor [10].

Tabla 4-6 Parámetros para el cálculo del intercambiador de calor.

Material	k [W/mK]	k [W/m ² K]	Espesor [m]
Hormigon	1.4	-	0.3
Lana mineral	0.035	-	0.1
Zinc-alum	6.51	-	0.00035
PVC	0.2	-	0.001
Aire	0.0238	28	-
Biogas	-	9	-
Calor específico estiércol [KJ/m ³ K]			4.176

Con las ecuaciones descritas anteriormente y utilizando las Tabla 4-5 y Tabla 4-6, se determina cuanto calor requiere el digestor. Se realiza la siguiente suposición que la temperatura del influente es de 0 °C (caso más desfavorable) y se calienta a 35°C [6]. En la Tabla 4-7, se muestran los resultados de los requerimientos de calor para la planta.

4.3.4 Diseño del intercambiador de calor de doble tubo

Para el diseño del intercambiador de calor de doble tubo, se debe calcular la temperatura a la cual debe ser calentado el estiércol.

$$Q_t = V_1 \times C_{pe} \times (T_{is} - T_{if}) \quad (4-15)$$

Donde:

Qt: Calor total requerido, 986.556 $\left[\frac{KJ}{m^3 Kelvin}\right]$

Cpe: Calor específico de estiércol 4176 $\left[\frac{KJ}{m^3 Kelvin}\right]$

V1: Caudal de estiércol alimentado, 5,97 $\left[\frac{m^3}{d}\right]$

Fv: Flujo de vapor requerido, $\left[\frac{t}{d}\right]$

Hv: Calor sensible de vaporización, 2,26 $\left[\frac{Mt}{Kg}\right]$

A: Área del intercambiador, m^2

U: Coeficiente global de transferencia de calor, $\left[\frac{W}{m^3 K}\right]$

LMTD: Media logarítmica de la diferencia de temperatura, Kelvin

Tabla 4-7 Requerimientos de calor para la planta.

Parámetro	Unidad	Valor
Coeficiente global de transferencia de calor a través de las paredes (Up)	W/m ² K	0.3218
Coeficiente global de transferencia de calor a través del techo (Ut)	W/m ² K	0.0735
Perdida de calor a través de las paredes del digestor (Qp)	KWh/d	28,5
Perdida de calor a través del techo del digestor (Qt)	KWh/d	3.28
Calor requerido para calentar el influente (Qi)	KWh/d	242,38
Calor tota requerido (Qt)	KWh/d	274,6

Se considera la temperatura del sustrato frío (Tif) igual a 25°C y se obtiene, mediante la ecuación (5-16) la temperatura del sustrato calentado (Tis) de 65°C .Además, para calentar el estiércol se utiliza vapor de baja presión proveniente un sistema CHP y se determina el flujo necesario, el cual se muestra a continuación.

$$F_v = \frac{Q_T}{H_v} \quad (4-16)$$

Para el intercambiador de doble tubo se debe obtener un área, esta queda expresada por:

$$A = \frac{Q_t}{U \times LMTD} \quad (4-17)$$

LMTD se define como:

$$LMTD = \frac{[T_c - T_f]_s - [T_c - T_f]_o}{\ln \left[\frac{[T_c - T_f]_s}{[T_c - T_f]_o} \right]} \quad (4-18)$$

Dónde:

Tc: Temperatura del fluido caliente, Kelvin

Tf: Temperatura del fluido frio, Kelvin

s: Salida de los fluidos del intercambiador

o: Entrada de los fluidos al intercambiador

Para realizar los cálculos considera una temperatura de entrada igual a la salida, es decir, 373,15 Kelvin. La temperatura de entrada del estiércol se considera igual a 298,15 Kelvin y la salida igual a 338 Kelvin. Por lo tanto, el LMTD es 52,6 Kelvin.

Para intercambiadores de calor que utilizan vapor fluido de calentamiento de soluciones acuosas, el valor del coeficiente global de transferencia de calor a utilizar es 1.200 $[W/m^2K]$ y mediante la ecuación (4-19) se determina el área requerida para el intercambio de calor.

Para determinar el diámetro de ambos tubos se tiene:

$$L = \frac{A}{SI} \quad (4-19)$$

Donde:

L: Largo de los tubos, [m]

SI: Superficie exterior por metro lineal de tubo $\left[\frac{m^2}{m}\right]$

Se selecciona un intercambiador 1×3, presentándose en las Tabla 4-7 y en Tabla 4-8 estas se describen las características de los tubos a utilizar.

Tabla 4-7 Dimensiones de los tubos del intercambiador de calor.

Diámetro nominal [p/g]	Diámetro externo [m]	Nº Cedula	Diámetro interno [m]	Área de flujo [m^2]	SI exterior [m^2/m]
1	0.034	40	0.027	0.0006	0.1

Tabla 4-8 Área de flujo y diámetro del intercambiador de calor.

Doble tubo	Área de flujo [m^2]		Anulo [m]	
	Anulo	Tubo	De	De
1×3[p/g]	0.0041	0.0006	0.096	0.044

Una vez que se conoce los datos del flujo de estiércol y de vapor, utilizando el área de flujo se calcula las velocidades de circulación de los dos fluidos, estas se determinan mediante las ecuaciones (4-20) y (4-21).

$$v_{estiercol} = \frac{V1}{0,0006 [m^2]} \quad (4-20)$$

$$v_{vapor} = \frac{Fv}{0,0041 [m^2]} \quad (4-21)$$

También se deben calcular las caídas de presión en el tubo y el anulo, este cálculo se muestra a continuación:

- Tubo:

$$Gp = \frac{F1}{ap} \quad (4-22)$$

Donde:

Gp: Velocidad de masa por tubo, $\left[\frac{Kg}{hm^2}\right]$

F1: Flujo de estiércol, 247,7 $\left[\frac{Kg}{h}\right]$

ap: Área de flujo por tubo, 0,0006 [m^2]

D: Diámetro interno del tubo. 0,027 [m]

Ue: Viscosidad del estiércol, $\left[\frac{\text{Kg}}{\text{hm}}\right]$

$$Rep = \frac{D \times Gp}{ue} \quad (4-23)$$

La viscosidad del estiércol se estima en 4,14 Kg/hm y el factor de fricción fp se determina mediante la ecuación (4-24).

$$fp = 0,0035 + \frac{0,242}{Rep^{0,42}} \quad (4-24)$$

Finalmente, la caída de presión en el tubo se calcula como se indica en la siguiente ecuación:

$$\Delta Pp = \frac{4 \times fp \times Gp^2 \times L}{2 \times g \times pe \times D} \quad (4-25)$$

Donde:

ΔPp : Caída de presión en el tubo, $\left[\frac{\text{Kgf}}{\text{m}^2}\right]$

L: Largo del tubo: 1,6 [m]

g: Aceleración de gravedad, $1,27 \times 10^8 \left[\frac{\text{m}}{\text{h}^2}\right]$

pe: Densidad del estiércol, $994 \left[\frac{\text{Kgf}}{\text{m}^3}\right]$

- Anulo.

Para el anulo se determina la velocidad de masa que circula por él, mediante la ecuación (4-26):

$$Ga = \frac{Fv}{aa} \quad (4-26)$$

Donde:

Ga: Velocidad de masa por el anulo $\left[\frac{\text{Kgf}}{\text{m}^2}\right]$

Fv: Flujo del vapor por el anulo, $17,5 \left[\frac{\text{Kg}}{\text{h}}\right]$

aa: Área de flujo por anulo, $0,0041 \text{ [m}^2\text{]}$

De: Diámetro equivalente del anulo, 0,044 [m]

ue: Viscosidad del vapor, $0,05 \left[\frac{\text{Kg}}{\text{hm}} \right]$

$$Re\ a = \frac{De \times Ga}{uv} \quad (4-27)$$

$$fa = 0,0035 + \frac{0,242}{Rea^{0,42}} \quad (4-28)$$

La caída de presión en el anulo, queda representada mediante la siguiente ecuación (4-29):

$$\Delta Pa = \frac{4 \times fa \times Ga^2 \times L}{2 \times g \times pv \times De} \quad (4-29)$$

Donde:

ΔPa : Caída de presión en el anulo $\left[\frac{\text{Kgf}}{\text{m}^2} \right]$.

L : Largo del tubo.

g : Aceleración de gravedad $1,27 \times 10^8 \left[\frac{\text{m}}{\text{h}^2} \right]$.

pv : Densidad del vapor, $0,69 \left[\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right]$.

Además, se considera la caída de presión en cada horquilla, este queda expresado por:

$$\Delta Ph = \frac{uv^2}{2 \times g} \times pv \quad (4-30)$$

ΔPh : Caída de presión en la horquilla $\left[\frac{\text{Kgf}}{\text{m}^2} \right]$.

w : Velocidad de circulación por el anulo, $1,6 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$.

Finalmente, la caída de presión total en el anulo es:

$$\Delta Pta = \Delta Pa + \Delta Ph \quad (4-31)$$

A continuación, en la Tabla 4-9, se aprecia los resultados obtenidos para el diseño del intercambiador de calor.

Tabla 4-9 Diseño de los intercambiadores de calor.

Parámetro	Unidad	Valores
Calor requerido	J/d	9.86×10^8
Temperatura influente	K	337.9
sobrecalentado		
Flujo de vapor	t/d	0.42
Media logarítmica de temperatura	K	52.6
Área	m^2	0.16
Largo	M	1.6
Velocidad de estiércol (tubo)	m/s	0.12
Velocidad del vapor (anulo)	m/s	1.72
Velocidad de masa por tubo	Kg/hm^2	4.1×10^5
Reynold pot tubo (Re p)	-	2692
Factor de fricción por tubo	-	0.0123
Caída de presión por tubo.	KPa	0.019
Velocidad de masa por anulo	Kg/hm^2	4.3×10^3
Reynolds por anulo (Re a)	-	3.7×10^3
Factor de fricción por anulo	-	0.011
Caída de presión por anulo	KPa	0.00076
Caída de presión horquilla	KPa	0.0008
Caída de presión total en el anulo	KPa	0.0027

4.3.5 Diseño de planta de biomasa

Tomando en cuenta otros proyectos de digestores anaeróbicos, se situará la planta de biogás a unos 10 metros del establo de animales, para alimentar el digestor se realiza a 50 cm bajo el nivel de líquido y la descarga del tanque de almacenamiento del sustrato se realiza a través de bombas, que extraen el estiércol a 50 cm del fondo del tanque.

- Determinación de la altura de alimentación del digestor

Para calcular la altura de alimentación del digestor, primero se debe determinar la altura del líquido dentro del digestor, a través del volumen necesario, este cálculo se realiza mediante la ecuación (4-32):

$$Vn = \pi \times r^2 \times hliq \quad (4-32)$$

Dónde:

Vn: Volumen necesario, 179 [m^3]

r: radio digestor, 4 [m]

hliq: altura de líquido dentro del digestor, [m]

El diseño de la planta de biomasa, queda resumida en la Tabla 4-10.

Tabla 4-10 Diseño de planta de biomasa.

Parámetro	Unidad Tanque de acopio	Metros
Altura	m	1,7
Diámetro	m	3
Altura de succión de la bomba	m	1
Distancia entre acoplo y digestor	m	5
Altura Digestor	m	4,2
Diámetro Digestor	m	8
Altura de descarga de la bomba del Digestor.	m	3,07
Altura de liquido de Digestor	m	3.57

4.3.6 Conducción del biogás

Una vez producido el biogás, este debe desplazarse entre el digestor al sistema de Cogeneración, para esto selecciona tuberías que tengan las características de la Tabla 4-11.

Tabla 4-11 Capacidad de las tuberías.

Parámetro	Unidad	
Caudal de biogás	m^3/s	$2,43 \times 10^{-3}$
Velocidad de circulación	m/s	10.2

4.3.7 Antorcha de biogás

En modo de emergencia se utiliza una antorcha de biogás, esta quemara el biogás que no pueda ser consumido por el sistema de cogeneración, eliminando de este modo las emisiones de metano. En la Tabla 4-12 se aprecia la cantidad máxima de biogás que puede eliminar la Antorcha de biogás.

Tabla 4-12 Capacidad de la antorcha de biogás.

Antorcha de biogás.	
Flujo de biogás [m^3/hora]	8.6

4.3.8 Determinación de potencia de una bomba

La alimentación de sustrato al digestor se realizará mediante una bomba, que alimenta dos veces al día el digestor, durante 10 minutos al día. El caudal de bombeo resulto de $8,5 \times 10^{-3} [m^3/d]$, se determinará través de la ecuación (5-33).

$$Q = \frac{V1}{600[\frac{d}{s}]} \quad (5-33)$$

Q: Caudal que debe transportar la bomba, $[\frac{m^3}{s}]$

V1: Volumen de estiércol generado diariamente, $5,97 [\frac{m^3}{d}]$

La Tabla 4-13 se describen las características de la bomba de alimentación a utilizar.

Tabla 4-13 Parámetros y potencia de la bomba de alimentación.

