

UNIVERSIDAD LATINA DE COSTA RICA

**FACULTAD DE INGENIERÍAS Y TECNOLOGÍAS DE LA
INFORMACIÓN Y COMUNICACIÓN TIC's**

**ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y MECÁNICA
LICENCIATURA EN INGENIERIA ELECTROMECAÁNICA**

**Trabajo final de graduación para optar por el grado de Licenciatura
en Ingeniería Electromecánica**

**Propuesta de producción de energía eléctrica con fuentes renovables
para alcanzar 100 % de autoabastecimiento de la empresa Agroindustrial
Lechera Miravalles, en Guanacaste**

Autor: Ronny Alberto Rodríguez Chaves

Heredia, Costa Rica

Diciembre, 2021

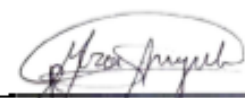


TRIBUNAL EXAMINADOR


Este proyecto titulado: Propuesta de producción de energía eléctrica con fuentes renovables para alcanzar el 100 % de autoabastecimiento de la Empresa Agroindustrial Lechera Miravalles en Guanacaste, por el estudiante: Ronny Alberto Rodríguez Chaves, fue aprobada por el Tribunal Examinador de la carrera de Ingeniería Electromecánica de la Universidad Latina de Costa Rica, Sede Heredia, como requisito para optar por el grado de Licenciatura:



Ing. Fred Castillo Moya
Tutor



Ing. Rodolfo Mora Angulo
Lector



Ing. Vittorio Andrés Vesco Ortega
Representante

Heredía, 05 de enero de 2022

Sres.

Miembros del Comité de Trabajos Finales de Graduación

SD

Estimados Señores:

He revisado y corregido el Trabajo Final de Graduación, denominado: Propuesta de producción de energía eléctrica con fuentes renovable para alcanzar el 100 % de autoabastecimiento de la Empresa Agroindustrial Lechera Miravalles en Guanacaste, elaborado por el estudiante Ronny Alberto Rodríguez Chaves pueda optar por el grado de licenciatura en ingeniería electromecánica.

Considero que dicho trabajo cumple con los requisitos formales y de contenido exigidos por la Universidad, y por lo tanto lo recomiendo para su defensa oral ante el Consejo Asesor.

Suscribe cordialmente,



Ing. Fred Castillo Moya

Tutor

Heredia, 05 de enero de 2022

Sres.

Miembros del Comité de Trabajos Finales de Graduación

SD

Estimados Señores:

He revisado y corregido el Trabajo Final de Graduación, denominado: Propuesta de producción de energía eléctrica con fuentes renovable para alcanzar el 100 % de autoabastecimiento de la Empresa Agroindustrial Lechera Miravalles en Guanacaste, elaborado por el estudiante Ronny Alberto Rodríguez Chaves pueda optar por el grado de licenciatura en ingeniería electromecánica.

Considero que dicho trabajo cumple con los requisitos formales y de contenido exigidos por la Universidad, y por lo tanto lo recomiendo para su defensa oral ante el Consejo Asesor.

Suscribe cordialmente,

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Rodolfo Mora Angulo', is written over a horizontal line.

Ing. Rodolfo Mora Angulo

Lector

San José, 17 de enero de 2022

Señores
Escuela de Ingeniería Eléctrica y Mecánica
Universidad Latina de Costa Rica
Heredia, Costa Rica.


Estimados señores:

Yo, Ronulfo Vargas Vargas, cédula de identidad N.º 600620500, licenciado en Filología española, graduado de la Universidad de Costa Rica, perteneciente al Colegio de Licenciados y Profesores en Letras, Filosofía, Ciencias y Artes de Costa Rica (Colypro), carné N.º 4838, hago constar que he revisado y corregido en su forma el documento titulado **Propuesta de producción de energía eléctrica con fuentes renovables para alcanzar 100% de autoabastecimiento de la empresa Agroindustrial Lechera Miravalles, en Guanacaste.**

Dicho documento fue elaborado por el estudiante Ronny Alberto Rodríguez Chaves, cédula de identidad N.º 502590084, para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Electromecánica.

He revisado y corregido aspectos tales como construcción de párrafos, vicios del lenguaje trasladados a lo escrito, ortografía, puntuación y otros relacionados con el campo filológico, y doy fe de que dicho documento es apto desde el punto de vista del idioma para ser presentado a la Universidad como trabajo de graduación.

Atentamente,


Lic. Ronulfo Vargas Vargas
Filólogo
Cédula de ident. N.º 600620500
Colegio de Licenciados y Profesores
N.º de carné 4838

Lic. Romulfo Vargas V.
Filólogo
Carné 4838 - Tel. 8875-3728

DECLARACIÓN JURADA

Yo, Ronny Alberto Rodríguez Chaves, egresado de la Universidad Latina de Costa Rica, declaro bajo la fe de juramento y consciente de las responsabilidades penales de este acto, que soy autor intelectual del trabajo final de graduación titulado:

Propuesta de producción de energía eléctrica con fuentes renovables para alcanzar 100% de autoabastecimiento de la empresa Agroindustrial Lechera Miravalles, en Guanacaste.

Por tanto, libero a la Universidad de cualquier responsabilidad en caso de que mi declaración sea falsa.

Firmo en San José el día 12 de diciembre de 2021



Ronny Alberto Rodríguez Chaves

Cédula 502590084

“Carta autorización del autor (es) para uso didáctico del Trabajo Final de Graduación”

Vigente a partir del 31 de Mayo de 2016, revisada el 24 de Abril de 2020

Instrucción: Complete el formulario en PDF, imprima, firme, escanee y adjunte en la página correspondiente del Trabajo Final de Graduación.

Yo (Nosotros):

Escriba Apellidos, Nombre del Autor(a). Para más de un autor separe con " ; "

Ronny Alberto Rodríguez Chaves

De la Carrera / Programa: **Ingeniería Electromecánica**

autor(es) del trabajo final de graduación titulado:

Propuesta de producción de energía eléctrica con fuentes renovable para alcanzar el 100 % de autoabastecimiento de la Empresa Agroindustrial Lechera Miravalles en Guanacaste

Autorizo (autorizamos) a la Universidad Latina de Costa Rica, para que exponga mi trabajo como medio didáctico en el Centro de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación (CRAI o Biblioteca), y con fines académicos permita a los usuarios su consulta y acceso mediante catálogos electrónicos, repositorios académicos nacionales o internacionales, página Web institucional, así como medios electrónicos en general, Internet, intranet, DVD, u otro formato conocido o por conocer; así como integrados en programas de cooperación bibliotecaria académicos, que permitan mostrar al mundo la producción académica de la Universidad a través de la visibilidad de su contenido.

De acuerdo a lo dispuesto en la Ley No. 6683 sobre derechos de autor y derechos conexos de Costa Rica, permita copiar, reproducir o transferir información del documento, conforme su uso educativo y debiendo citar en todo momento la fuente de información; únicamente podrá ser consultado, esto permitirá ampliar los conocimientos a las personas que hagan uso, siempre y cuando resguarden la completa información que allí se muestra, debiendo citar los datos bibliográficos de la obra en caso de usar información textual o paráfrasis de la misma.

La presente autorización se extiende el día (Día, fecha) 05 del mes Enero de año 2022 a las 20 horas. Asimismo doy fe de la veracidad de los datos incluidos en el documento y eximo a la Universidad de cualquier responsabilidad por su autoría o cualquier situación de perjuicio que se pudiera presentar.

Firma(s) de los autores

Según orden de mención al inicio de ésta carta:




RESUMEN

El presente trabajo final de graduación tiene el propósito de efectuar, desde una perspectiva técnico-reglamentaria, ambiental y económica, el análisis de los recursos disponibles en la zona cercana a la empresa en estudio, para determinar si es posible usar energía eléctrica con base en fuentes renovables que se puedan emplear para que, por medio de sistemas fotovoltaicos o del uso de biometano, se desarrollen e instalen sistemas para soluciones la generación de energía eléctrica para autoconsumo. La investigación se realiza acerca de una empresa agroindustrial lechera ubicada en Guayabo de Bagaces, en la provincia de Guanacaste, que se conoce por su cercanía a plantas solares comerciales, y como resultado se espera que esta empresa logre, en la medida de lo posible, obtener 100% de autonomía en su producción energética. El presente trabajo se basa en analizar las fuentes disponibles de energía en la zona, para el dimensionamiento de los sistemas fotovoltaicos con los que se espera el suministro de la energía necesaria y la potencia que requiere la empresa para la producción lechera, a fin de determinar el potencial uso del biometano que se pueda producir con biodigestores anaeróbicos, al usar los residuos de lavado y recolecta de las excretas del ganado, el cual se sabe que tiene alto valor energético y del cual se puede producir biogás para sustituir GLP o usarlo para producir electricidad y, por último, determinar -desde el punto de vista económico- cuáles de las opciones analizadas resultan económicamente viables una vez que se hayan determinado y superado los aspectos técnicos y regulatorios de nivel nacional.

El proyecto se desarrolla en tres etapas. En primera instancia se determinan las cargas de consumo de la lechería y de la vivienda aledaña; luego se dimensionan los requerimientos de sistemas fotovoltaicos y de la capacidad de los sistemas a base de biogás para producir electricidad y, por último, se analiza, con base en los costos de inversión y operación, la mejor alternativa por recomendar para producir electricidad para autoconsumo desde el punto de vista económico. Del estudio se obtienen varios resultados interesantes para consumidores de energía que deseen bajar el costo de energía a final de mes, dado que conforme con los resultados obtenidos en esta investigación se determina que existen recursos energéticos suficientes y también la rentabilidad económica necesaria para instalar paneles solares

monocristalinos de alta eficiencia, cuya recuperación de la inversión se obtiene a los nueve años con una tasa interna de retorno de 11% y una vida útil de 25 años. Caso contrario sucede con el uso del biometano, cuya inversión de capital no se recupera si se emplea el volumen recuperado para la producción de electricidad, sobre todo porque la tecnología existente aún tiene índice de eficiencia por debajo de 30% en el proceso de transformación de energía química a electricidad. No obstante, se vislumbran en el futuro desarrollos que pueden hacer rentables este tipo de inversiones y, sobre todo, que permite disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero, como el metano, el cual aún no se reconoce desde el punto de vista económico para este tipo de industrias.

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1	Pág.
1. Problema y propósito	
1.1. Síntoma.....	1
1.2. Causas.....	1
1.3. Pronóstico.....	2
1.4. Control del pronóstico.....	2
1.5. Formulación del problema.....	3
1.6. Sistematización del problema.....	4
1.7. Objetivo general.....	5
1.8. Objetivos específicos.....	5
1.9. Estado actual de la investigación.....	6
1.10. Metodológica.....	7
 CAPÍTULO 2	
2. Marco teórico	
2.1. Marco situacional.....	10
2.2. Antecedentes históricos de la empresa.....	12
Marco conceptual o marco teórico del objeto de estudio	
2.2.1. Energía fotovoltaica.....	14
2.2.2. Cálculo de la hora solar pico HSP	17
2.2.3. Modos de interacción con la red de servicio público...	19
2.2.4. Los tipos de celdas.....	22
2.2.5. Los inversores.....	23
2.2.6. Estructuras de montaje.....	25
2.2.7. Características eléctricas de salida de los paneles.....	26

2.2.8. El biometano como fuente energética.....	28
2.2.9. Algunos requisitos para la producción de biogás.....	30
2.2.10. Generación de energía eléctrica.....	31
CAPÍTULO 3	
3. Determinación del potencial de energía disponibles.....	36
3.1. Irradiancia solar.....	37
3.2. Curva de producción energética anual.....	39
3.3. Cálculo de carga demandada.....	44
3.4. Dimensionamiento del requerimiento de paneles.....	48
3.5. Presupuesto del sistema fotovoltaico.....	52
3.6. Cálculo de las baterías.....	54
3.7. Cálculo del inversor.....	55
3.8. Generación con biometano.....	55
3.9. Cálculo del potencial del biometano.....	57
3.10. Potencia disponible a partir de biogás.....	61
3.11. Usos potenciales del biometano.....	63
3.12. Costo del sistema de generación a base de biometano	67
3.13. Análisis económico del sistema fotovoltaico.....	68
3.15. Análisis económico del sistema a base de biometano...	70
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	
4.1 Conclusiones.....	74
4.2 Recomendaciones.....	76
FUENTES BIBLIOGRÁFICAS.....	78
ANEXOS.....	83

ÍNDICE DE TABLAS

- Tabla No. 1: Características del biogás
- Tabla No. 2: Producción de biogás con residuo animal
- Tabla No. 3: Energía equivalente al biogás
- Tabla No. 4. Elaboración propia con datos de la Dirección de Energía (MINAE) (2021)
- Tabla No. 5. Datos de potencial energético de la planta solar Miravalles
- Tabla No. 6. Requerimientos de potencia de las cargas de la planta
- Tabla No. 7. Resumen del sistema fotovoltaico
- Tabla No. 8. Cálculos del número de paneles monocristalinos
- Tabla No. 9. Cálculos del número de paneles policristalinos
- Tabla No. 10. Comparación de paneles de ambas tecnologías
- Tabla No. 11. Costos del sistema fotovoltaico
- Tabla No. 12. Aporte energético anual del biogás en el país
- Tabla No. 13. Aporte energético anual del biogás en la lechería
- Tabla No. 14. Producción de biogás recuperado en la lechería
- Tabla No. 15. Propuesta de alternativas del uso potencial de biogás en la lechería
- Tabla No. 16. Costos estimados de instalar el sistema de producción de biometano
- Tabla No. 17. Análisis financiero de la propuesta basada en paneles monocristalinos
- Tabla No. 18. Análisis financiero de la propuesta basada en el uso del biometano

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura No.1: Disponibilidad de energía radiante en comparación con la de otras fuentes
- Figura No.2: Vista general de la empresa Agroindustria Lechera, ubicada en Guayabo de Bagaces, Guanacaste.
- Figura No.3: Relación de irradiancia disponible en el día
- Figura No.4: Cálculo de ángulo de incidencia del panel solar
- Figura No.5: Representación gráfica de la energía de la hora solar pico (HSP)
- Figura No.6: Esquema interconectado a la red
- Figura No.7: Esquema no interconectado a la red
- Figura No. 8: Ondas de salida de inversores comerciales
- Figura No. 9. Ejemplo de inversores para sistemas fotovoltaicos
- Figura No. 10. Ejemplo de estructuras para sistemas FV
- Figura No. 11. Relación I/V para la curva de potencia en un panel solar
- Figura No. 12: Ejemplo de un biodigestor
- Figura No. 13: Ejemplo de un motor para biogás
- Figura No. 14. Irradiación solar directa en Costa Rica
- Figura No. 15. Imagen de la planta solar Miravalles propiedad el ICE
- Figura No. 16, Producción de energía solar en un día típico
- Figura No. 17. Producción mensual de energía
- Figura No. 18: Producción por mes de mayor a menor aporte de energía
- Figura No. 19: Vista interna de una línea de ordeño
- Figura No. 20: Compresor del sistema principal de enfriamiento
- Figura No. 21. Sistema de vacío para el proceso de ordeño
- Figura No. 22. Usos del biometano
- Figura No. 23. Potencial energético de la biomasa en Costa Rica
- Figura No. 24. Equipos para biogás
- Figura No. 25. Diagrama general de un sistema de uso del biometano

CAPÍTULO 1

1. PROBLEMA Y PROPÓSITO

1.1. Síntoma

La actividad productiva agroindustrial, al igual que en todos los sectores productivos, dependen de la calidad, la continuidad y el precio de la energía eléctrica para la realización de los procesos. En la actualidad la empresa agroindustrial dedicada a la producción de leche acerca de la cual se hace el presente proyecto de investigación experimenta dificultades en la continuidad del servicio eléctrico. Además, los costos de las tarifas eléctricas empiezan a ser un componente importante dentro de los gastos mensuales que debe atender la empresa para poder operar en forma continua durante todos los días de la semana, debido a la naturaleza de la actividad, la cual nunca se detiene y requiere que los equipos automáticos para la extracción de la leche y los sistemas de enfriamiento nunca fallen, aspecto que no se está logrando con la empresa suministradora del servicio público de electricidad actualmente. El presente trabajo de investigación se realiza sobre una empresa de la zona de Miravalles, en la provincia de Guanacaste. Esta empresa está dedicada a la producción de leche de ganado vacuno y enfrenta esas situaciones a diario, por lo que, mediante un análisis detallado del requerimiento de electricidad, se procura determinar más claramente cuál es el problema y cuáles las posibles soluciones ante los síntomas detectados.

1.2. Causas

Desde hace dos años se conocen tres causas fundamentales que obligan a la empresa a pensar en una solución de abastecimiento energético. Para poder solventar los problemas encontrados en el presente proyecto de investigación se aborda, en primer lugar, el alto costo de la energía, que obliga a pagar casi US\$12,000 de electricidad al año, con la incertidumbre de que casi siempre se espera un crecimiento en el costo, tal como ocurre en la actualidad. Esto porque el Instituto Costarricense de Electricidad frecuentemente solicita a la Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos de los Servicios Públicos un aumento en las tarifas de 20%, tal como lo indica el medio informativo Monumental.cr.cr (2021). La segunda causa es la de buscar una independencia energética, que está relacionada con las interrupciones del servicio eléctrico y que afecta principalmente los sistemas de enfriamiento y las bombas de

vacío que se emplean para el ordeño. En tercer lugar, está la sustentabilidad de la producción de cara al cambio climático y que hace que las agroindustrias traten de resolver los problemas de las emisiones de gases de efecto invernadero. Se sabe que el ganado en Costa Rica es una fuente importante de emisiones de gases de efecto invernadero, de forma como se observa en el Informe Bienal de Actualización ante la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (2019); y si no se recupera parte del biometano para usarlo como gas para calentar agua y producir electricidad se estaría frente a una acción en contra de la mitigación que se debería emplear para evitar efectos adversos al cambio climático. En resumen, aunque la situación se ha mantenido en los dos últimos dos años, a partir del 2022 la empresa está pensando en implementar una solución para su propia producción de electricidad, o biogás, con el objetivo de resolver en los próximos años los problemas aquí mencionados.

1.3. Pronóstico

El sector agroindustrial asociado con la pequeña empresa, si no se buscan diversas alternativas para bajar sus costos de operación y hacer más eficientes los procesos productivos, puede perfectamente caer en condiciones en las que se tengan que cerrar las operaciones. Además, es importante, no solo tomar en cuenta los precios de la energía eléctrica, sino analizar también los efectos de su actividad, que sin duda tienen repercusiones en el cambio climático. Se sabe que una agroindustria que tenga medidas de mitigación ambiental tiene mayor posibilidad de que su producción sea reconocida con un valor agregado.

1.4. Control del pronóstico

El propósito fundamental de este proyecto es estudiar, desde una perspectiva técnico-reglamentaria, ambiental y económica, el diseño de diversas configuraciones de sistemas fotovoltaicos, el uso del biometano y los sistemas de respaldo para la generación de energía eléctrica para autoconsumo en una agroindustrial lechera ubicada en Guayabo de Bagaces, en la provincia de Guanacaste, de forma tal que se logre, en la medida de lo posible, 100 % de autonomía en su producción energética, para no depender únicamente del ICE, de forma tal que la energía utilizada generada sea para autoconsumo y empleada la red eléctrica de la empresa distribuidora como respaldo o batería virtual.