Parámetro	Unidad	Valor
Altura geométrica total (Hgeom)	m	2.57
Caída de presión debido al intercambiador de calor.	m	0.0019
Altura manométrica total (Ht)	m	9,6
Potencia de la bomba (Pb)	kW	1,17

4.3.9 Determinación de potencia de los agitadores

Los agitadores a utilizar son del tipo hélice con motor sumergido son los que se utilizaran para el mezclado en el digestor y en el tanque de almacenamiento, estos requieren de una potencia de 10 W por metro cubico, por consiguiente, la potencia necesaria se determina mediante la ecuación (4-34).

$$Pa = \frac{10\left[\frac{w}{m^3}\right] \times Vn [m^3]}{Na} \quad (4-34)$$

Pa: Potencia agitador $\left[\frac{w}{m^3}\right]$

Vn: Volumen digestor necesario $[m^3]$.

Na: Numero de agitadores.

Para su funcionamiento, se utilizan 1,5 horas por día. En la Tabla 4-14 se dan los resultados de la potencia de agitadores.

Tabla 4-14 Datos y potencia de agitadores.

Agitadores dentro de los digestores	
Numero de agitadores	1
Potencia agitador [kW]	1.8
Energia consumida [kWh/d]	2.7
Agitadores dentro del tanque de almacenamiento.	
Numero de agitadores	1
Potencia agitador [kW]	0.12
Energia consumida [kWh/d]	0.18

4.3.10 Calculando la potencia de soplantes

Los soplantes son utilizados para la eliminación de azufre dentro del reactor, es estima en un 5 % de la cantidad de biogás a purificar. La potencia necesaria del soplador se estima a partir de la ecuación (4-35).

$$Ps = \frac{Q \times \Delta P}{e} \quad (4-35)$$

Dónde:

Ps: Potencia consumida por el soplante, KW.

Q: Caudal de aire que impulsa el soplante, $\left[\frac{m^3}{s}\right]$

ΔP : Caída de presión, 102,3 kPa.

e: Eficiencia energética del soplante, 0,7

En la Tabla 4-15 se aprecia el diseño del soplador.

Tabla 4-15 Diseño de los sopladores para la eliminación de azufre.

Parámetro	Unidad	Bovinos
Caudal de aire	m^3/s	1.215×10^{-4}
Potencia del soplador	W	17,76

4.3.11 Sistema de generación de energía eléctrica

El sistema de cogeneración que se selecciono es un sistema CHP por motor Otto a gas. Este contiene los motores de cogeneración, intercambiadores recuperadores de calor, el sistema eléctrico y control [10]

En la Tabla 4-16 se resume los balances energéticos con respecto a la energía eléctrica requerida y generada para el proceso, también se observa el calor requerido y generado.

Tabla 4-16 Balance energético.

Numero de bovinos	
Requerimiento energía eléctrica [kWh/d]	
Agitador tanque de acopio	0.18
Agitador digestor	2.7
Bomba alimentación digestor	0,19
Soplador para la remoción biológica del azufre.	0,43
Total	3,5
Requerimiento energía térmica [kWh/d]	
Intercambiador de calor	274,2
Energía generada por cogeneración	
Electricidad [kWh/d]	346,32
Calor [kWh/d]	804
Excedentes energético [kWh/d]	
Excedentes eléctricos	342,82
Excedentes de calor	529

4.3.12 Balance de masa y energía

Para llevar a cabo el proceso de digestión anaerobia, en primer lugar se retira el estiércol con un chorro de agua, conduciéndolo al tanque de almacenamiento, luego a través de una bomba, el estiércol es llevado al digestor. En una etapa posterior, en el digestor mediante el proceso de digestión anaerobia se produce biogás, este se encuentra saturado en vapor de agua. La presión de vapor del agua a la temperatura de operación es de $5,61 * 10^{-2}$ atm, y el peso molecular del agua es de 18 g/mol. A estas condiciones se obtiene la máxima cantidad de agua que puede arrastrar el biogás a la salida del digestor, cuyo valor es $3,9 * 10^{-5}$ tagua/ m^3 biogás.

Mediante la ley de los gases ideales se puede calcular la densidad del biogás, esta es igual a $1,07 * 10^{-3} \text{ t/m}^3$, este valor se calculó aproximando que el biogás se compone en un 60% de metano y 40% de dióxido de carbono

Para la eliminación biológica del hidruro de azufre, se adiciona un 5 % de aire con respecto a la cantidad de biogás producido.

La energía contenida en el biogás que puede convertir en energía eléctrica depende de la potencia con que esté dotado el motor. El porcentaje de conversión varía entre un 26 a un 42 % [10].

Para realizar los cálculos del balance energético de la planta, se utiliza la siguiente simbología:

F1: Flujo de estiércol alimentado al tanque de recepción $[\frac{t}{d}]$

F2: Flujo de estiércol alimentado al digestor $[\frac{t}{d}]$

F3: Flujo de salida del estiércol digerido $[\frac{t}{d}]$

F4: Flujo de aire alimentado al digestor $[\frac{m^3}{d}]$

F5: Flujo de biogás a la salida/ del digestor y post-digestor $[\frac{t}{d}]$

F6: Flujo de agua a la salida del purgador de condensado $[\frac{tagua}{d}]$

F7: Flujo de salida de biogás del purgador de condensado y alimentado al compresor/sistema CHP $[\frac{t}{d}]$

V7: Flujo volumétrico de biogás alimentado al compresor/sistema CHP $[\frac{m^3}{h}]$

F8: Calor generado en el sistema CHP (kW)

F9: Potencia generada en el sistema CHP (kW)

pea: producción específica de agua en biogás, a 35 grados Celsius es de $3,6 * 10^{-2} [\frac{tm^3 agua}{t*biogas}]$

PE: producción de estiércol diario por bovino 50,8 $[\frac{Kg}{d*bovino}]$

NB: 117 bovinos

sat: porcentaje de saturación de agua en biogás, 50 %

VEPB: velocidad específica de producción de biogás, 327 $[\frac{m^3}{tSV}]$

PSV: Porcentaje de sólidos volátiles, 10,63 %

PMB: porcentaje de metano en el biogás, 60 %

p: densidad $[\frac{Kg}{L}]$

pe: densidad del estiércol, 0,994 $[\frac{Kg}{L}]$

pb1: densidad del biogás, a 35 grados Celsius y a 1 atm es de $1,07 * 10^{-3} [\frac{t}{m^3}]$

PCM: Poder calorífico metano, 10 $[\frac{KWh*L}{m^3 metan}]$

nel: eficiencia de conversión a energía eléctrica, %

nth: eficiencia de recuperación de calor, %

P: presión (atm)

R: constante de gases ideales, $0,08t \left[\frac{t \cdot atm \cdot L}{mol \cdot K} \right]$

T: temperatura absoluta (°K)

PM: peso molecular $\left[\frac{g}{gmol} \right]$

Finalmente se utiliza las siguientes ecuaciones para realizar los cálculos del balance de masa y energía. En la Tabla 4-17 se adjuntan los correspondientes resultados.

$$F1 = PE * NB \quad (B-1)$$

$$F1 = F2 \quad (B-2)$$

$$V7 = VEPB * PSV * F2 \quad (B-3)$$

$$F7 = V7 * pb1 \quad (B-4)$$

$$F5 = F7 / (1 - pea * sat) \quad (B-5)$$

$$V4 = 0,05 * V5 \quad (B-6)$$

$$F6 = F5 - F7 \quad (B-7)$$

$$F3 = F2 - F6 - F7 \quad (B-8)$$

$$F8 = V7 * PMB * PCM * nth \quad (B-9)$$

$$F9 = V7 * PMB * PCM * nel \quad (B-10)$$

Tabla 4-17 Resultados de balance de masa y energía.

Parámetro	Valor
F1	5.943 [Kg/d]
F2	5.943 [Kg/d]
V7	206, 47 [m^3 /d].
F7	0,2209 [t/d].
F5	0,225 [t/d].
V4	10.5 [m^3 /d].
F6	0,00405[t/d].
F3	5,718[t/d].
F8	33,5 [kW]
F9	14.43 [kW].

4.3.13 Consumo energético del establo de los bovinos

Es muy importante conocer el consumo energético del establo, ya que, con este dato se conocerá los excedentes energéticos utilizados por los habitantes de la isla. Los equipos de ordeña, cuya potencia es de 1,5 kW y funcionan 20 horas al día, consumen cerca del 50 % del excedente de la energía eléctrica generada. En las lecherías existen un alto gasto en energía eléctrica por la pasteurización de la leche, por lo tanto, se asume que al menos el 90 % de los excedentes de la energía eléctrica generada se destinara para el consumo propio, es decir, se vende solo el 10 % de los excedentes eléctricos.

En conclusión, el proyecto de generación de energía eléctrica a partir de biogás obtenida de la digestión anaerobia del estiércol de bovino no es rentable.

4.4 Estudio de sistema híbrido eólico-diésel

La segunda alternativa consiste en realizar un estudio de viabilidad técnica y económica de generación en la isla Quenu utilizando energía eólica-diésel, por lo tanto, se debe considerar diversos factores, como las condiciones de viento y terreno que se dispone.

4.4.1 Selección del lugar

El lugar idealmente debe ser lo más despejado posible, ya que el sistema eólico debe tener la menor cantidad de obstáculos.

El lugar actual del sistema eólico es la Parcela del sr. Alfredo Agüero. Este lugar fue seleccionado ya que cumple con todas las condiciones, es el más alto de la isla respecto al nivel del mar, el sistema de generación no provoca un impacto visual negativo. La parcela se encuentra completamente despejada de obstáculos naturales y artificiales, no existen árboles en el lugar y no hay casas cercanas, además de estar bastante alejado de las viviendas, y no provocaría molestias de ruidos a los habitantes de la isla. En este sector los animales de pastoreo de la isla no se ven afectados y el sistema eólico no interfiere con ellos [17].

4.4.2 Análisis de los datos de los vientos

La información sobre el recurso eólico está basada en el uso de modelación numérica [18]. La modelación desarrollada proporciona datos simulados con un modelo atmosférico de mesoescala, de manera independiente de estaciones meteorológicas locales.

El modelo empleado es el WRF (Weather Research and Forecasting) versión 3.2, que ha sido desarrollado por NCAR (National Center for Atmospheric Research) en Estados Unidos y es ampliamente utilizado en el área de evaluación del recurso eólico a nivel mundial. El modelo fue aplicado con una resolución espacial de 1 kilómetro y tiene 12 niveles verticales entre 0 y 200 metros de altura. Se disponen datos para el año 2010 por completo.

4.4.3 Características del sitio

Las características que posee el sitio seleccionado se observan en la Tabla 4-18. Se aprecia que la densidad del aire se refiere a la densidad media simulada por el modelo WRF. La elevación en la representación del terreno utilizado por el modelo tiene una resolución espacial de 1 kilómetro y por lo tanto esta suavizada comparada con la topografía real.

Tabla 4-18 Características principales del sitio seleccionado.

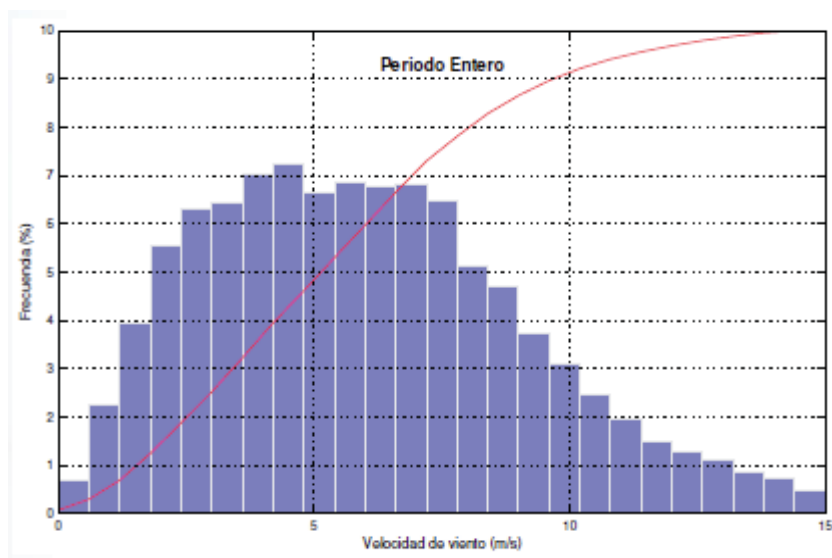
Parametro	Valores
Latitud	41.88 S
Longitud	72.92 O
Elevación del terreno (modelo WRF)	74 metros
Densidad del aire	1.24 Kg/ m ³

En la Tabla 4-19, se muestran las velocidades de los vientos a una altura de 40 metros. Muestra la estadística básica para velocidad de viento. El promedio diario es el promedio de todos los valores horarios simulados durante el periodo indicado. La variabilidad es la desviación estándar del valor medio diario.

Tabla 4-19 Velocidad del viento a 25 metros.