El proyecto está enfocado principalmente en analizar las fuentes disponibles de energía que sean totalmente renovables para el autoconsumo eléctrico de la empresa; es por eso que se tiene planeado trabajar en cuatro áreas fundamentales:

- a. Estudio y dimensionamiento de los sistemas fotovoltaicos para suministrar la energía y la potencia que requiere la empresa para el proceso de producción lechera, el acarreo y el almacenamiento de producto hasta los tanques de refrigeración, para luego ser entregado a la Cooperativa Dos Pinos y otras empresas procesadoras de la leche en forma industrial.
- b. Determinar el potencial uso del biometano que se pueda producir con biodigestores anaeróbicos al usar los residuos de lavado y recolectar las excretas del ganado, las cuales se sabe que tienen alto valor energético y con las cuales se puede producir biogás para sustituir el GLP o usarlo para producir electricidad.
- c. Diseñar el mejor mecanismo de almacenamiento energético ya sea en baterías químicas o usando la red de distribución del ICE como batería virtual. Esto se debe a que parte del consumo energético se incrementa en las madrugadas cuando empieza el proceso de producción de leche, y eso requiere usar la energía en forma diferida, que se produce durante el día con sistemas fotovoltaicos, principalmente.
- d. Establecer los requerimientos de un inversor inteligente para poder escoger en cada instante la fuente energética que se va a utilizar para alimentar las cargas de las empresas, en la cual se tienen que atender equipos de enfriamiento, bombas de vacío, sistemas de extracción, iluminación y compresores, principalmente.

1.5. Formulación del problema

Ante la falta de certeza de tener electricidad en forma permanente para atender la necesidad de la empresa constantemente, y mientras los precios de la energía no disminuyan y, por el contrario, haya interés del ICE en incrementar las tarifas, esta empresa debe buscar una solución que le dé continuidad en el acceso a la energía y que le permita bajar el costo de la facturación mensual de los servicios. En este escenario, conociendo lo que sucede mundialmente, cuando se ha establecido la energía solar como la opción más rentable debido a la baja de los costos de producción y al desarrollo de la producción sustentable, se debe

actuar según lo expresado por *la International Business Time*, que explica que esta es una de las fuentes alternativas para la competitividad de las empresas, especialmente en los tiempos de la pandemia del Covid-19, en la cual la reactivación económica es vital. Adicionalmente, se conoce que actualmente en Costa Rica existen más de dos mil sistemas de generación distribuida para autoconsumo que generan energías provenientes de fuentes tales como la fotovoltaica, la mini-hidroelectricidad, la eólica y la biomasa que producen su propia energía (Dirección de Energía, MINAE, 2021).

1.6. Sistematización del problema

Acorde con los datos oficiales del Viceministerio de Energía disponibles en la Dirección de Energía, actualmente más de 90 % de la generación distribuida que se emplea en Costa Rica se hace con fuentes solares; por consiguiente, la propuesta de investigación consiste en hacer un análisis técnico y financiero, para ver si es posible la autogeneración 100 % propia para la lechería, y establecer una solución que sea replicable en industrias similares. Existe actualmente normativa que permite generar energía en forma autónoma por medio de sistemas distribuidos, según lo dispuesto en el Decreto MINAE-39220 vigente desde el 2015, en que el abonado puede tomar la decisión, si las condiciones técnica lo permiten, de aislarse o permanecer conectado de la empresa distribuidora de electricidad; esto usando paneles solares y sistemas de almacenamiento, ya sea en la propia red de distribución o con baterías químicas, para suplir energía cuando no haya suficiente energía en las fuentes propias.

Si se genera electricidad para las empresas en forma de autoconsumo sin duda se podría disponer de una opción para bajar los costos de producción empleando la tecnología existente. Estas disrupciones tecnológicas, como el uso de sistemas fotovoltaicos para producir electricidad, el uso del biometano como residuos del proceso propios del ganado lechero, los sistemas de almacenamiento y las diversas opciones que existen en la normativa le permiten al productor optar por soluciones que le den independencia energética al bajar sus costos de facturación, obtener autonomía y, además, tener, una vez pagado el costo de la inversión, energía prácticamente gratis, salvo por los costos de mantenimiento, que generalmente son de baja cuantía.

1.7. Objetivo general

Evaluar el uso de fuentes de energía mediante sistemas fotovoltaicos y del biometano como fuente de energía eléctrica renovable para cubrir la demanda energética para autoconsumo en la compañía Agroindustrial Lechera Miravalles, ubicada en Guayabo de Bagaces, Guanacaste.

1.8. Objetivos específicos

1. Analizar las fuentes disponibles de energía que sean totalmente renovables para el autoconsumo eléctrico de la empresa, mediante el análisis del potencial energético a partir de la irradiancia solar, como una alternativa distinta de solución desde el punto de vista técnico y regulatorio, con base en la tecnología existente en Costa Rica, para producir electricidad bajo la modalidad de generación distribuida.
2. Calcular los requerimientos de energía y de potencia de la empresa bajo la condición actual de funcionamiento y las proyecciones de crecimiento de mediano plazo, de forma tal que se establezcan los cálculos de las fuentes disponibles que permitan el consumo simultaneo y el almacenamiento necesario para la operación de la agroindustria.
3. Determinar el potencial de disponibilidad y el uso del biometano que se pueda producir con biodigestores anaeróbicos al usar los residuos de lavado y recolectar las excretas del ganado lechero para aprovechar su valor energético para producir biogás; y estimar las repercusiones ambientales al recuperar el biometano con los residuos agroindustriales, y así calcular las emisiones evitadas de metano a la atmósfera.
4. Completar el estudio con un análisis económico para determinar la rentabilidad de la solución propuesta de producir y almacenar energía eléctrica para autoconsumo con fuentes fotovoltaicas y biogás, como una solución que cumpla con los requerimientos técnicos, económicos y regulatorios aplicables en Costa Rica.

1.9. Estado actual de la investigación

Con el propósito de tomar las decisiones operativas de la investigación para analizar un caso práctico de la industria nacional relacionado con el consumo de energía bajo el concepto de autoabastecimiento o autoconsumo eléctrico con fuentes 100 % renovables, basado en la zona geográfica de las cordillera de Guanacaste, se analizan las posibles fuentes de energía que se puedan obtener en el mismo sitio en donde se utiliza para la producción de leche un sistema automatizado con el que se atiende a casi 200 vacas lecheras por día. Para determinar los factores que inciden en el logro de producir energía limpia, se requiere revisar antes el contexto de servicio público, la estructura legal y los aspectos técnicos de los sistemas de autoconsumo de energía eléctrica.

El tipo de investigación requerido para el logro de los objetivos propuestos corresponde es el de la investigación descriptiva, el cual requiere una indagación empírica y sistemática en la que el investigador no tiene control directo de las variables, porque los hechos y manifestaciones ya han ocurrido o están ocurriendo, es decir, la disponibilidad de energía solar, el marco normativo y la tecnología ya están disponibles y, por consiguiente, no se pueden manipular las variables para determinar los factores que inciden en el logro de la producción de energía renovables en 100 %, y solo se analizan y se adecuan a los requerimientos de la investigación para solucionar el problema propuesto.

El tipo de investigación empleado en este trabajo final para el programa de licenciatura en ingeniería electromecánica de la Universidad Latina de Costa Rica se enfoca es una mezcla de investigación descriptiva, cuantitativa y explicativa del fenómeno de estudio. En la primera etapa el trabajo se concentra en describir los eventos, determinar las necesidades de energía e identificar científicamente las fuentes de generación eléctrica y, en segunda instancia, se trabaja en la propuesta general de diseño para resolver el suministro eléctrico, atendiendo los aspectos técnicos, ambientales y económicos para poder cumplir con los objetivos académicos e ingenieriles de la investigación.

1.10. Metodológica

Desde el punto de vista metodológico, al ser una investigación bibliográfica en la que se usan fuentes primarias y secundarias oficiales para poder describir los eventos y esclarecer la información para efectos de la propuesta de diseño de los sistemas, para producir energía

renovable en forma autóctona, se recurre a una investigación no experimental explicativa; por lo que se busca establecer relación entre variables que expliquen las causas de los eventos disponibles (La Búsqueda del Conocimiento científico UNED, 2018). Adicionalmente, la investigación, al ser de tipo cuantitativo, pretende medir el objeto de estudio. Es decir, la información se recopila mediante observación, reflexión, descripción y entrevista para determinar, principalmente, cómo resolver el fenómeno estudiado. De acuerdo con Verweij (2014), la investigación, en los aspectos cualitativo y cuantitativo, es un proceso iterativo entre las fuentes y el objeto de estudio que requiere recopilar datos, reconstrucción de casos; coleccionar datos, por ejemplo, en una matriz, analizarlos, definir patrones, interpretar los y regresar de nuevo al caso para definir si la aproximación es la requerida, antes de emitir los resultados.

Para determinar el objeto de estudio, el cual se concentra estrictamente en la producción de energía eléctrica que se produce y se consume en el mismo sitio, se seleccionan muestras no probabilísticas de elementos para determinar causas relacionadas para resolver el esquema y determinar el tipo de investigación no experimental. Por consiguiente, dicha selección corresponde a elementos hasta “arbitrarios” con base en la investigación previa al momento de plantear los objetivos, cuyo fin es beneficiar la investigación mediante el uso de variables instrumentales que permitan obtener información de fuentes de información oficial, tales como el Centro Nacional de Control de Energía, el Plan de Expansión de la Generación, el VII Plan Nacional de Energía 2015-2030 y entrevistas a personas expertas en el desarrollo eléctrico de Costa Rica bajo la modalidad de autoconsumo o generación distribuida, como se la llama regularmente en la normativa existente. Los elementos principales que se emplean en esta investigación están relacionados con los estudios del sistema de energía renovable solo para autoconsumo, marco legal ambiental existente, análisis económico del sector de la electricidad; criterios ambientales en la toma de decisiones, beneficio percibido de la empresa y prospección ambiental sobre el futuro próximo en Costa Rica. A lo anterior se le adiciona el tema de la sostenibilidad del modelo de la agroindustria basado en la producción de energía renovable en la mitigación de emisiones de metano.

Toda la investigación se concentra en procesar los datos y usar los criterios ingenieriles y las buenas prácticas establecidas en la ingeniería para este tipo de diseños, mediante el uso de

instrumentos de cálculo y análisis propios de una investigación no experimental que facilite la recolección y la sistematización de datos que se emplean para el análisis, con lo cual se pretende diseñar las alternativas que mejor se ajusten a la solución necesaria para producir energía de fuentes no contaminantes.

CAPÍTULO 2

2. MARCO TEÓRICO

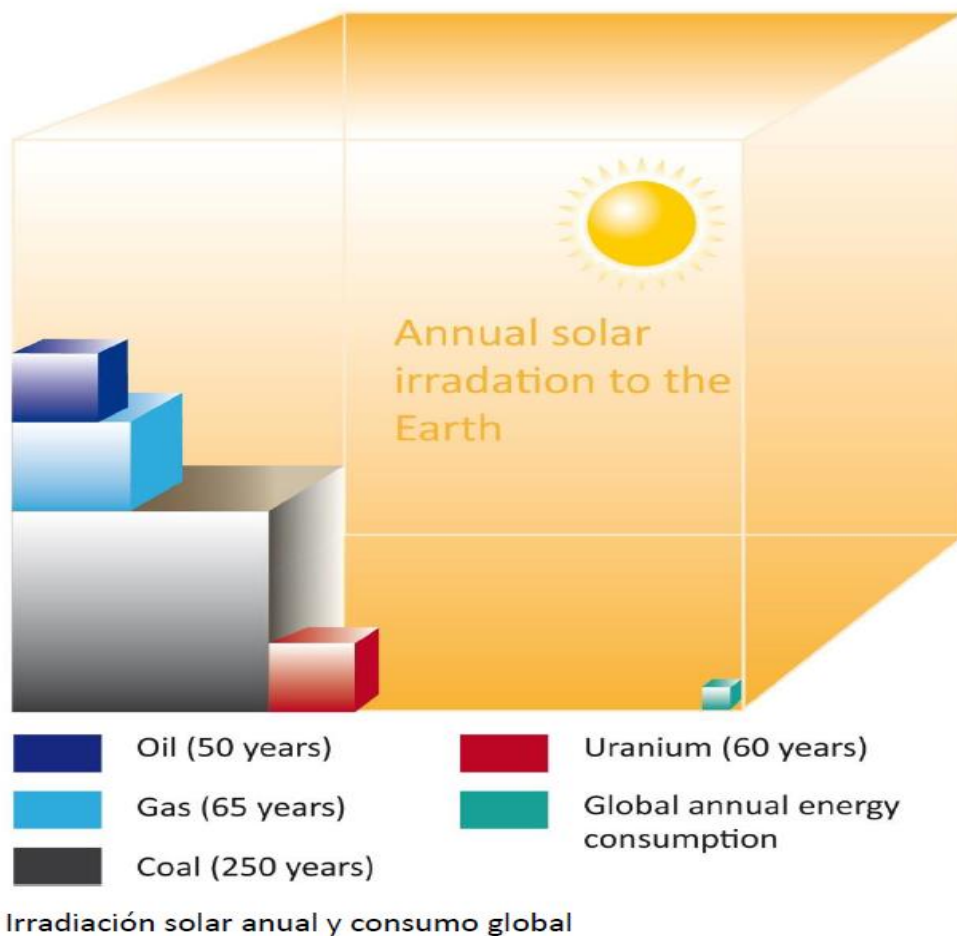
2.1. Marco situacional

Como guía general para la búsqueda de una solución de independencia energética en la actividad productiva agroindustrial de la Lechería Miravalles se procurará obtener electricidad de calidad, con continuidad y a precios competitivos. Esta planta está ubicada en la zona del volcán Miravalles, en la provincia de Guanacaste, tiene acceso (por la naturaleza de la geografía del lugar y por la actividad propia de la ganadería), en primer lugar, a la energía solar fotovoltaica disponible en la región para producir electricidad que, ocupa normalmente para sus actividades. En segundo lugar, tiene la posibilidad de usar los residuos agroindustriales de su actividad para la producción de biometano. De ambas fuentes puede posible disponer de energía y de la potencia que requiere la empresa para el proceso de producción lechera, acarreo y almacenamiento de producto en los tanques de refrigeración, para luego ser entregado a la cooperativa Dos Pinos y a otras empresas procesadoras de la leche. Esto en el caso del uso potencial del biometano que se pueda producir con biodigestores anaeróbicos al usar los residuos de lavado y recolecta de las excretas del ganado, las que tienen alto valor energético y con las cuales se puede producir biogás para sustituir el GLP, o usarlo para producir electricidad.

En primera instancia, se debe considerar el marco situacional que, para cuyas soluciones de acceso a energía en forma democratizada e ilimitada la energía solar es la energía más abundante en el planeta y está disponible en todas partes. Es la energía térmica proveniente del sol mediante la fisión nuclear y la fusión de átomos de hidrógeno en el núcleo del Sol. Esta forma energética se refleja, se difunde y se irradia en la atmósfera sobre la tierra y los mares. También la energía solar la producen los vientos, las corrientes de los mares, la evaporación, la condensación para el ciclo hidrológico y la modificación de la temperatura en el planeta. En este sentido, de acuerdo con la Academia de Energías Renovables (RENAC) de Alemania, en el siguiente diagrama se puede observar la disponibilidad de las principales formas de energía en el nivel global en comparación con otras fuentes. El consumo global de energía en un año es aproximadamente equivalente a la energía que se recibe del sol en solo una hora. Por lo tanto, se puede decir que hay más que suficiente energía solar disponible

para satisfacer todas las necesidades energéticas. Sin embargo, el desafío consiste en convertir esta energía potencialmente disponible en formas utilizables y ponerla a disposición en donde se ocupe.

Figura No.1: Disponibilidad de energía radiante en comparación con la de otras fuentes



Tomado de The Renewables Academy AG de Alemania (2017)

Esta energía proveniente del sol puede ser clasificada como de uso directo, tales como la solar térmica o la fotovoltaica o de uso indirecto, cuando la referencia es a energía eólica, hidroeléctrica o todas las formas de biomasa, desde residuos sólidos como el bagazo de la caña de azúcar hasta el biometano. Para efectos de esta investigación se considera el uso directo de la energía solar al emplearse la tecnología de sistemas fotovoltaicos (PV), que convierten la energía solar directamente en electricidad mediante el efecto fotoeléctrico.

Por otra parte, con el propósito de emplear las fuentes energéticas propias de la actividad lechera, la cual tiene en promedio 200 vacas de ordeño en forma permanente, se puede estudiar el biometano como fuente alterna y complementaria para el autoconsumo de energía, o sea, para producir electricidad o usarla como fuente de calor para la disponibilidad de agua caliente. Se sabe que la ganadería, la agricultura y la acumulación de desechos en vertederos son las principales actividades humanas que han causado la concentración de metano en la atmósfera, que aporta 20% del incremento del efecto invernadero con este gas. El metano es hasta 22 veces más potente que el dióxido de carbono, uno de los gases más potentes de efecto invernadero. Dentro de las actividades humanas de mayor generación de metano se encuentran la ganadería con 50% y el cultivo de arroz con hasta 30%. En las actividades de reproducción, crianza y lecherías se utilizan las excretas de estiércol animal que, junto con las aguas residuales del lavado, se convierten en una fuente de biometanos cada vez que se trabaja en zonas de ganado bovino, en que la digestión anaerobia para el tratamiento biológico de la materia orgánica se podría descomponer para generar biogás, que es un compuesto mayoritariamente formado por metano y dióxido de carbono, el cual es un producto aprovechable (Portafolio de Acciones de Mitigación de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero a Escala Cantonal de Costa Rica, 2017)

2.2. Antecedentes históricos de la empresa

La empresa se inició en el año 2001 como una actividad artesanal para la producción de leche; no obstante, tuvo que empezar un proceso de automatización y ajustes debido a las exigencias impuestas por la Cooperativa de Productores de Leche Dos Pinos, la empresa Monteverde y el Ministerio de Salud. El fundador de la empresa fue el señor José Alvarado Cruz, quien empezó con un sistema de ordeño de aproximadamente 30 vacas productoras, pero para poder atender los gastos que demandaba la automatización se hizo un incremento paulatino hasta alcanzar un total de 200 animales productores, que se ordeñan dos veces por día y producen actualmente casi 3.000 kilos de leche por día. El área de producción requerida es de 130 hectáreas y la propiedad actualmente funciona mediante arriendo a un tercero, quien tiene que atender los gastos, entre ellos los de electricidad, que estarían en este momento -con el incremento proyectado- en casi US\$1000/mes.

En la siguiente figura se puede apreciar una vista panorámica de la entrada a las instalaciones en donde se hacen el ordeño y el almacenamiento en sistemas de enfriamiento, y se alimentan también los animales en proceso productivo.

Figura No.2: Vista general de Agroindustria Lechera, ubicada en Guayabo de Bagaces, en las faldas del volcán Miravalles, en Guanacaste



Esta es una empresa pequeña administrada por personas que conocen el oficio de la producción de leche pero que no necesariamente tienen el conocimiento formal de la gestión de negocios. El acceso a la capacitación lo obtienen por medio de las cooperativas a las que pertenecen y, con base en ello, tratan de manejar de la forma más eficiente posible la empresa con base en tres ejes: calidad del animal, mejoramiento de pastos y control de costos de producción; entre ellos el gasto de la electricidad. No se localizaron formalmente la misión de la empresa ni la visión de la empresa, ni un organigrama formal.

La forma cómo funciona la empresa es mediante un esquema de arrendamiento, en el que la persona inquilina opera el sistema y tiene a cargo la producción y la venta de leche; por consiguiente, las ganancias son estrictamente del arrendante, quien a la vez, mediante contrato, paga a dos propietarios del inmueble un monto mensual fijo por usar las instalaciones, el uno y dos fincas de 130 hectáreas, en total, para la producción.