Mes	Medio diario (m/s)	Variabilidad.
Enero	5.7	2.1
Marzo	5.9	3.1
Abril	6.1	2.1
Mayo	6.7	2.7
Junio	8.8	2.9
Julio	8.7	3.6
Agosto	8.6	4
Septiembre	5.8	2.7
Octubre	6.6	2.8
Noviembre	6.1	2.4
Diciembre	6.2	2.4
Todos	7	3

La distribución de frecuencia del año completo de la velocidad de viento a 25 metros se observa en la Fig. 4-2. Las barras representan el porcentaje de valores dentro de cada intervalo. La línea que cruza las barras es la distribución de la frecuencia acumulada.

**Fig. 4-2 Distribución de frecuencia isla Quenu**

4.4.4 Características del Aerogenerador Bergey Excel-R

El aerogenerador tipo Bergey Excel-R según la curva de velocidad vs potencia indicada. El cálculo incluye una estimación del efecto en la generación debido a la densidad del aire del sitio seleccionado. En la Tabla 4-20 se describe las características del aerogenerador.

Tabla 4-20 Características del aerogenerador Berkey Excel-R.

Aerogenerador	Berkey Excel-R
Fabricante	Berkey Windpower Co
Potencia	10 KW
Diámetro de turbinak	6.70 metros
Densidad de referencia	1.225 Kg/m ³

La información del aerogenerador Berkey Excel-R, fue obtenida del archivo .XML que es parte de la distribución del software de visualización de viento WindographerTM.

La Fig. 4-3, se presenta la curva de potencia del aerogenerador Berkey Excel-R, donde la curva en rojo corresponde a la potencia calculada con la densidad del aire de referencia, y la curva en azul corresponde a la curva calculada a partir de la densidad del aire del sitio. Se observa la potencia del aerogenerador tipo Berkey Excel-R, a los 40 metros de altura en la Tabla 4-21.

El promedio diario es el promedio de todos los valores horarios simulados durante el periodo indicado. La variabilidad es la desviación estándar del valor medio.

Como se calculó anteriormente la demanda de la isla es 49.128 kWh/añual, y al utilizar dos aerogeneradores Berkey Excel-R este arroja una producción de energía anual

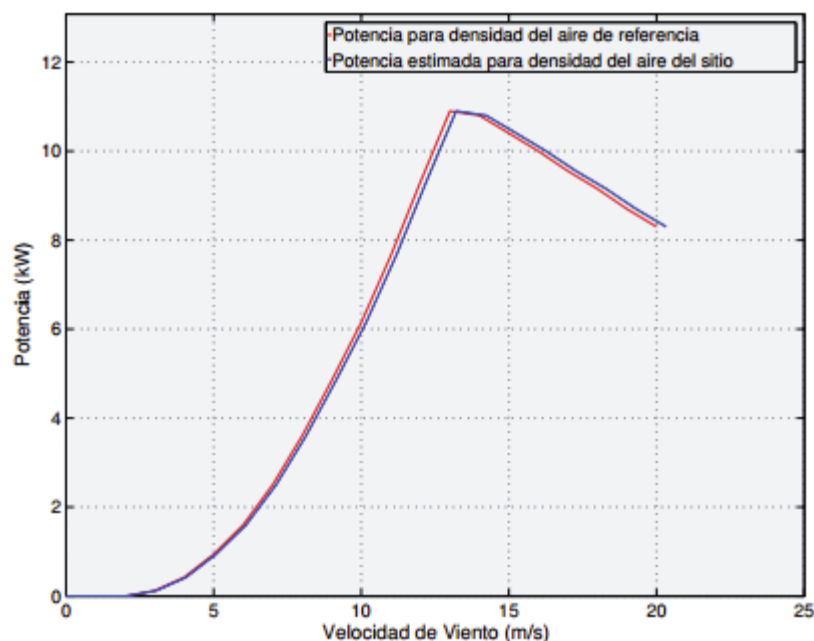
**Fig. 4-3 Curva de potencia Berkey Excel- R.**

Tabla 4-21 Potencia a 25 metros.

Mes	Medio diario (kW)	Variabilidad (kW)
Enero	2.2	1.8
Febrero	4.1	2.6
Marzo	2.4	2.8
Abril	2.4	1.9
Mayo	2.7	2.1
Junio	5.0	2.7
Julio	4.6	3
Agosto	4.6	2.9
Septiembre	2.1	2.4
Octubre	2.5	2.5
Noviembre	2.5	2
Diciembre	2.6	2.1
Todos	3.3	2.6

de 57.024 kWh/añual. A esto se debe sumar las pérdidas por conversión de energía, utilizando como eficiencia del transformador 95%, eficiencia de las baterías 85% y eficiencia del inversor 90%. De esta manera la energía útil que ingresa a la red por la componente eólica se estima en 41.442 KWh/año que corresponde al 84 % de penetración de energía eólica para el año 0, año en que se proyecta 65 KWh/mes por familia.

4.5 Estimación de energía no servida con fuente renovable

Para obtener el porcentaje de energía no servida por componente renovable, se utilizan los cálculos de estimación de recurso eólico. De acuerdo a esto y sumado al aumento de demanda anual, el porcentaje de penetración de componente renovable disminuye a cerca del 50% en el año 15 aumentando considerablemente la energía no servida por fuente renovable que debe ser abastecida por diesel, provoca el aumento de consumo de combustible como se aprecia en la Tabla 4-22 y en la Tabla 4-23.

Para determinar el consumo de combustible, se asumen que los generadores a utilizar son Diperk de 50 KVA.

Tabla 4-22 Consumo de combustible grupos electrógenos Diperk.

Consumo de combustible según nivel de carga			
Potencia	100 % de carga	75 % de carga	50 % de carga
Generadores Diperk			
50KVA (lts/hr)	11.8	8.9	6.4
Rendimiento (kWh/lts)	3.39	3.37	3.13

4.6 Funcionamiento de la Planta

Existen dos alternativas de operación para una planta eólica: operación aislada u operación en paralelo con la red eléctrica. Dentro de cada una de estas alternativas, existen varias opciones o combinaciones posibles, sin embargo, para la isla Quenu se utiliza un sistema híbrido aislado.

4.6.1 Sistema híbrido aislado

El sistema híbrido aislado se refiere a pequeñas turbinas eólicas brindan una solución atractiva para la electrificación rural en muchos lugares, por su operación económica y simple. Sin embargo, la fluctuación del viento no permite obtener una producción de electricidad constante. Por esta razón, frecuentemente, se usa una turbina eólica en combinación con otra fuente de generación; por ejemplo, paneles fotovoltaicos o un generador eléctrico a base de diésel. Este tipo de sistema se llama un “sistema híbrido”. La mayor ventaja de un sistema híbrido es que provee mayor confiabilidad para la generación eléctrica comparado con uno individual [19].

Tabla 4-23 Estimación de energía producida por sistema híbrido.

Año	Consumo de Energía anual más pérdidas [kWh/Año]	Generación eólica.	Porcentaje de penetración eólica	Energía por abastecimiento diesel.	Consumo de diesel (litros/año)
0	49.128	41442	84%	7686	2456
1	53.401	41442	78 %	11959	3821
2	58.739	41442	71 %	17297	5526
3	61.661	41442	67 %	20219	6460
4	65.758	41442	63 %	24316	7719
5	68.006	41442	61 %	26564	8487
6	68.062	41442	61 %	26629	8508
7	73.057	41442	57 %	31615	10101
8	75.156	41442	55 %	33714	10771
9	75.973	41442	55 %	34531	11032
10	78.114	41442	53 %	36672	11716
11	78.946	41442	53 %	37504	11882
12	81.131	41442	51 %	39689	12680
13	81.192	41442	51 %	39750	12700
14	83407	41442	50 %	41965	13407
15	83.469	41442	50 %	42027	13427
16	84.900	41442	49 %	43458	13884
17	84.964	41442	49 %	43522	13905
18	87.224	41442	48 %	45782	14627
19	88.671	41442	47 %	47229	15089
20	88.739	41442	47 %	47297	15111

CAPÍTULO 5

CASO DE ESTUDIO ISLA ROBINSON CRUSOE

Para poder realizar un proyecto eólico se dará a conocer algunas características como la situación geográfica, topográfica y climática de la isla Juan Fernández, para encaminar el proyecto a soluciones viables y en caso de ser factible la realización de un proyecto de generación de energía eléctrica.

5.1.1 Situación geográfica

Las islas Robinsón Crusoe y Santa Clara (33°37`S y 78°53`W) se encuentran ubicadas en el Océano Pacífico a 667 kilómetros de la costa de Chile frente a la provincia de San Antonio. La capital comunal es la isla Robinsón Crusoe y su localidad poblada es San Juan Bautista ver Fig. 5-1. Este único poblado se encuentra ubicado en la bahía Cumberland, sector que presenta las condiciones básicas para el asentamiento humano permanente. La comuna de Juan Fernández tiene una superficie total de 9.968 hás., donde 9.571 hás., (96%) corresponde a reserva natural. De las 397 hás. restantes, alrededor de 220 hás, corresponden al sector urbano [20].

La central eólica, se realizará en la Isla Robinson Crusoe, tiene una población de 700 habitantes, La isla Robinson Crusoe, como parte del archipiélago Juan Fernández, es Parque Nacional de Chile desde 1935 y desde el año 1977 es también Reserva de la biosfera por declaración de la UNESCO. En la isla existe una gran cantidad de especies endémicas, lo que suscita un gran interés científico a nivel mundial; muchas de estas especies están bajo amenaza de extinción. Algunas de estas especies son el picaflor rojo de Juan Fernández, el lobo marino de Juan Fernández [21].

5.1.2 Información demográfica

De acuerdo al censo del año 2002, el número de habitantes del poblado de San Juan Bautista alcanzaba los 633, de los cuales 598 corresponden a población urbana y 35 de población rural. Además, 377 personas eran hombres y 256 mujeres. Según las entrevistas realizadas por el equipo del Centro de Energía, durante los últimos años ha habido un aumento considerable de la población, alcanzando las 700 personas. Este crecimiento, es atribuido al aumento en la construcción de obras civiles post-tsunami, situación que implicó contar con mano de obra del continente, la cual ha decidido quedarse viviendo en la Isla [21].

5.1.3 Situación social

Su población varía según la época del año: en febrero o marzo hay jóvenes que emigran al continente para continuar estudios superiores En mayo comienza la veda de la langosta



Fig. 5-1 Archipiélago Juan Fernández

y alrededor de cincuenta pescadores, se trasladan de vuelta desde la isla Alejandro Selkirk y de otras partes del Archipiélago, donde pasaron unos ocho meses trabajando en la pesca. En el mes de octubre los pescadores y familiares se van nuevamente a la isla Alejandro Selkirk. En diciembre muchos isleños y turistas visitan la isla durante el período de vacaciones.

La comuna Juan Fernández cuenta con un Municipio, además la isla posee una Capitanía de Puerto con representantes de Armada de Chile, quienes velan por el tráfico marítimo en la bahía Cumberland y en toda la isla. También se dispone con la presencia de Carabineros de Chile.

Actualmente al poseer un sistema diésel para el suministro eléctrico, para la población residente se le hace muy difícil generar recursos para pagar por dicho servicio y esto es debido básicamente a que solamente la principal fuente económica de la isla sea la langosta de Juan Fernández, por lo tanto, un sistema eólico-diésel ayudaría a:

- Disminuir los costos de generación del sistema eléctrico
- Mejorar la calidad del suministro energético
- Disminuir la dependencia energética del continente
- Disminuir la contaminación del medio ambiente

5.1.4 Situación climática

Su clima es marítimo lluvioso, con una elevada humedad ambiental, siendo de 15,3 °C el promedio anual de temperatura.

La precipitación media anual llega a los 1.041,5 mm, y los meses menos lluviosos se encuentran entre octubre y febrero.

5.2 Estimación de la demanda

En el poblado de San Juan bautista (isla Robinson Crusoe, Región de Valparaíso), se abastece de energía eléctrica por medio de 3 grupos electrógenos diésel de 350 KVA cada uno. Altos costos de operación y la posibilidad de tener riesgos ambientales asociados al suministro de diésel, han llevado a la formulación de buscar nuevas alternativas con energías renovables no convencionales. En la Tabla 5-1, se describe un cuadro resumen del sistema actual de la isla.

Tabla 5-1 Cuadro resumen del sistema actual de diésel.

Cuadro Resumen	Valor	Unidad
Consumo actual de petróleo aproximado.	280.000	[Litros/año]
Total de Producción de Energía Planta Actual.	841.100	[kWh/año]

La energía eléctrica se distribuye en baja tensión debido a la corta distancia existente entre los distintos centros de consumo. Las características son: 380 V, 50 Hz, tres fases. La red tiene una longitud aproximada de 6 Km, y es llevada por postes de eucalipto impregnado de 9 m de altura separados 60 m entre sí.

El servicio eléctrico atiende a la localidad de la población y las diversas actividades que se desarrollan al interior de la isla. Entre los centros de consumo más importantes se pueden mencionar, de mayor a menor, los siguientes:

- **Municipalidad:** El mayor consumo está representado por el alumbrado público. En segundo término, el bombeo de agua para el consumo de la población.
- **Educación:** Para Para enseñanza preescolar existe el Jardín Infantil "Sandalito", dependiente de JUNJI. Para enseñanza básica y enseñanza media existe el Colegio Insular Robinson Crusoe, quien atiende a niños desde kínder hasta el 4° año de Enseñanza Media, el cual depende de la I. Municipalidad de Juan Fernández y el Ministerio de Educación de Chile.
- **Compañía de teléfonos:** Cuenta con tendido telefónico para una parte de la población y equipos adecuados para la distribución.
- **Televisión nacional:** Algunas señales de televisión abierta de Chile, han instalado antenas satelitales en la isla, lo que permite acceder a TV abierta. Además, una empresa privada ofrece servicios de televisión satelital.
- **Salud:** Existe una "posta de salud", es decir, un centro de atención primario de salud. La posta de salud de Juan Fernández depende del Ministerio de Salud de Chile.
- **Iluminación habitacional y televisión:** En San Juan Bautista existen 223 viviendas en las que se cobija la población, la totalidad de ella cuenta con servicio eléctrico.

La Tabla 5-2 se muestra un cuadro resumen del consumo de combustible, y la producción de energía eléctrica.

Tabla 5-2 Consumo de combustible y generación de energía eléctrica.

Año	Consumo Combustible litros/año	Energía Generada kWh/año	Rendimiento anual (1/ kWh)
2005	257.600	773.812	0,33
2006	261.721	786.192	0,31
2007	266.283	799.897	0,31
2008	271.128	814.450	0,32
2009	280.000	841.100	0,31

En términos generales, el consumo de energía en la isla tuvo un crecimiento de aproximadamente 2 % en el periodo de 2005-2009 originado por el natural (aunque lenta) desarrollo de esta.

Sin perjuicio, del crecimiento mencionado anteriormente, al menos en el corto y mediano plazo, no se esperan modificaciones importantes en el consumo de energía.

5.3 Costo del combustible diésel

El combustible utilizado por la planta generadora es adquirido por la municipalidad en el continente, a través de la empresa COPEC. Es transportado desde el puerto de Valparaíso a la isla, en estanques destinados para tal efecto, de la motonave ANTONIO una vez por mes. Una vez en la isla, el diésel es descargado directamente a un camión aljibe, de propiedad municipal que lo transporta desde el muelle hasta los estanques de almacenamiento en la planta generadora. Este procedimiento evita derrames de combustible en el mar o en la ruta entre el embarcadero y la planta, y se estima que el precio del combustible diésel en la isla Juan Fernández es tres veces más que en Valparaíso [21].

5.4 Selección del lugar del aprovechamiento eólico

Se ha tomado como referencia la selección del lugar, por un estudio que realizó el Ministerio de Energía el 18 de Octubre del 2005 debido que es una fuente confiable. En este documento, se selecciona como lugar idóneo para la instalación de la planta eólica el Cerro Centinela, se debe a varios factores, entre ellos, velocidad promedio del viento anual (6,5 m/s a 30 metros de altura), espacio físico libre para emplazar el proyecto, facilidad de acceso, distancia al poblado. Además, un factor relevante en la definición del lugar fue el evitar afectar recursos bióticos de la zona protegida del Parque [22].

5.5 Análisis de los datos de los vientos

La información sobre el recurso eólico está basada en el uso de modelación numérica. La modelación desarrollada proporciona datos simulados con un modelo atmosférico de meso escala, de manera independiente de estaciones meteorológicas locales.

El modelo empleado es el WRF (Weather Research and Forecasting) versión 3.2, que ha sido desarrollado por NCAR (National Center for Atmospheric Research) en Estados Unidos y es ampliamente utilizado en el área de evaluación del recurso eólico a nivel mundial. El modelo fue aplicado con una resolución espacial de 1 kilómetro y tiene 12 niveles verticales entre 0 y 200 metros de altura. Se disponen datos para el año 2010 por completo.

5.5.1 Características del sitio

Las características que posee el sitio seleccionado, se describen en la Tabla 5-3.

Tabla 5-3 Características principales del sitio seleccionado.

Variable	Valor
Latitud	33.38 S
Longitud	78.49 O
Elevación del terreno (modelo WRF)	74 metros
Densidad del aire	1.24 Kg/ m^3

Se aprecia que la densidad del aire refiere a la densidad media simulada por el modelo WRF. La elevación en la Representación del terreno utilizado por el modelo tiene una resolución espacial de 1 kilómetro y por lo tanto esta suavizada comparada con la topografía real.

La Tabla 5-4 muestra la estadística básica para velocidad de viento. El promedio diario es el promedio de todos los valores horarios simulados durante el periodo indicado.

El mínimo diario corresponde al promedio del valor mínimo en cada dato simulado. De manera similar, el máximo diario es el promedio del valor máximo en cada dato simulado. La variabilidad es la desviación estándar del valor medio diario.

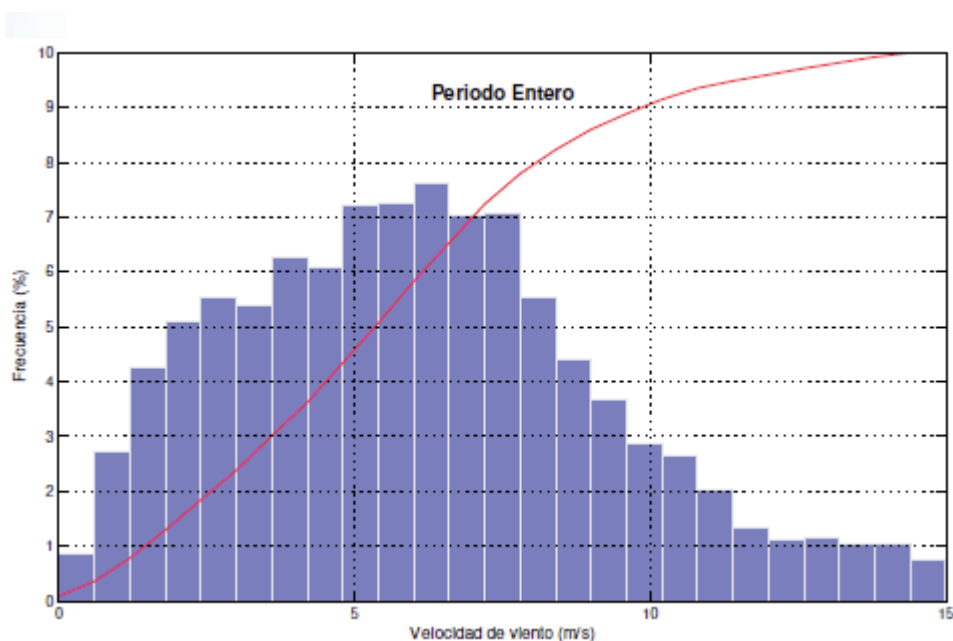
La distribución de frecuencia del año completo de la velocidad de viento a 25 metros, se observa en la Fig. 5-2. Las barras representan el porcentaje de valores dentro de cada intervalo. La línea que cruza las barras es la distribución de la frecuencia acumulada [23].

5.6 Características de 2 aerogeneradores seleccionados

Los datos horarios de velocidad de viento obtenidos del modelo numérico han sido convertidos a la potencia generada por dos aerogeneradores, los que a continuación se verán sus características para luego seleccionar cual es la mejor alternativa.

Tabla 5-4 Velocidad del viento a 35 metros.

Mes	Medio diario m/s	Mínimo diario m/s	Máximo diario m/s	Variabilidad m/s
Enero	5.3	2.5	8.4	2.1
Febrero	7.7	4.3	11.4	2.6
Marzo	5.6	2.4	8.9	2.6
Abril	5.4	2.1	8.5	1.9
Mayo	5.9	2.1	10.0	2.4
Junio	8.4	4.4	12.2	3.1
Julio	8.2	3.9	13.2	3.5
Agosto	8.1	4.1	13.0	3.8
Septiembre	5.3	2.0	8.9	2.6
Octubre	6.3	2.6	9.8	2.5
Noviembre	5.7	2.2	8.9	1.9
Diciembre	5.8	3.0	9.1	2.0
Todos	6.5	3.0	10.2	2.9

**Fig. 5-2 Distribución de frecuencia isla Robinson Crusoe.**

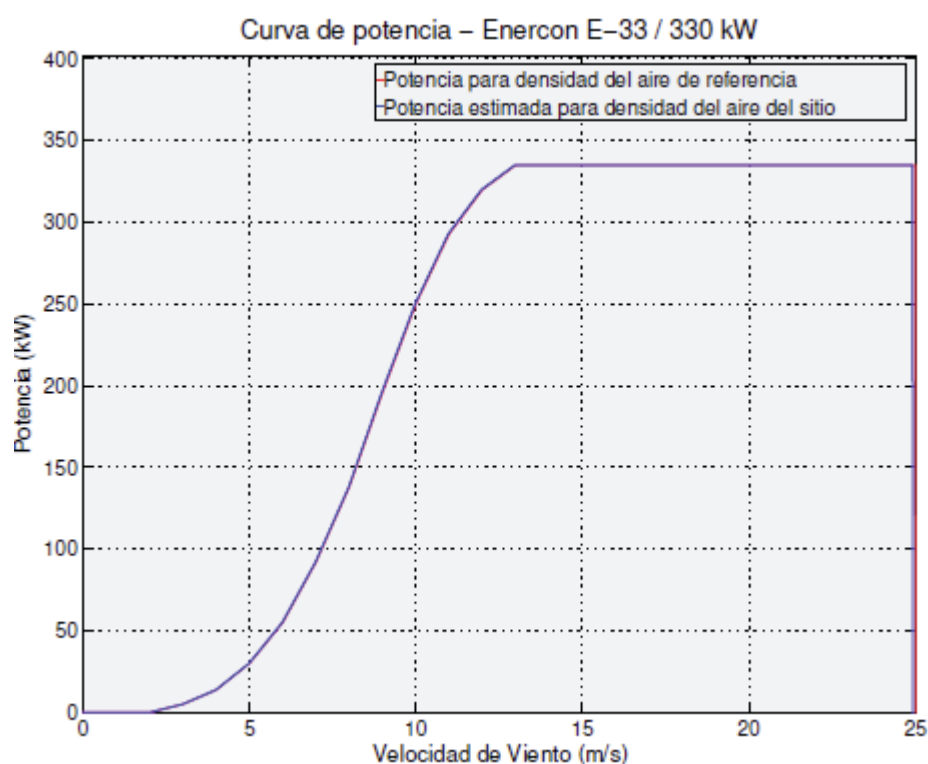
5.6.1 Aerogenerador Enercon E-33/330 kW

El aerogenerador tipo Enercon E-33 / 330 kW según la curva de velocidad vs potencia indicada. El cálculo influye una estimación del efecto en la generación debido a la densidad del aire del sitio seleccionado. La Tabla 5-5 describe el aerogenerador Enercon.

Tabla 5-5 Características del aerogenerador Enercon.

Aerogenerador	Enercon E-33 / 330 kW
Fabricante	Enercon
Potencia	330 KW
Diámetro de turbina	33.40 metros
Densidad de referencia	1.225 Kg/m ³

La información del aerogenerador tipo Enercon E-33/330 kW, fue obtenida del archivo .XML que es parte de la distribución del software de visualización de viento Windographer TM.

**Fig. 5-3 Curva de potencia Enercon E-33/330 KW**

En la Fig. 5-3, se presenta la curva de potencia del aerogenerador Enercon E-33 / 330 kW, donde la curva corresponde a la potencia calculada con la densidad del aire de referencia, y la curva en azul corresponde a la curva calculada a partir de la densidad del aire del sitio.

Se observa la potencia del aerogenerador tipo Enercon E-33/330 kW, a los 40 metros de altura en la Tabla 5-6.

En la Tabla 5-6 se muestra la estadística básica para potencia. El promedio diario es el promedio de todos los valores horarios simulados durante el periodo indicado. El mínimo diario corresponde al promedio del valor mínimo en cada día simulado. De manera similar,

el máximo diario es el promedio del valor máximo en cada día simulado. La variabilidad es la desviación estándar del valor medio diario.

Tabla 5-6 Potencia a 35 metros.

Mes	Medio diario (kW)	Mínimo diario (kW)	Máximo diario (kW)	Variabilidad (kW)
Enero	67.2	11.8	155	59.9
Febrero	133.7	38.1	240.6	88.1
Marzo	79.9	18.6	178.1	77.5
Abril	69.5	7.6	173.8	60.4
Mayo	82.4	8.5	211.1	69.0
Junio	156.7	50.4	264.9	97.4
Julio	150.3	38.8	268.6	97.1
Agosto	145.4	52.1	251.7	107.1
Septiembre	72.2	10.5	168.8	77.5
Octubre	97.8	17.5	205.5	80.6
Noviembre	76.9	8.2	174.1	60.9
Diciembre	81.8	16.6	191.5	68.9
Todos	101.1	23.1	206.8	85.6

5.6.2 Aerogenerador tipo Vergnet MP C/R

El aerogenerador tipo Vergnet MP C/R según la curva de velocidad vs potencia indicada. El cálculo incluye una estimación del efecto en la generación debido a la densidad del aire del sitio seleccionado. En la Tabla 5-7 se describe el aerogenerador Vergnet.