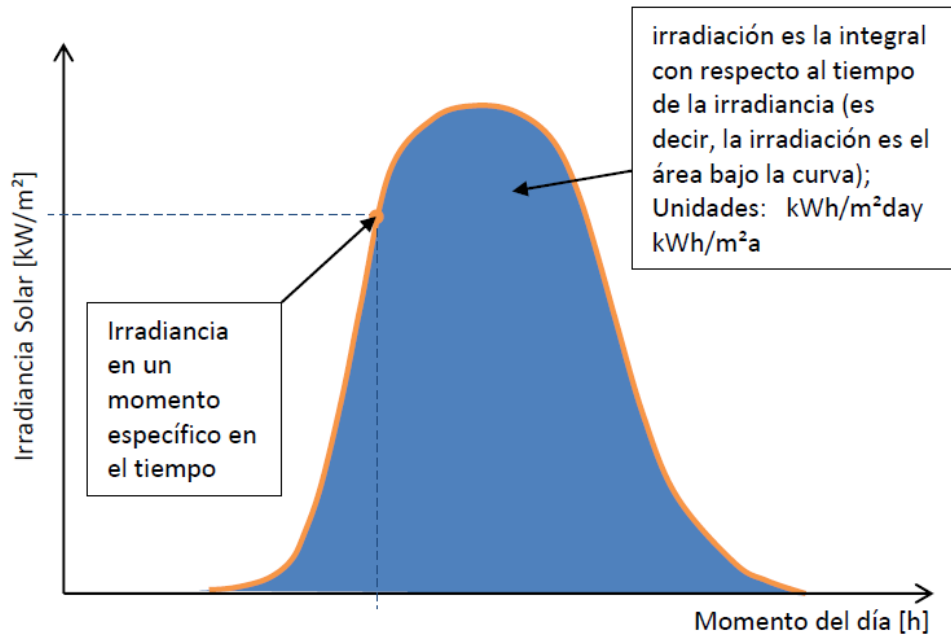
Marco conceptual o marco teórico del Objeto de Estudio.

2.2.1. Energía fotovoltaica

Empleado como marco conceptual de la investigación lo relativo al uso directo de la energía solar fotovoltaica, es necesario hacer diferencia entre los términos irradiancia solar e irradiación solar, que son utilizados en los diseños de sistemas de generación de electricidad. En primer lugar, la irradiancia solar es la potencia instantánea que se puede medir en unidades de watts o Joules/segundos, que incide sobre una superficie cualquiera sobre la tierra, y su medida generalmente se expresa en watts por metro cuadrado [W/m^2]. En un día brillante, sin nubes y soleado en cualquier parte del planeta (no se cumple en el polo norte y en el polo sur), la irradiancia solar, medida disponible de potencia, será de alrededor de $1.000 W/m^2$. Por su parte, la irradiación solar es una forma de energía (cantidad de potencia disponible en una hora) que incide sobre una superficie durante un período y se expresa generalmente en kilovatios-hora por metro cuadrado. En un día brillante, sin nubes y soleado, la irradiación solar será de entre $5 kWh/m^2$ y $8 kWh/m^2$; pero dependiendo de la zona, la latitud y las condiciones climatológicas que afecten la temperatura. En resumen, se puede decir que la irradiación solar media anual, como forma de energía disponible, variará dependiendo de la ubicación, la latitud y las condiciones climatológicas.

Para efectos del diseño de un sistema fotovoltaico uno de los parámetros más importantes es la hora solar pico (HSP), que es equivalente a $1000 Wh/m^2$, máximo que se puede obtener en un día en particular. En la siguiente figura se puede ver el esquema, en el que se ejemplifica el concepto de la integral bajo la curva, para poder ver la energía disponible máxima en un día de referencia cualquiera.

Figura No.3: Relación de irradiancia disponible en el día



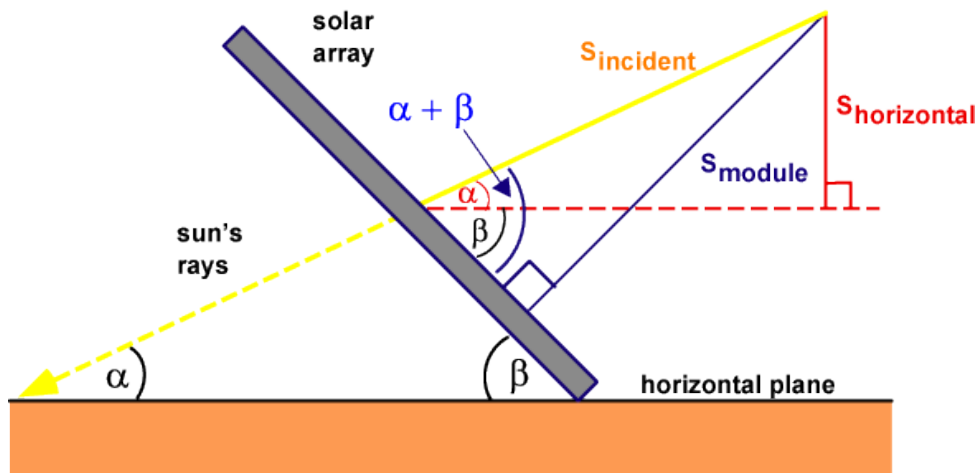
Fuente: The Renewables Academy AG de Alemania (2017)

Adicionalmente, la posibilidad de convertir la energía de los fotones en energía eléctrica depende de muchos factores, que incluyen la tecnología, el valor de la HSP y el rendimiento energético de un sistema solar optimizado mediante el ajuste de la orientación e inclinación de los módulos o celdas fotovoltaicos. Por ejemplo, la orientación óptima para una superficie en el hemisferio norte debe estar inclinada hacia el sur cuando se trata de sistemas fijos y, por el contrario, en el hemisferio sur la orientación óptima es hacia el norte cuando sean sistemas también fijos. Se pueden usar desviaciones de $\pm 30^\circ$ sin un efecto significativo en el nivel de radiación; pero aunque la radiación que incide sobre una superficie horizontal es mayor que la radiación que incide sobre una superficie vertical, esta se diseña con una inclinación que se ajuste a los automantenimientos para el lavado de los paneles.

De acuerdo con Honsberg y Bowden (2019), de la Universidad Estatal de Arizona, se determina que la potencia contenida en la luz del sol dependerá del ángulo que exista entre el módulo fotovoltaico y las incidencias de los rayos del sol en todo momento. La máxima transferencia de potencia se logra solo en aquellos casos en que exista perpendicularidad

entre la superficie y la luz del sol. Los mismos autores definen, con base en la figura No. 4, que la radiación se puede calcular sobre una superficie inclinada del módulo ($S_{\text{módulo}}$), usando la radiación solar medida en la superficie horizontal (S_{horiz}) o la medida de la radiación solar perpendicular al sol ($S_{\text{incidente}}$).

Figura No.4: Cálculo de ángulo de incidencia del panel solar



Tomado de Photovoltaics Education Website (2019)

Tomando en cuenta los factores geométricos, se recomienda emplear las ecuaciones que relacionan $S_{\text{módulo}}$, S_{horiz} y $S_{\text{incidente}}$, como sigue:

$$S_{\text{horizontal}} = S_{\text{incidente}} \sin \alpha$$

$$S_{\text{module}} = S_{\text{incidente}} \sin(\alpha + \beta)$$

En que α es el ángulo de elevación y β es el ángulo de inclinación del módulo medido desde la posición horizontal.

El ángulo de elevación se calcula como:

$$\alpha = 90 - \phi + \delta$$

En que ϕ es la latitud y δ es el ángulo de declinación previamente dado como:

$$\delta = 23.45^\circ \sin\left[\frac{360}{365}(284 + d)\right]$$

En que d es el día del año y, relacionando con las ecuaciones anteriores, se define la superficie del módulo debe ajustarse según la siguiente ecuación:

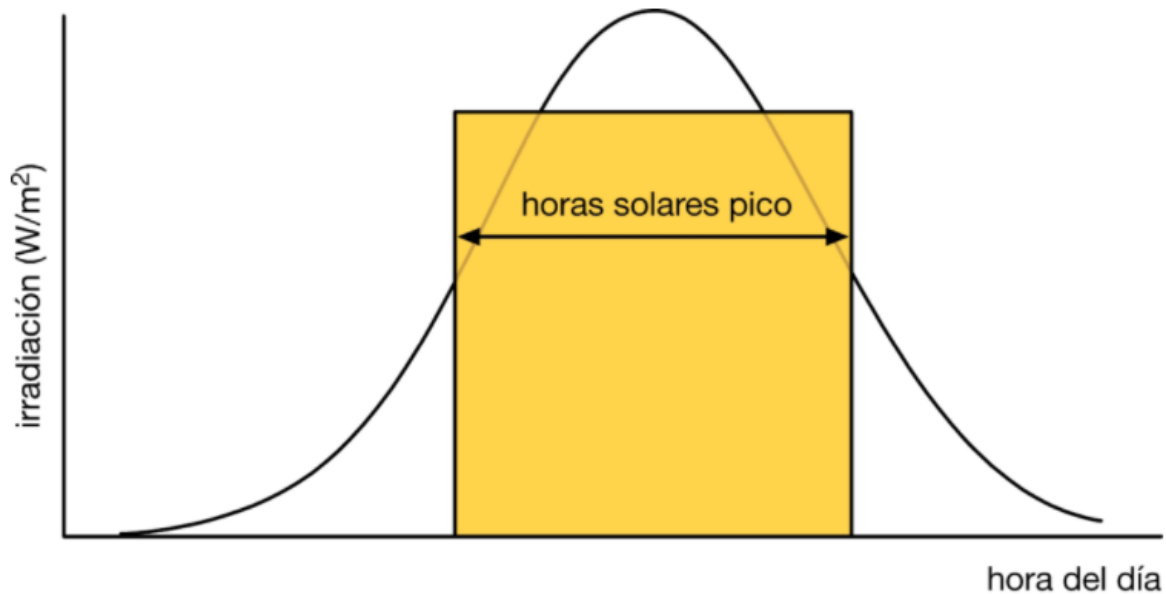
$$S_{module} = \frac{S_{horizontal} \sin(\alpha + \beta)}{\sin \alpha}$$

De acuerdo con la información de diferentes fuentes, se debe considerar que el nuestro planeta gira alrededor de su propio eje norte-sur, con una “oscilación” conocida con el nombre de precesión, que se puede equipar a los 23,5°. Al mismo tiempo, el planeta gira alrededor del Sol en una órbita con forma elíptica. Debido a su precesión, la radiación solar en el hemisferio norte es más alta en junio que en diciembre, y viceversa para el hemisferio sur. Este problema no se presenta, en el caso de Costa Rica, en forma pronunciada por la cercanía a los trópicos, lo que hace que la variación sea muy pequeña y no se registren grandes cambios en la disponibilidad de energía radiante.

2.2.2. Cálculo de la hora solar pico HSP y rendimiento energético

Para efectos de calcular el rendimiento energético se deben considerar, en primera instancia, la hora solar pico (PSH), que corresponde a un caso imaginario, en el que el sol ofrece una irradiancia constante de 1,000 W/m² durante una hora, tal como se ve en la siguiente figura:

Figura No.5: Representación gráfica de la energía de la hora solar pico (HSP)



Tomado de [https://desconectados.es/que-es-la-hora-solar-pico-hsp/\(s.f.\)](https://desconectados.es/que-es-la-hora-solar-pico-hsp/(s.f.))

El cálculo de la hora solar pico (HSP) depende de las mediciones y de la información disponible del área por analizar en donde se instalarán los sistemas solares fotovoltaicos. Para efectos de esta investigación, sin pretender entrar en aspectos metodológicos de acceso a los datos, se trabajará con información de mapas solares e información de la planta Miravalles propiedad del ICE, en donde tienen datos de las curvas diarias de radiación solar. En cuanto al rendimiento energético, entonces, se puede usar la siguiente ecuación para estimar la electricidad que se podría obtener de una instalación fotovoltaica:

$$E = PSH \times PPeak \times PR$$

En que,

- E: Rendimiento energético de la planta FV en un período (se puede usar un año) [kWh/año]
- PSH: Horas solares pico en el lugar de la planta FV en el mismo período [h/año]
- Ppico: Potencial nominal pico de la planta FV [kWp]
- PR: Índice de rendimiento de la planta FV, normalmente de entre 0,65 y 0,85

2.2.3. Modos de interacción con la red de servicio público

En el caso de Costa Rica, la normativa por la que se rigen estos desarrollos es el Decreto Ejecutivo N.º39220-MINAE que regula, junto con la Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos, la interconexión de los sistemas de generación propia, la carga y la red de la empresa prestadora de los servicios de electricidad. En general, en la literatura se muestran dos categorías de sistemas fotovoltaicos conectados a la red que pueden alimentar en diferentes niveles de voltaje de red, Los sistemas aislados o autónomos con o sin baterías para el almacenamiento de electricidad, o integrados a la red eléctrica usando esta como batería virtual.

El decreto que regula la actividad en el país fue publicado en el año 2016 y tiene como objetivo fundamental en su artículo 1º: “Regular la actividad de generación distribuida para autoconsumo con fuentes renovables utilizando el modelo contractual de medición neta sencilla, de forma que su implementación contribuya con el modelo eléctrico del país, y se asegure la prestación óptima del servicio de suministro eléctrico que se brinda a todos los abonados” (MINAE, 2016). También declara de interés público la actividad de la generación distribuida para autoconsumo, como un instrumento para promover la generación de electricidad haciendo uso de fuentes de energía renovable, y para contribuir con el cumplimiento de la meta establecida por el país de ser carbono neutral, lo que hace necesaria, desde el punto de vista legal, la implementación de cualquier sistema fotovoltaico en la medida de que se ocupa este proyecto; eso sí, sujeta a la viabilidad técnica y económica.

En la siguiente figura se observan la forma estándar generalizada de las instalaciones fotovoltaicas y su interacción con la red de la empresa de servicio público.

Figura No.6: Esquema interconectado a la red



Tomado de: Energía Eléctrica Fotovoltaica ALTEC (2020)

En general, los sistemas distribuidos son construidos en edificios residenciales, comerciales o industriales. Los sistemas en edificios residenciales son generalmente pequeños sistemas instalados en las azoteas que generan electricidad para el consumo privado o para la venta a la empresa de servicios públicos. Los sistemas en techos comerciales o industriales también se utilizan ya sea para compensar el consumo de electricidad en el lugar o para vender la electricidad a la empresa de servicios públicos.

Además, se usan dos modelos, por ejemplo, los sistemas de generación virtual, en los que la energía se produce en un sitio diferente de aquel en el que se consume, y los sistemas fotovoltaicos centralizados, que también son conocidos como granjas solares, parques solares o sistemas integrados en escala comercial. Ambos tipos no se consideran en la presente investigación, dado que su aplicación no está orientada a obtener energía de autoconsumo en pequeña escala.

En todos los sistemas conectados a la red el arreglo fotovoltaico genera electricidad en DC y está conectado por medio de las cajas de conexión a un inversor, que convierte la corriente continua (DC) en corriente alterna (AC). La salida del inversor está conectada a un medidor que registra la cantidad de energía que está siendo alimentada de la red. Mientras los sistemas aislados no estén conectados a la red eléctrica la electricidad producida se consume muy cerca del lugar en donde se genera. Los sistemas aislados suelen incorporar almacenamiento en baterías para que la electricidad pueda ser suministrada cuando no se tiene la fuente solar brillando. En el esquema siguiente se presenta la configuración típica empleada en un sistema *Off grid*.

Figura No.7: Esquema no interconectado a la red



Tomado de Solar light de CR (2021)

2.2.4. Tipos de celdas

La celda es el componente central de un sistema fotovoltaico, ya que en él se genera la electricidad. En el mercado se emplean diferentes tipos de celdas que responden básicamente al precio y no tanto a la eficiencia energética. A pesar de que existen muchos tipos de tecnologías, el mercado está dominado por celdas fotovoltaicas a base de silicio cristalino (c-Si). Se estima que casi 80% de las celdas en el mercado se fabrican a base de c-Si, o sea, monocristalino o policristalino. También existen en el mercado módulos de capa fina (silicio amorfo, CdTe y CIGS) y otras tecnologías emergentes de mayor eficiencia, tal como la celda fotovoltaica concentrada (CPV), que aún tiene altos costos de producción. De acuerdo con *Efficiency for Energy* de España (2020), las celdas más utilizadas en el mercado tienen las siguientes características:

Silicio monocristalino

- Presenta mayores rendimientos en comparación con otras tecnologías.
- Rendimiento probado en condiciones de laboratorio de entre 18 % y 25 %.
- Está formado por un único cristal de silicio con estructura muy uniforme.
- Material de alta pureza que garantiza un rendimiento superior al del resto de tecnologías.
- Contiene átomos de silicio perfectamente alineados para facilitar conductividad.
- Se han incrementado sus ventas en los años recientes, y su precio se acerca a los sistemas policristalinos.
- Requieren mayor consumo de energía en el momento de la fabricación.
- Su proceso de fabricación es lento con respecto al de otras tecnologías.

Silicio policristalino

- Menor rendimiento con respecto al de la tecnología de monocristalinos.
- Rendimiento probado en condiciones de laboratorio de entre 16 % y 20 %
- Está formado por muchos cristales de silicio.
- Proceso de fabricación más económico que el de otras tecnologías para consumir menor cantidad de energía en la manufactura.

- Tiene la desventaja de que el rendimiento cae abruptamente cuando baja la radiación solar.

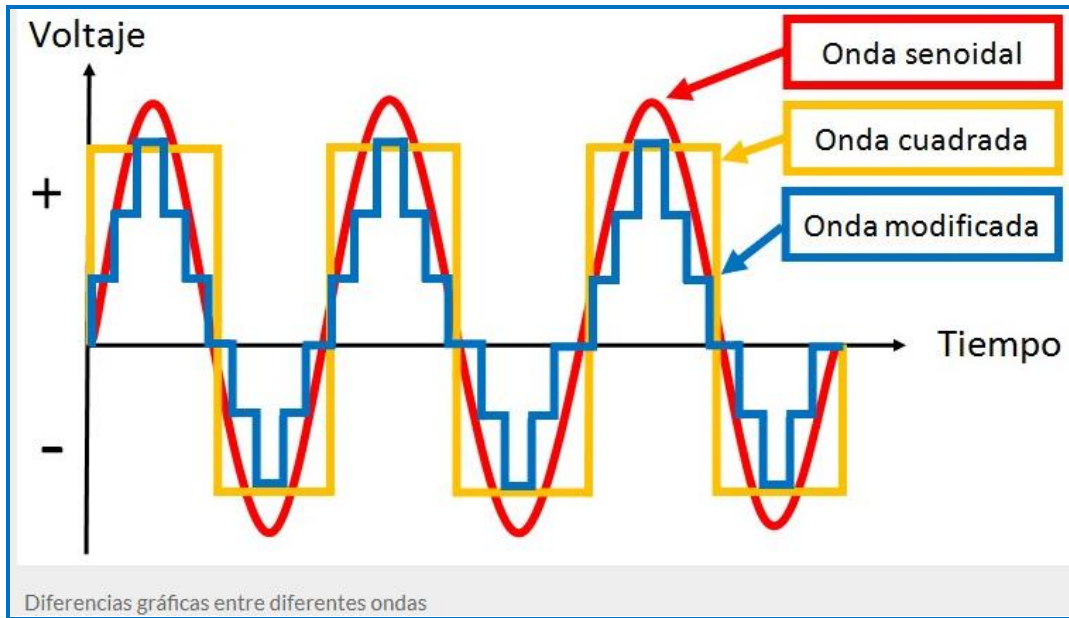
Amorfos

- Se fabrican al depositar una película muy fina de silicio en forma de vapor encima de una superficie de acero.
- Tiene menor potencia, por lo que se ocupa mayor área que la del resto de las placas solares para conseguir la misma potencia.
- Es una fotocelda más barata al compararla con las anteriores.
- Paneles con proceso de fabricación más sencillo y económico que el de los cristalinos.
- Eficiencia de entre 10 % y 15 %.
- Tienden a tener una menor vida útil.