Tabla 5-7 Características del aerogenerador Vergnet.

Aerogenerador	Vergnet MP C/R
Fabricante	Vergnet
Potencia	275 KW
Diámetro de turbina	32.0 metros
Densidad de referencia	1.225 Kg/m ³

La información del aerogenerador Vergnet MP C/R fue obtenida del archivo .XML que es parte de la distribución del software de visualización de viento Windographer TM.

En la Fig. 5-4 se presenta la curva de potencia del aerogenerador Vergnet MP C/R, donde la curva en rojo corresponde a la potencia calculada con la densidad del aire de referencia, y la curva en azul corresponde a la curva calculada a partir de la densidad del aire del sitio.

Se observa la potencia del aerogenerador tipo Vergnet G-3120, a los 35 metros de altura.

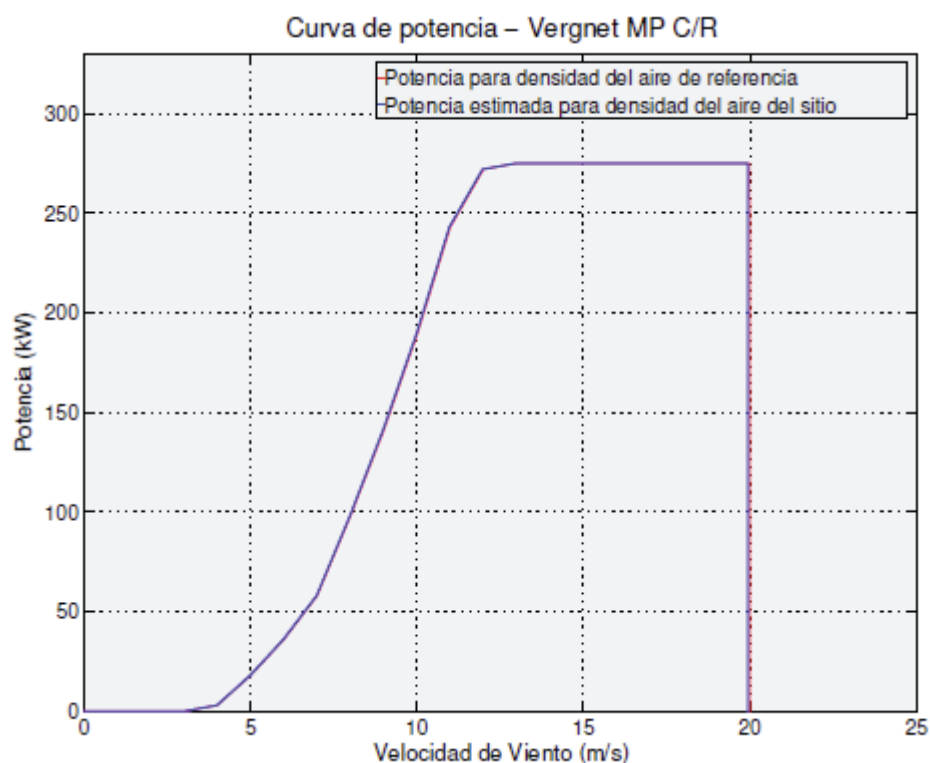


Fig. 5-4 Curva de potencia Vergnet MP C/R

Tabla 5-8 Potencia a 35 metros.

Mes	Medio diario (kW)	Mínimo diario (kW)	Máximo diario (kW)	Variabilidad (kW)
Enero	46.3	6.4	115.9	46.6
Febrero	99.6	16.4	190.3	72.9
Marzo	57.5	12.0	137.1	62.3
Abril	48.6	4.3	132.7	47.0
Mayo	59.6	4.4	163.1	56.3
Junio	120.6	36.0	212.4	82.9
Julio	112.6	25.5	215.8	78.8
Agosto	105.2	15.2	200.7	79.8
Septiembre	52.4	6.1	127.5	62.2
Octubre	71.7	11.1	158.9	65.7
Noviembre	54.9	4.0	132.8	49.5
Diciembre	57.9	9.7	148.0	54.2
Todos	73.8	12.6	161.1	10.0

La Tabla 5-8 se muestra la estadística básica para potencia. El promedio diario es el promedio de todos los valores horarios simulados durante el periodo indicado. El mínimo diario corresponde al promedio del valor mínimo en cada día simulado. De manera similar,

el máximo diario es el promedio del valor máximo en cada día simulado. La variabilidad es la desviación estándar del valor medio diario.

5.6.3 Selección de aerogenerador más adecuado

Como la demanda de la Isla es 841.100 KWh/año, se calcula una potencia media diaria de 97 KW, el Aerogenerador tipo Enercon E-33 / 330 KW arroja una producción de energía anual de 884.760 KWh/año, a esta producción se le suma las pérdidas por conversión de energía, utilizando como eficiencia del transformador 95%, eficiencia de las baterías 85% y eficiencia del inversor 90%. De esta manera la energía útil que ingresa a la red por este aerogenerador es 643.000 KWh/año que corresponde al 76 % de penetración de energía eólica para el año 0.

El Aerogenerador tipo Vergnet MP C/R cuya potencia es de 275 kW, arroja una producción de energía de 646.488 KWh/año, a esta producción se le suma las pérdidas de conversión de energía utilizando como eficiencia del transformador 95%, eficiencia de las baterías 85 % y eficiencia del inversor 90 %. De esta manera la energía útil que ingresa a la red por este aerogenerador es 470.000 KWh/año que corresponde al 56 % de penetración de energía eólica para el año 0.

En conclusión, comparando ambos aerogeneradores, el Aerogenerador tipo Enercon E-33 / 330 KW es el más conveniente.

5.7 Estimación de energía no servida con fuente eólica

Para obtener el porcentaje de energía no servida por componente eólica, se utilizan los cálculos de estimación de recurso eólico. De acuerdo a esto, y sumado al aumento de demanda anual, el porcentaje de penetración de componente renovable disminuye a cerca del 51% en el año 20, aumentando considerablemente la energía no servida por fuente no renovable que debe ser abastecida por diesel, como se muestra en la Tabla 5-9.

5.8 Funcionamiento de la Planta

La operación en paralelo con la red eléctrica entrega la posibilidad de suministrar energía a la red con pequeños sistemas eólicos. Esto es aplicable en los casos en que exista una red en las proximidades del centro de consumo.

En un sistema conectado a la red, el aerogenerador puede destinarse en forma exclusiva a entregar energía al sistema. Además, la ventaja de conectar un aerogenerador en paralelo con la red, está en que se prescinde del problema del balanceo y compensación de la potencia variable entregada por estos equipos, ya que cualquier déficit es compensado en forma automática por la energía proveniente de la red.

Tabla 5-9 Estimación de energía producida por sistema híbrido.

Año	Consumo de Energía anual más pérdidas [kWh/Año]	Generación eólica.	Porcentaje de penetración eólica	Energía por abastecimiento diesel.	Consumo de diesel (litros/año)
0	841.100	643.000	76 %	198.100	65.947
1	857.922	643.000	75 %	214.922	71.547
2	875.080	643.000	73 %	232.080	77.259
3	892.582	643.000	72 %	249.582	83.085
4	910.434	643.000	71 %	267.434	89.028
5	928.642	643.000	69 %	285.642	95.089
6	947.215	643.000	68 %	304.215	101.272
7	966.159	643.000	67 %	323.159	107.579
8	985.482	643.000	65 %	342.482	114.011
9	1.005.192	643.000	64 %	362.192	120.573
10	1.025.296	643.000	63 %	382.296	127.265
11	1.045.801	643.000	61 %	402.801	134.091
12	1.066.718	643.000	60 %	423.718	141.055
13	1.088.052	643.000	59 %	445.052	148.157
14	1.109.813	643.000	58 %	466.813	155.401
15	1.132.009	643.000	57 %	489.009	162.790
16	1.154.650	643.000	56 %	511.650	170.327
17	1.177.743	643.000	55 %	534.743	178.015
18	1.201.298	643.000	54 %	558.298	185.856
19	1.225.324	643.000	52 %	582.324	193.854
20	1.249.830	643.000	51 %	606.830	202.012

La conexión de los aerogeneradores con la red eléctrica requiere que la tensión y la frecuencia entregada se encuentren dentro de un estrecho margen de variabilidad, por lo tanto, se debe contar con un sistema de protección que monitoree las condiciones de la red.

La función de la instalación de los aerogeneradores eólicos, será básicamente disminuir el consumo de combustible proveniente del actual sistema de generación mediante petróleo diésel.

CAPÍTULO 6

ESTUDIO ECONÓMICO EN LAS ISLAS

La evaluación económica es un factor que debe tener presente para evaluar la factibilidad del proyecto de electrificación, ya que, los aerogeneradores, a diferencia de otras generadoras convencionales, tienen la particularidad de que la energía obtenida se paga por el costo inicial del equipo y no por gastos de combustibles, por lo tanto, su rentabilidad debe ser evaluada con perspectiva a largo plazo.

6.1 Evaluación del costo de electrificación con sistema híbrido isla Quenu

Las bases de cálculo para la opción de electrificación con sistema híbrido son las siguientes:

- Horizonte de evaluación de 20 años.
- Tasa de descuento 10 %.
- Se consideran un sistema híbrido en base a presupuesto de la Empresa Wireless Energy.
- Se debe reemplazar el generador diésel y las baterías de almacenamiento de carga eléctrica, cada 10 años, debido a su vida útil.
- El valor del combustible diésel en Isla Quenu se estimó en un 30% superior respecto del valor del combustible puesto en Puerto Montt, lo cual nos arroja un valor de \$ 650 el litro.
- Para ajustar anualmente el valor de los costos fijos del sistema híbrido y el personaje se consideró un 2% sobre el valor original. Porcentaje estimado de acuerdo al análisis de precios realizado por la Unidad de Energización del Gobierno Regional de los Lagos.
- Para calcular los costos de operación del Sistema Híbrido, se utilizaron los valores de un estudio en isla Queullín, la cual es muy similar a isla Quenu.
- Se considera el valor del precio del petróleo diésel y la generación eléctrica de la planta eólica constante a lo largo de los años.
- Se considera la vida útil de 20 años del sistema eólico.

6.1.1 Costo de inversión del sistema híbrido eólico-diésel isla Quenu

De acuerdo con las cotizaciones de la empresa Wireless Energy y algunas aproximaciones, los valores de contar con un sistema híbrido eólico-diesel, se muestran en la Tabla 6-1.

Tabla 6-1 Costos de planta híbrido eólica-diésel isla Quenu.

Item	Inversion c/IVA (MCL\$)	Inversion s/IVA (MCL\$)	Factor de corr socia l(MCL\$)	Inversion a precio socia (MCL\$)
Planta eólica	138.342.385	116.254.105	1,01	117.416.646
Banco de baterías	53.734.818	45.155.309	1,01	45.606.862
Planta diesel	39.348.644	33.066.087	1,01	33.396.748
Sala de maquinas	15.400.133	12.941.288	1	12.941.288
Planta de inversores cargadores	11.705.706	9.836.728	1,01	9.935.095
Cerco Perimetral	1.947.604	1.636.642	1	1.636.642
Serviicos de ingenieria, montaje, y puesta en marcha.				
m.o. calificada	30.353.271	25.506.950	0,98	24.996.811
m.o. semicalificada	15.176.635	12.753.475	0,68	8.672.363
m.o. no calificada	5.058.878	4.251.158	0,62	2.635.718
suministro y montaje de obras civiles	30.353.271	25.506.950	1	25.506.950
servicios logísticos	23.126.301	19.433.866	1	19.433.866
Total	364.547.644	306.342.558		302.178.989

6.1.2 Costos fijos sistema eólico diésel isla Quenu

Los valores de los costos del sistema híbrido, se tomó como referencia de un estudio realizado en isla Queullín de la Tabla 6-2. Se destaca como requerimiento un Ingeniero Eléctrico, que se encargue de la parte técnica y un administrador de contrato, que maneje el área administrativa, entre diversos costos.

6.1.3 Evaluación técnica económica de isla Quenu

En la Tabla 6-3 se muestra el resumen de la inversión inicial y los costos totales que se deben realizar en caso de hacer la ejecución de un sistema híbrido aislado para la isla Quenu. Cabe señalar que no se realizó un estudio para calcular la rentabilidad del proyecto, ya que, por si solo el proyecto no es rentable. La isla deberá contar con un subsidio a la

Operación, estos deberán ser aportados por el Estado año a año para que las familias de las islas accedan a la energía eléctrica a tarifas equitativas, similares a las que cancelan las personas que se encuentran conectadas al SIC.