2.2.5. Los inversores

Para que los inversores de potencia de corriente directa a corriente alternan funcionen correctamente para los sistemas fotovoltaico, se recomienda el inversor de onda pura, y no usar sistemas que producen ondas modificadas, ya que en algunos casos los equipos pueden no funcionar adecuadamente. Incluso, algunos dispositivos electrónicos muy sensibles pueden llegar a dañarse si la onda no tiene los parámetros adecuados de voltaje y corriente efectiva, ya que se encuentran en ondas sinusoidales puras. Por ello se requiere el inversor de corriente de onda senoidal pura muy parecida (por no decir igual) a una salida teórico-matemática de onda, para lograr los sincronismos con la red pública, y para que pueda conectarse a cualquier carga eléctrica, como equipos electrónicos sensibles, electrodomésticos, máquinas con motores, etc. En la siguiente figura se pueden apreciar las diferentes ondas de salida AC que se encuentran en los equipos comerciales.

Figura No. 8: Ondas de salida de inversores comerciales



Tomado de la página comercial Generatuluz (2021)

Los inversores pueden clasificarse en tres grandes grupos dependiendo del tipo de sistema fotovoltaico al cual serán conectados. Los hay conectados a la red, conectados a la red con respaldo de baterías e inversores para sistemas aislados. Los inversores más comunes en aplicaciones residenciales y comerciales, debido a la alta fidelidad, son los que emulan la onda sinusoidal de la red eléctrica. Uno de los métodos más confiables para lograr una onda sinusoidal casi perfecta es por medio de moduladores por ancho de pulso (PWM). La ventaja que tienen estos inversores es la posibilidad de modificar el ángulo de la función sinusoidal, para así sincronizar la señal de salida del inversor con los parámetros de la red pública del proveedor de servicios eléctricos, ya que en el caso de Costa Rica la señal de salida debe ser de 240V a 60Hz, los cuales son utilizados en sistemas conectados a la red. Estos inversores se pueden encontrar de varios tamaños, y es normal que se refieran a microinversores que están conectados directamente a un módulo PV cuando se trata de potencia de hasta 300 W. Según la Academia de Energía Renovable de Alemania los inversores de cadena que están conectados a una o a unas pocas cadenas de módulos pueden generar arreglos híbridos en serie y paralelo para ajustarse a condiciones de voltaje, potencia y corriente, según los requisitos del diseño.

Figura No.9. Ejemplo de inversores para sistemas fotovoltaicos



Tomado de Sol, Viento y Agua: Fuentes de Energía de Perú (2021)

2.2.6. Estructuras de montaje

Aunque no es parte del alcance de esta investigación el diseño de la estructura de montaje de los sistemas fotovoltaicos, vale la pena mencionar los arreglos más importantes que se hacen en las soluciones para producción de energía eléctrica. La Academia de Energía Renovables, RENAC (2017), explica que los requisitos fundamentales de las estructuras de montaje son para soportar el peso de los módulos, que en el caso de esta investigación serán útiles para comparar el peso total de las soluciones con base en celdas policristalinas y monocristalinas, y, dependiendo del peso, se determinará si la estructura actual del techo es capaz de soportar las toneladas de carga adicional necesarias para instalar los sistemas fotovoltaicos. Esta misma academia indica que la estructura puede estar construida de aluminio o de acero galvanizado. Se recomienda, adicionalmente, que los sistemas tengan el aterrizamiento correcto para el control de flujos inversos de corriente y protección contra descargas atmosféricas (rayería).

En la siguiente figura se puede apreciar el ejemplo de un sistema de estructura independiente compuesto por las diferentes estructuras de montaje disponibles en el mercado para los sistemas fotovoltaicos. También se muestran los sistemas de azotea, que incluyen techos

inclinados, techos integrados y cubiertas planas; el sistema de fachadas de edificios (poco usado en Costa Rica) y los sistemas de áreas abiertas, conocidos como estructuras de montaje a nivel de suelo (de sujeción independiente, sin seguimiento o con sistemas automáticos para seguir la inclinación del sol).

Figura No. 10. Ejemplo de estructuras para sistemas FV



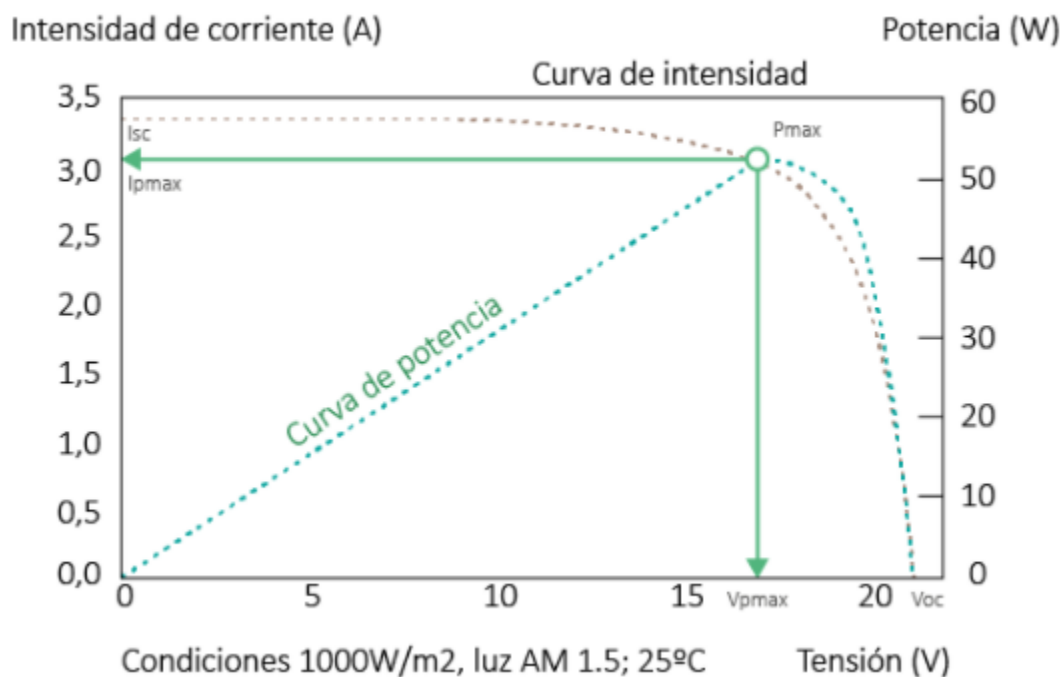
Fijación de estructura al suelo, de acero galvanizado, vista frontal y trasera.

Fuente: RENAC de Alemania (2017)

2.2.7. Características eléctricas de salida de los paneles

La curva corriente y el voltaje para determinar la potencia activa de un sistema describe una importante característica eléctrica de una celda en el momento de diseñar la capacidad del sistema de generación. En un momento dado una celda FV está operando con una corriente y un voltaje específico que se encuentra a lo largo de su curva I-V, tal como se puede apreciar en la figura No. 6). Esta línea muestra la corriente I que se produce en un intervalo de voltajes. La corriente de corto circuito (ISC) representa la corriente máxima cuando el diferencial de potencial es igual a cero. El voltaje de circuito abierto (VOC) representa el voltaje máximo cuando la corriente es igual a cero.

Figura No. 11. Relación I/V para la curva de potencia en un panel solar



Tomado del blog Autosolar de España (2018)

Al incrementar la irradiancia la corriente también cambia producto de un aumento en el nivel del efecto fotoeléctrico. El voltaje de salida de la fotocelda varía solo ligeramente con el cambio en la irradiancia en la superficie. De esto se deduce que cuando el sol ilumina la superficie de la celda/módulo, el voltaje se eleva a un valor que está cerca del voltaje de circuito abierto, denominado por sus siglas en inglés VOC. A ese fenómeno, que se presenta cuando la corriente producida por el efecto fotoeléctrico en una celda solar, se le conoce como fotocorriente, el cual se presenta cuando el paso de sombras por nubes u otras sombras sobre una celda provoca entonces una caída en la corriente de salida. Debido a que “la corriente es directamente proporcional a la potencia, el sombreado tiene un efecto significativo sobre la potencia de salida” (RENAC, 2017)

2.2.8. El biometano como fuente energética

El inminente cambio climático del planeta, que ha venido generando hechos nunca vistos en la época reciente, como el derretimiento de glaciares, el aumento del nivel del mar, la destrucción o la sequía de selvas, y la destrucción de la flora y la fauna, entre otros, hacen que sea necesaria la búsqueda de enfoques sostenibles en las actividades productivas, especialmente en la agroindustria, en la cual la ganadería tiene un alto impacto en la producción de metano, que provoca parte importante de las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera.

El gas metano tiene dos principales fuentes de emisión, la primera de manera natural y la segunda de origen antropogénico, es decir, creada por el hombre.

Como consecuencia de las actividades humanas, según la Fundación de Vida Sostenible (2016), en las últimas décadas la concentración de metano en la atmósfera se ha incrementado hasta en 1% por año. Una de las actividades humanas más importantes en la generación de metano es la ganadería, debido a que los rumiantes emiten grandes cantidades de este gas. Por lo tanto, una opción para reducir dichas emisiones en esta actividad es convertir los residuos animales en biocombustible.

Por otra parte, ante este panorama se tiene el biometano, que es el gas producido naturalmente por la fermentación anaeróbica (en ausencia del aire) del estiércol y de otras materias orgánicas que se convierten en un biodigestor. Debido a sus características, este puede ser utilizado para la generación de energía eléctrica y calor. De la misma manera, la materia orgánica descompuesta sobrante en el biodigestor puede ser utilizada como un fertilizante orgánico de alta calidad, que sustituya los fertilizantes químicos convencionales.