Tabla 6-2 Costos fijos sistema híbrido isla Quenu.

Costos fijos sistema hibrido(MCL\$)			
Descripción	Cantidad	Total (anual)	Total a precio social (anual)
Contratación operadores	3	18.000	10.286
Ingeniero Eléctrico	1	18.000	14.823
Administrador de contrato	1	12.000	10080
Capacitación	1	1.200	1008
Mantenimiento Planta	1	900	756
Gastos de servicios básicos	1	300	252
Comunicaciones	1	1440	1210
Transporte, fletes y traslado	1	1800	1512
Gastos movilizaciones isla	1	4500	3780
Materiales e insumo	1	1800	1512
Gastos generales y supervisión	1	3600	3024
Gastos prevención de riesgos	1	1440	1210
Imprevistos	1	1440	1210
Total (MCL\$)		66.420	50.663

6.2 Evaluación económica fuentes eólicas isla Robinson Crusoe

El proyecto eólico de la isla Robinson Crusoe al igual que la isla del apartado anterior, es un proyecto social, que busca beneficiar a todos los habitantes de la isla.

En la isla Robinson Crusoe existe un sistema diésel, pero el estudio consiste en reemplazarlo por un sistema híbrido eólico–diésel, que tiene como objetivo eliminar las limitaciones de desarrollo presentes en la isla, para aumentar la calidad de vida de los lugareños

Las Bases de cálculo para la opción de electrificación planta eólica se muestran a continuación:

- Horizonte de evaluación de 20 años.
- Tasa de descuento 10 %.
- Se considera el presupuesto de la planta eólica en base a la guía de proyectos eólicos de pequeño y mediano plazo (Ministerio de Energía).

- El valor del combustible diésel en Isla Juan Fernández es el triple que en Valparaíso, por lo cual nos arroja un valor de \$ 650 el litro.
- En la planta eólica, se consideró un crecimiento anual del 2% sobre el valor original de los costos fijos. Porcentaje estimado de acuerdo al análisis de precios realizado por la Unidad de Energización del Gobierno Regional de los Lagos.
- En la planta eólica, se consideró un crecimiento anual del 2% sobre el valor original de los costos fijos. Porcentaje estimado de acuerdo al análisis de precios realizado por la Unidad de Energización del Gobierno Regional de los Lagos.
- Se considera el valor del precio del petróleo diésel y la generación eléctrica de la planta eólica constante a lo largo de los años.
- Se considera la vida útil de 20 años del sistema eólico.

Tabla 6-3 Costo total sistema híbrido eólico-diésel isla Quenu.

Periodo	Inversión inicial Sistema híbrido (MCL\$)	Gasto por petróleo (MCL\$)	Costo mantención y administración (MCL\$)	Recambio de equipos (MCL\$)	Costos Totales (MCL\$)
año 0	\$ 302.179				\$ 302.179
año 1		\$ 1.596	\$ 50.663		\$ 52.259
año 2		\$ 2.484	\$ 51.676		\$ 54.160
año 3		\$ 3.592	\$ 52.709		\$ 56.301
año 4		\$ 4.200	\$ 53.764		\$ 57.964
año 5		\$ 5.017	\$ 54.839		\$ 59.856
año 6		\$ 5.517	\$ 55.936		\$ 61.453
año 7		\$ 5.530	\$ 57.054		\$ 62.584
año 8		\$ 6.566	\$ 58.196		\$ 64.762
año 9		\$ 7.001	\$ 59.360		\$ 66.361
año 10		\$ 7,171	\$ 60.445	\$ 79.004	\$ 146.620
año 11		\$ 7.615	\$ 61.654		\$ 69.269
año 12		\$ 7.723	\$ 62.887		\$ 70.610
año 13		\$ 8.242	\$ 64.145		\$ 72.287
año 14		\$ 8.255	\$ 65.428		\$ 73.683
año 15		\$ 8.715	\$ 66.737		\$ 75.452
año 16		\$ 8.728	\$ 68.071		\$ 76.799
año 17		\$ 9.025	\$ 69.433		\$ 78.458
año 18		\$ 9.038	\$ 70.822		\$ 79.860
año 19		\$ 9.508	\$ 72.238		\$ 81.746
año 20		\$ 9.808	\$ 73.683		\$ 83.491
Valor Actualizado de los Costos			\$ 872778		

6.2.1 Estudios de costos isla Robinson Crusoe

En el caso del Aerogenerador tipo Enercon E-33 / 330 kW con torre tubular cónica de 30 metros de altura, no se pudo obtener la información del coste para este equipo, por lo tanto, el costo se basará en la Tabla 7-7 obtenida de guía de proyectos eólicos de pequeño y mediano plazo (Ministerio de Energía) [6].

Los costos de operación y mantención generalmente se avalúan entre un 1,5%-2% de la inversión inicial por año para aerogeneradores nuevos (<10 años) y en un 3% de la inversión inicial para aerogeneradores antiguos (>10 años). Además, se incluye el costo de la línea de distribución para conexión a la red eléctrica, este valor fue tomado de [21].

Finalmente, los costos de la central eólica en la Isla Juan Fernández, se muestra en la Tabla 6-4 .

Tabla 6-4 Costo central eólica isla Robinson Crusoe.

Costo inicial	MCL\$ 1.250/ kW
Inversión inicial	412.500
Costo de operación y mantención.	6.188 /año (1,5% del valor de la inversión inicial).
Costo por línea de distribución para conexión a red eléctrica.	160.000

6.2.2 Beneficios generados por el proyecto isla Robinson Crusoe

El análisis de factibilidad económica de la planta eólica se basa en la determinación en los ahorros de los combustibles. Debido a esto, es que los ingresos corresponden al ahorro, esto significa, el reemplazo de una fuente energética de alto costo (Diesel) por otra más barata (eólica).

En términos anuales, los requerimientos eléctricos de la Isla Robinson Crusoe son de 841.100 kWh/año en comparación el sistema eólico puede producir 643.000 kWh/año y la generación diésel se reduciría a 198.100 kWh/año.

Se necesitan 198.100 litros de petróleo diésel para producir los 643.000 kWh al año, además considerando el costo del petróleo diésel en la isla Juan Fernández es del triple que en Valparaíso (se estima en unos de \$ 1380 pesos), se arroja un ahorro anual de \$ 295.393.140.

En la Tabla 6-5 se hace un resumen de los costos y beneficios del proyecto de generación eólica en la isla Robinson Crusoe.

Tabla 6-5 Costos y beneficios de planta eólico isla Robinson Crusoe.

Periodo	Inversión Inicial MCL\$	Costo de operación MCL\$	Beneficio por ahorro de combustible MCL\$	Flujos totales MCL\$
año 0	572.500			572500
año 1		6188	295393	289205
año 2		6312	295394	289082
año 3		6438	295395	288957
año 4		6567	295396	288829
año 5		6698	295397	288699
año 6		6832	295398	288566
año 7		6969	295399	288430
año 8		7108	295400	288292
año 9		7250	295401	288151
año 10		7395	295402	288007
año 11		7543	295403	287860
año 12		7694	295404	287710
año 13		7848	295405	287557
año 14		8005	295406	287401
año 15		8165	295407	287242
año 16		8328	295408	287080
año 17		8495	295409	286914
año 18		8665	295410	286745
año 19		8838	295411	286573
año 20		9015	295412	286397

6.2.3 Estudio financiero del proyecto eólico isla Robinson Crusoe

Conforme a los datos obtenidos, es posible obtener ahora el flujo de caja proyectado. Con este se podrán calcular los indicadores de rentabilidad, que finalmente determinar cuan conveniente es realizar el proyecto de la planta eólica.

Uno de los criterios es el valor actual neto llamado VAN, todo proyecto con un VAN positivo es factible. En el caso del proyecto eólico en Isla Juan Fernández, arroja un VAN de MCL\$ 1.882.120, esto quiere decir, que se recuperaran los reembolsos invertidos y que el proyecto es rentable.

Otro indicador a utilizar es la tasa interna de retorno conocida como TIR. El flujo de caja del proyecto de Isla Juan Fernández, para la generación por el sistema eólico nos arroja una TIR de 50 %, esto quiere decir, que el sistema eólico nos arroja una tasa superior a la

tasa de descuento utilizada en el proyecto, lo cual nos indica que este proyecto es conveniente de llevar a cabo.

CONCLUSIONES

Los objetivos planteados al inicio de esta memoria se realizaron con éxito para la generación mediante ERNC, tanto para la isla Quenu como para la isla Juan Fernández.

El estudio de viabilidad técnica y económica de electrificación de isla Quenu para la producción de energía eléctrica por estiércol de bovino, arrojó un resultado negativo, ya que, solo se podrá utilizar el 10 % de la energía producida, sin embargo, no se descarta su posible realización en otras zonas rurales en territorio nacional, dado que el estiércol es un combustible, que se obtiene de manera constante, permitiendo un flujo continuo de energía eléctrica al sistema, además, el estiércol digerido sirve como mejorador de suelo (los nutrientes contenidos en el estiércol fresco se mineralizan quedando mejor asimilados por la planta de biogás), actividad antibacterial y permite que su aplicación al campo sea uniforme . Esta tecnología está siendo muy utilizada en países de alto desarrollo como Alemania, como fuente complementaria a la red eléctrica, además de entregar excedentes térmicos, lo que podría ser beneficioso, si se tuviesen inversionistas.

El estudio de viabilidad técnica y económica de electrificación de Isla Quenu solo se limitó a dar entrega de la inversión inicial y los costos de operación del proyecto, ya que, tenía como finalidad que los habitantes accedieran a la energía eléctrica a tarifas equitativas y debido a los poca cantidad de personas, solo se podría llevar a cabo si el estado diera un subsidio a la zona insular. Además, se puede mencionar algunos aspectos como la recopilación de los datos de vientos de la zona y su análisis, estos dieron a conocer las características eólicas presentes en la zona de estudio. La isla Quenu presenta velocidades de viento de mediana intensidad, lo que a 25 metros de altura llega a una velocidad teórica promedio de 7 m/s, permitiendo la instalación de turbinas eólicas que generar electricidad. Todos los meses del año se presentan velocidades de viento promedio sobre los 5 m/s, con respecto a lo anterior el lugar idóneo para la instalación de la central es la parcela del sr. Alfredo Agüero, quien la mantiene libre de matorrales y despejada para el posible uso de turbinas eólicas. Se concluye en este estudio, que la demanda calculada en este estudio de energía eléctrica en el año 0 es de 49.128 kWh, la cual abastecería a 51 casas, 1ª capilla y escuela de la isla, más la posta clínica. Finalmente la localización y tamaño del proyecto hacen posible la instalación de la central eólica, dadas las buenas condiciones del viento existente en la zona y la disponibilidad de sectores adecuados, permitiendo que la instalación tenga vías de acceso y la posibilidad de ampliarla en un futuro.

En la Isla Robinson Crusoe, se realizó un estudio técnico-económico con fuentes eólicas. La isla presenta velocidades de viento de mediana intensidad, lo que elevado a 35 metros de altura llega a una velocidad teórica promedio de 6.5 m/s., permitiendo la instalación de turbinas eólicas para la generación de electricidad en la isla. Todos los meses del año, se presentan velocidades de viento promedio sobre los 5 m/s, siendo el lugar más idóneo, para la instalación de la central eólica el Cerro Centinela, ya que, la velocidad promedio del viento anual es de 6,5 m/s a 35 metros de altura, siendo un espacio físico libre ideal para emplazar el proyecto, además de tener una facilidad de acceso para su construcción. De acuerdo a lo calculado en este estudio la energía eléctrica anual generada es de 643.000 kWh el primer año, considerando que los requerimientos energéticos de la isla ascienden anualmente a alrededor de 841.100 KWh, se puede decir que el parque eólico

puede abastecer el 76 % del requerimiento energético anual de la isla. La energía eólica generada anualmente, representa un ahorro de petróleo diesel de alrededor de 208.832 litros para el primero año, de un total de 280.000 litros que se consumen anualmente en la actualidad, permitiendo disminuir gran parte la dependencia del continente. De acuerdo al criterio que nos entrega en VAN MCL\$ 1.882.120 el proyecto es económica realizable. La TIR del proyecto alcanza un valor que se puede considerar alto un 51 %, lo cual nos indica que con la tasa de descuento del proyecto 10 % tenemos la seguridad de que es autosustentable. Finalmente el parque eólico proyectado, consta de un solo aerogenerador de 330 KW, esta decisión de instalar tan solo un molino, se debe a la razón de espacio físico y medioambiental.

Se concluye con los resultados obtenidos en este proyecto que la generación a través de fuentes eólicas en isla Juan Fernández e isla Quenu, se pueden a cabo de forma eficiente y además, se pueden extrapolar a sectores rurales aislados de nuestro país, con el fin de cubrir sus necesidades básicas y de esta manera poder aumentar la calidad de vida de sus habitantes. Además, este estudio calculó la generación eléctrica por estiércol de bovino en la isla Quenu, siendo poco rentable debido a la construcción y alto consumo energético de los establos, sin embargo, en zonas rurales del sur de nuestro país que cuentan con establos, esta forma de energía sería buena alternativa para las comunidades ganaderas.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] «Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, «Ley Chile,» BCN,» 15 Mayo 2015. [En línea]. Available: <http://www.leychile.cl/>.
- [2] «Centro de Energías Renovables, «Reporte CER Mensual Abril,» 2014.».
- [3] «Asociación Gremial de Generadoras de Chile, [En línea]. Available: <http://generadoras.cl/>».
- [4] World Wind Energy Association, [En línea]. Available: www.wwindea.org/.
- [5] C. F. Brush, «The Windmill Dynamo And Electric Light Plant Of MR. Brush,» *Scientific American*, 1890.
- [6] C. d. E. Renovables, «Guía de desarrollo de pequeños y medianos proyectos de energía eólica,» Santiago, 2013.
- [7] «Centrales de Energía Renovables».
- [8] S. Leyton, «Análisis Sistema Chileno ERNC a la Luz de Modelos Normativos,» 5 julio 2016. [En línea]. Available: <http://www.centralenergia.cl/2010/10/20/analisis-sistema-chileno-ernc-a-la-luz-de-modelos-normativos/>.
- [9] J. A. P. Medel, «Estudio y diseño de un biodigestor para aplicación en pequeños ganaderos y lecheros,» Santiago, 2010.
- [10] S. Ramelli, «Estudio de factibilidad técnico - económico de la generación de energía eléctrica a partir de biogás obtenido de la digestión anaerobia de estiércol bovino,» 2007.
- [11] Ward A. et al. “Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources”, Bioresource Technology, 2008.
- [12] «Biodigestores, una alternativa a la autosuficiencia energética y de bio-fertilizantes,» Fundación Hábitat, 2005.
- [13] R. B. B. y T. R. Preston, Biodigestor de bajo costo para la producción de combustible y fertilizante a partir de excretas, 1987.
- [14] K. G, Ingeniería Ambiental Fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión. Vol 3, McGraw-Hill, 1999.
- [15] M. d. Energía, «Manual de biogás,» Proyecto CHI/00/G32 “Chile: Remoción de Barreras para la Electrificación Rural con Energías Renovables”, Santiago, 2012.
- [16] D. E. F. Tavizón, «Producción de energía mediante estiércol de vaca».
- [17] B. C. V. Solis, «Proyecto de electrificación de la isla Quenu,» Valdivia, 2007.
- [18] «Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile, «Explorador de Energía Eólica,» Ministerio de Energía, Gobierno de Chile, [En línea],» [En línea]. Available: <http://ernc.dgf.uchile.cl/Explorador/Eolico2/>. [Último acceso: 7 Abril 2016].
- [19] C. G. Paul, Energías renovables no convencionales para uso domiciliario, Santiago: Universidad de Chile, 2013.
- [20] I. Cerda, « Diagnóstico Ambiental de la Isla Marinero Alejandro Selkirk, Parque Nacional,» Valparaíso, 2005.

- [21] L. reyes, P. Reyes y N. Garrido, «Diagnóstico de demanda energética y definición de Programa de Energía para la comunidad de San Juan Bautista,» Santiago, 2011.
- [22] M. d. Energia, «Construccion Planta de Generacion Eólica, Robinsoe Crusoe,» 2005.
- [23] CNE, «Desarrollo de un instrumento para el Fortalecimiento de la Operacion del Mecanismo del Desarrollo Limpio en Chile para proyectos del Sector de Energía,» Santiago, 2006.
- [24] D. Kem, «Procesos de transferencia de calor,» Compañía Editorial Continental, 1965.
- [25] U. d. E. G. R. d. l. Lagos, «Análisis de alternativas de electrificación Isla Queullín, Comuna de Calbuco, Region de los Lagos,» 2015.
- [26] C. N. d. Energía, «Proyecto de hibridizacion eólico-diesel isla Robinsoe Crusoe - Archipiélago Juan Fernández.»
- [27] I. Pakarati, «Aplicacion de energia eólica para generar energia eléctrica en isla de Pascua,» Valparaiso, 2000.
- [28] U. d. C. y U. T. F. S. M. , «Aporte Potencial de: Energías Renovables No Convencionales y Eficiencia Energética la Matriz Eléctrica, 2008 – 2025,» Santiago, 2008.
- [29] E. Barruel, «Breve descripción geográfica y toponímica de Calbuco y apellidos aborígenes de Chiloé. Chile.,» 1992.
- [30] «Las islas Quenu y Tabón de la comuna de Calbuco cuentan con energía eléctrica eólica,» *El Llanquihue*, 2013.
- [31] «The Wind Power: Base de datos de turbinas eólicas y parques eólicos,» [En línea]. Available: <http://www.thewindpower.net/>. [Último acceso: 20 05 2014].
- [32] «Utilización del biogás como combustible para motores de combustión interna,» Santa Clara, 2008.

APÉNDICE A

VIENTOS Y POTENCIAS DE AEROGENERADORES

APÉNDICE A

VIENTOS Y POTENCIA DE AEROGENERADORES

A.1 Introducción

Es necesario conocer las características del viento antes de realizar un proyecto de electrificación con energía eólica, por esta razón se describe la energía obtenida del viento desde su origen como fuente energética hasta su utilización en máquinas eólicas. El informe de los registros de vientos con los cuales se trabaja en esta memoria está basado en el uso de modelación numérica. La modelación desarrollada proporciona datos simulados con un modelo atmosférico de mesoescala, de manera independiente de estaciones meteorológicas locales. El modelo empleado es el WRF (WeatherResearch and Forecasting) versión 3.2, que ha sido desarrollado por NCAR (National Center for Atmospheric Research) en Estados Unidos y es ampliamente utilizado en el área de evaluación del recurso eólico a nivel mundial. El modelo fue aplicado con una resolución espacial de 1 kilómetro y tiene 12 niveles verticales entre 0 y 200 metros de altura. Se disponen datos para el año 2010 por completo. Además el programa cuenta con una serie de aerogeneradores, los cuales nos entrega una simulación de los ciclos medios de potencia, de acuerdo a la velocidad de los vientos que se encuentran en la zona.

A.2 Ciclos medios de los vientos

Los ciclos medios de los vientos de la Isla Quenu se muestran en la Figura A-1 y A-2. En la Figura A-1 se aprecian los ciclos medios de velocidad de los vientos a 25 metros según el mes del año, este corresponde a un registro anual y en la Figura A-2 se aprecian los ciclos medios de velocidad de los vientos según hora del día, esta corresponde a un registro diario.

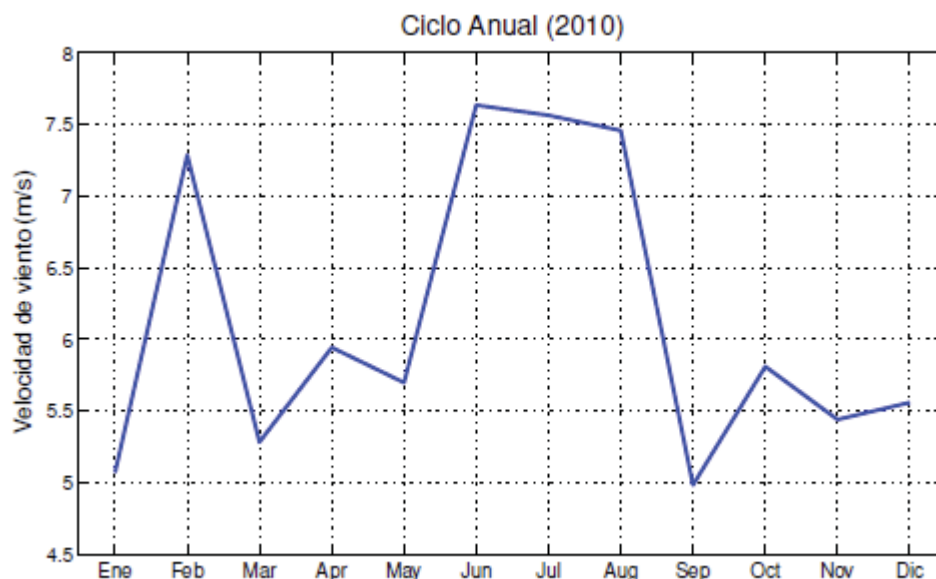


Fig. A-1 Ciclos de los vientos anual isla Quenu

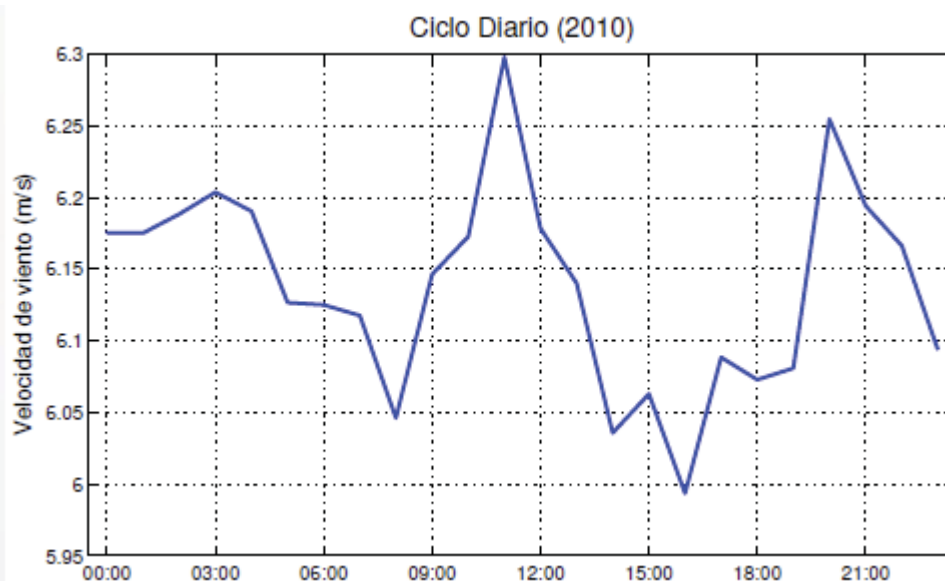


Fig. A-2 Ciclos de los vientos diario isla Quenu

Los ciclos medios de los vientos en el Archipiélago Juan Fernández se muestran en la Figura A-3 y la Figura A-4. En la Figura A-3 se muestran los ciclos medios de velocidad de los vientos a 35 metros según el mes del año, este corresponde a un registro anual y en la Figura A-4 se muestran los ciclos medios de velocidad de los vientos según hora del día, esta corresponde a un registro diario.

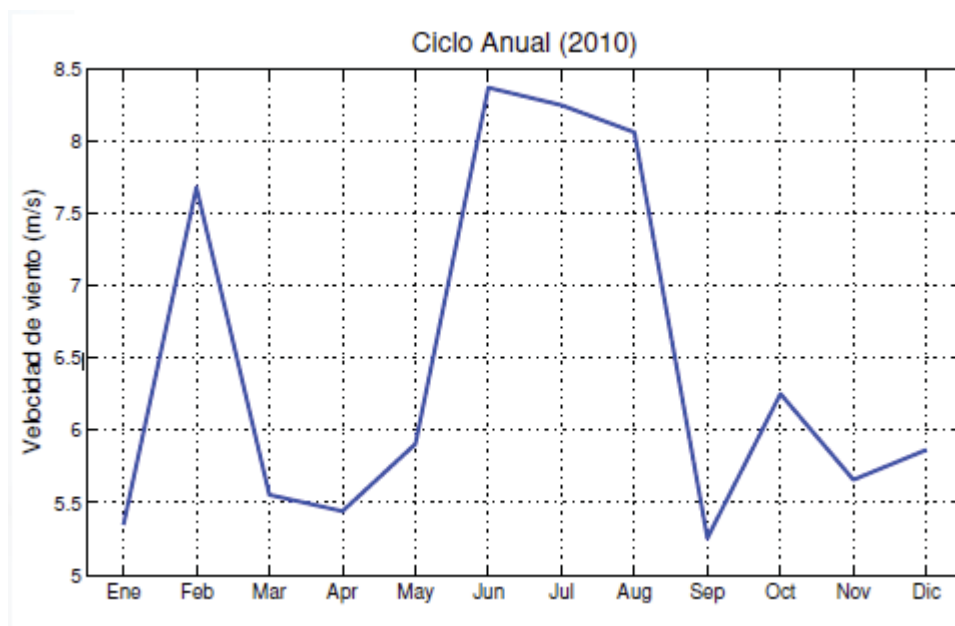


Fig. A-3 Ciclos de los vientos anual isla Robinson Crusoe

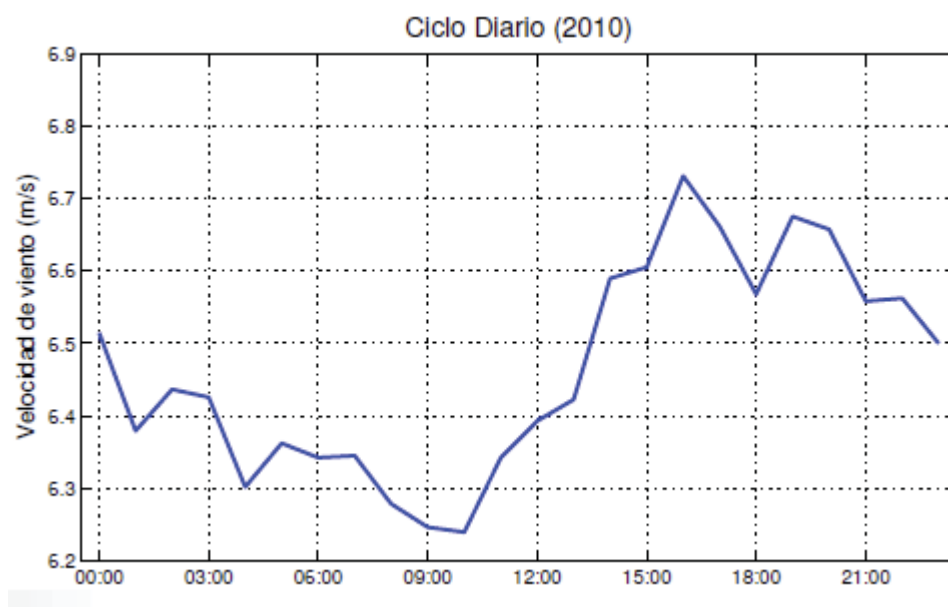


Fig. A-4 Ciclos de los vientos diario isla Robinson Crusoe

A.3 Ciclos medios de potencia de los aerogeneradores

Los ciclos medios de potencia del aerogenerador Berkey Excel-R en la isla Quenu se aprecia en Figura A-5, se muestran los ciclos medios de potencia a 25 metros según el mes del año (dibujo superior) y la hora del día (dibujo inferior).

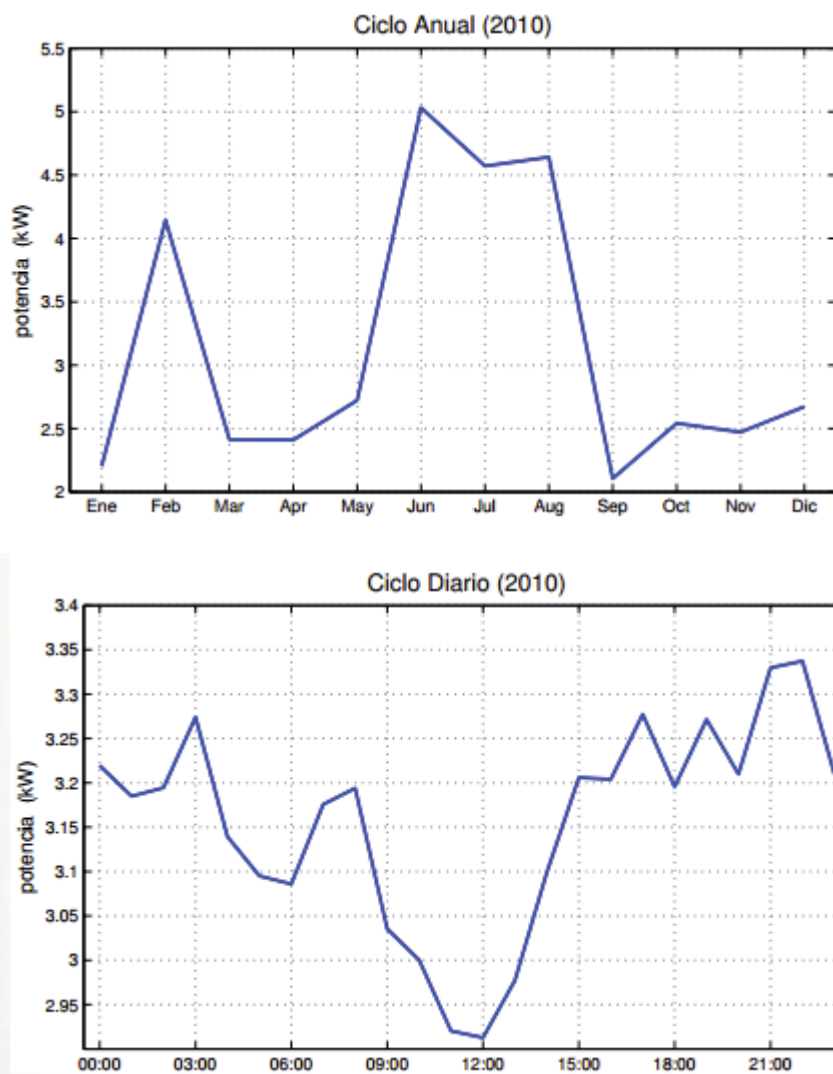


Fig. A-5 Ciclos medios de potencia del aerogenerador Berkey Excel R

Los ciclos medios de los aerogeneradores de la Isla Juan Fernández se aprecian en la Figura A-6 y A-7. En la Figura A-7 se muestran los ciclos medios de potencia del aerogenerador Enercon E-33 / 330 kW a 35 metros según el mes del año (dibujo superior),y la hora del día (dibujo inferior) y en la Figura A-8 se muestran los ciclos medios de potencia del aerogenerador Vergnet 275 kW MP C/Ra a 35 metros según el mes del año (dibujo superior),y la hora del día (dibujo inferior) .

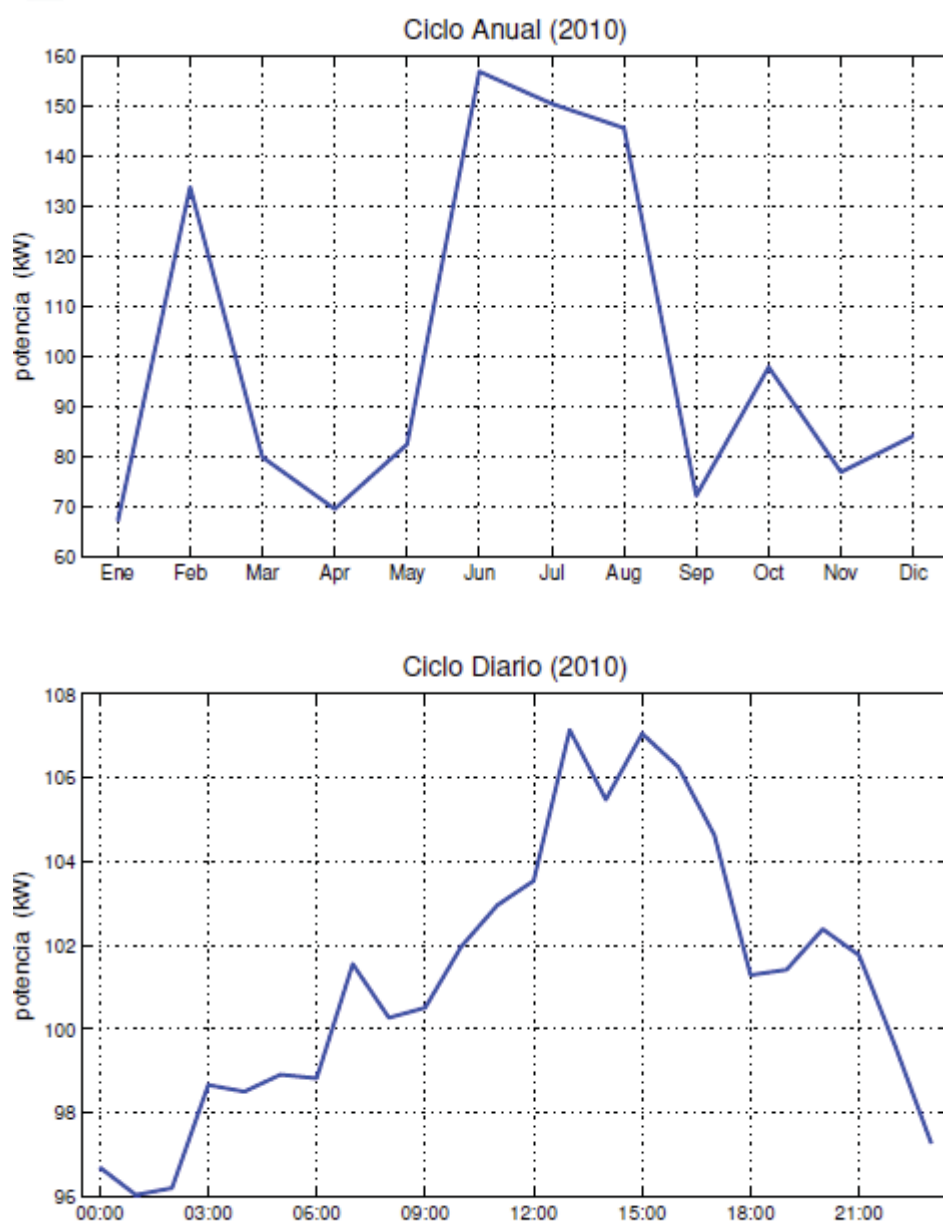


Fig. A-6 Ciclos medios de potencia del aerogenerador Enercon

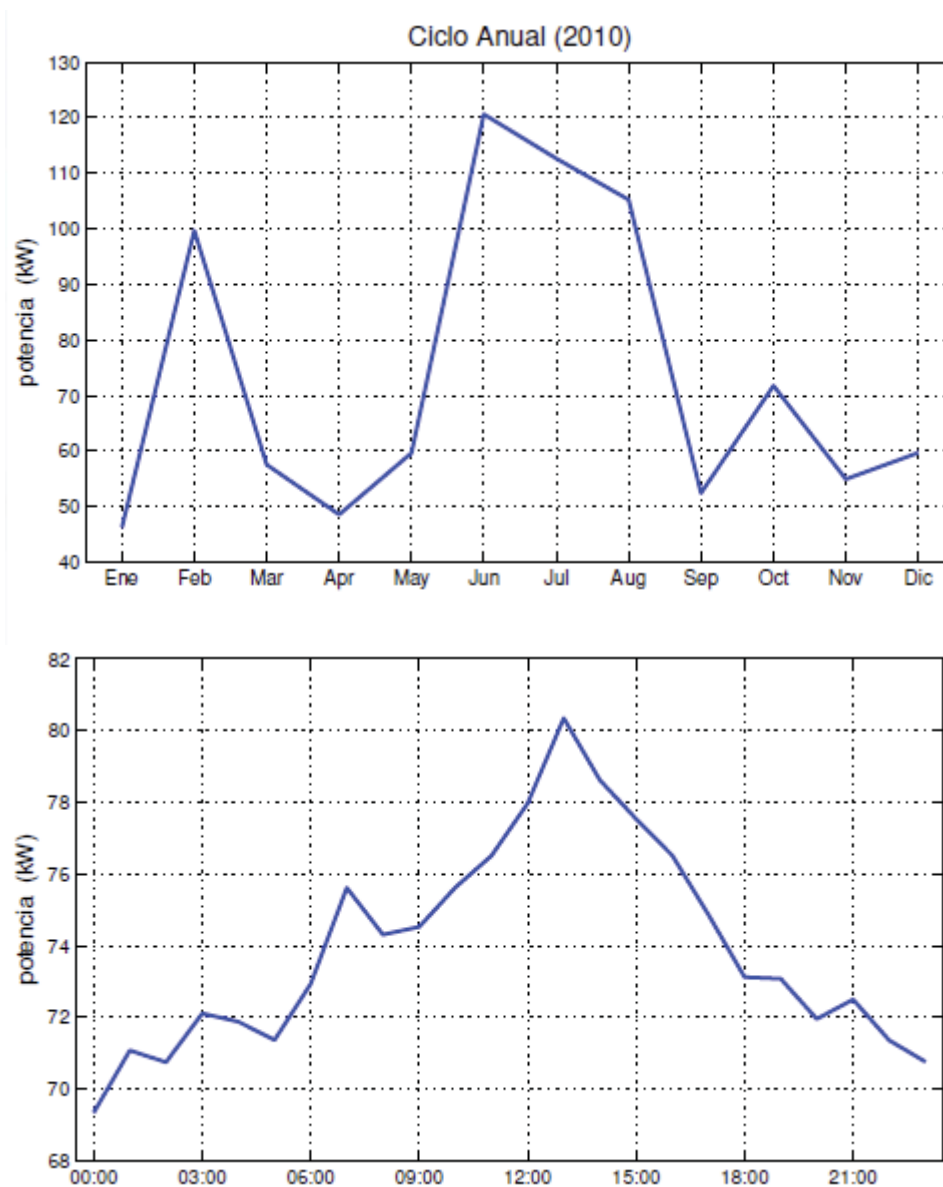


Fig. A-7 Ciclos medios de potencia del aerogenerador Vergnet