Además, gracias a la composición química y al poder energético de este, es posible la sustitución de gases convencionales de origen fósil por biometano. Asimismo, con el debido tratamiento del biogás puede cumplir la función de combustible para vehículos motorizados y otras máquinas. En consecuencia, siempre es posible analizar el potencial del gas metano producido de biomasa húmeda, como fuente energética que contribuya mejorar con el ambiente y el desarrollo sostenible de la humanidad, sobre todo si se toma en cuenta la tecnología existente en la actualidad.

De acuerdo con la Asociación Española del Biogás (2021), el biometano puede producirse a partir de la depuración y el tratamiento; pero sobre todo captura del biogás generado por digestión anaerobia; o bien, por gasificación de la biomasa. El biogás se puede generar de una amplia variedad de sustratos, ya que puede originarse a partir de desechos biológicos, tales como residuos agrícolas (paja, cultivos intermedios, estiércol, etc.); cultivos energéticos, lodos de aguas residuales, y residuos orgánicos domésticos e industriales. El biogás lo produce una bacteria mediante la digestión anaerobia (AD) de sustratos orgánicos en ausencia de oxígeno. La composición química del biogás no tratado es de 50% y hasta 75% de metano (CH₄), de 25% a 50% de dióxido de carbono (CO₂), y el resto está compuesto por vapor de agua (H₂O), trazas de oxígeno (O₂), nitrógeno (N₂) y ácido sulfhídrico (SH₂). La Asociación Española indica que la composición química y el poder energético del biometano es semejante al del gas natural; en consecuencia, este puede utilizarse como sustituto del GLP o gas natural, o sea, para combustible de calderas, combustible de vehículos o para producir energía eléctrica. Las propiedades del biometano se resumen en la siguiente figura:

Tabla No.1: Características del biogás

Composición	55 – 70% metano (CH ₄) 30 – 45% dióxido de carbono (CO ₂) Trazas de otros gases
Contenido energético	6.0 – 6.5 kW h m ⁻³
Equivalente de combustible	0.60 – 0.65 L petróleo/m ³ biogás
Límite de explosión	6 – 12 % de biogás en el aire
Temperatura de ignición	650 – 750°C (con el contenido de CH ₄ mencionado)
Presión crítica	74 – 88 atm
Temperatura crítica	-82.5°C
Densidad normal	1.2 kg m ⁻³
Olor	Huevo podrido (el olor del biogás desulfurado es imperceptible)
Masa molar	16.043 kg kmol ⁻¹

Fuente: Deublein y Steinhäuser (2008)

La clave para la producción de biogás a partir de los residuos agroindustriales, como en el caso de la producción de leche vacuna que se estudia en la presente investigación, son el proceso biológico y las reacciones bioquímicas que se producen, y por la cantidad de microorganismos implicados que degradan el material. Una parte de este se convierte en biogás, el cual resulta en una mezcla de metano (CH_4) y de dióxido de carbono (CO_2). La tecnología más común en fincas de ganadería, sea lechera, de carne o de doble propósito, es la captura de los residuos y utilizar un biodigestor para obtener el biometano. Este tipo de equipos se pueden ver en la siguiente figura, en la que se aprecia un sistema típico para pequeñas fincas:

Figura No. 12: Ejemplo de biodigestor



Tomado del Agronegocios de Colombia (2021)

2.2.9. Algunos requisitos para la producción de biogás

Para la producción de biogás se emplean los procesos bacterianos de la digestión anaeróbica, que requiere hasta 45 días de retardo para empezar la producción de biometano. La cantidad de materia orgánica necesaria para la producción de biogás se puede obtener de muchas

fuentes, tales como residuos de origen vegetal, animal, agroindustrial, forestal, o doméstica, entre otros. En el caso de la presente investigación se puede ver que los residuos de origen animal pueden producir biogás, como se observa en la siguiente tabla de equivalencias de excreta y su potencial de generación de gas.

Tabla No.2: Producción de biogás con residuo animal

Estiércol	Disponibilidad Kg/día*	Relación C/N	Volumen de biogás	
			m ³ /kg húmedo	m ³ /día/año
Bovino (500 kg)	10.00	25:1	0.04	0.400
Porcino (50 kg)	2.25	13:1	0.06	0.135
Aves (2 kg)	0.18	19:1	0.08	0.014
Ovino (32 kg)	1.50	35:1	0.05	0.075
Caprino (50 kg)	2.00	40:1	0.05	0.100
Equino (450 kg)	10.00	50:1	0.04	0.400
Conejo (3 kg)	0.35	13:1	0.06	0.021
Excretas humanas	0.40	3:1	0.06	0.025

Fuente. Fuente: Varnero y Arellano (1991)

Generalmente se obtiene un biogás con 60% - 80% de metano y con un poder calorífico aproximado de 6.0 a 6.5 kWh/m³, que es posible utilizar en diversas aplicaciones, como en iluminación, en generación de energía y calor, o en calderas o equipos de refrigeración. El rendimiento energético del biogás depende de los equipos que se vayan a utilizar.

2.2.10. Generación de energía eléctrica

La energía eléctrica a partir de biogás es “energía verde”, por lo cual se considera una energía renovable. De los mejores propósitos que tiene el biogás la generación de energía es la más importante; sin embargo, se deben considerar los rendimientos de conversión del gas en energía, las potencias requeridas y la disposición del combustible. Por lo tanto, estos deben ser analizados caso por caso. Conforme con el estudio realizado por el Banco Interamericano de Desarrollo, denominado Una Presentación sobre la Generación de electricidad a partir de biogás capturado de residuos sólidos urbanos (2017), existen varias aplicaciones importantes

del biogás como sustituto de combustibles gaseosos para sistemas de generación de calor. Se puede usar para reemplazar gas natural, GLP o incluso hidrógeno, tal como se puede apreciar en la siguiente tabla, en la que se hace la comparación también de sus equivalencias del valor calórico.

Tabla No. 3: Energía equivalente del biogás
Energía equivalente (Valor Energético) Biogás Vs. otras fuentes

Valores	Biogás*	Gas Natural	Gas Propano	Gas Metano	Hidrog.
Valor Calorífico (Kwh/ m ³)	7.0	10	26	10	3
Densidad (t/m ³)	1.08	0.7	2.01	0.72	0.09
Densidad con respecto al aire	0.81	0.54	1.51	0.55	0.07
Limite de explosión (% de gas en el aire)	6-12	5-15	2-10	5-15	4-80
Temperatura de encendido	687	650	470	650	585
Máxima velocidad de encendido en el aire (m/s)	0.31	0.39	0.42	0.47	0.43
Requerimiento teórico de aire (m ³ /m ³)	6.6	9.5	23.9	9.5	2.4

* Composición promedio del biogás: CH₄ (65%) – CO₂ (35%)

Fuente: Manual de Biogás MINENERGÍA/PNUD/FAO/GEF (2011)

Factores de la generación de energía eléctrica a partir de biogás

Para transformar la materia orgánica en energía eléctrica existen dos métodos:

- La combustión de la biomasa para generar un fluido (vapor) en el que su capacidad térmica es transformada en energía mecánica mediante una turbina.
- La transformación de biomasa a partir procesos bioquímicos (biogás) o termoquímicos (pirólisis, gasificación). Se modifica en un combustible el cual puede ser utilizado en motores o en turbinas de gas.

En la práctica diaria se emplean motores de combustión interna del tipo reciprocantes, así como turbinas y microturbinas. Es esta última la que se emplea en pequeña escala. Hay que considerar que existe una restricción real con respecto al uso de estas tecnologías para el uso del biogás en pequeña escala, dado que algunas están en fase experimental. Por ejemplo,

los motores *Stirling*, los equipos de ciclo orgánico *Rankine* y las celdas de combustible están aún en una fase de desarrollo y demostración. El principal escollo por superar, en general, está relacionado con la eficiencia de conversión de energía química a eléctrica, según lo indica el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) en su presentación sobre la generación de electricidad a partir de biogás capturado de residuos sólidos urbanos, un análisis teórico-práctico (2017). En cuanto a los equipos más utilizados, están los motores recíprocos de combustión interna debido a su incremento eficiente energéticamente hablando, si se coteja con las turbinas de gas y las microturbinas. Adicionalmente, estos motores tienen menor costo por cada W de potencia instalado que se consigue en el mercado. No obstante, la eficiencia de estos motores no sobrepasa 35%, debido a las pérdidas de calor residual, según lo indica el especialista Gabriel Blanco del BID, quien agrega que si los costos de electricidad son bajos la rentabilidad de los desarrollos de plantas con biogás resulta marginal. Se podrían justificar cuando la potencia sea de 0.8 MW y 3 MW, con flujos de 8 a 30 m³/min de biometano. Un ejemplo de estos equipos se puede apreciar en la siguiente figura:

Figura No. 13: Ejemplo de un motor para biogás



GE Jenbacher Type 2 Gas Engine

Fuente: <https://powergen.gepower.com/products/reciprocating-engines/jenbacher-type-2.html>

Para el presente caso se deben empezar a determinar los volúmenes de gas que se pueden recuperar en la empresa. Con ello se puede dimensionar el uso de microturbinas con recuperación de hasta 8 m³/min, con contenidos de metano de al menos 35%. El biogás tiene la particularidad de que se requiere tratamiento previo del gas para remover siloxanos, humedad y material particulado antes de usarse como combustible. Estos equipos se

encuentran en el mercado en tamaños de 30, 70 y 250 kW; en tamaños medianos, pero también se pueden encontrar desde los 600 watts para caudales pequeños a los que se les incorpora un recuperador que precaliente el aire de combustión.

Para cualquier desarrollo de plantas productoras de energía eléctrica a partir del biometano se considera si el escenario es de baja, media o alta disponibilidad de metano. Para ello en las fuentes consultadas que se han mencionado en este apartado se propone usar la siguiente ecuación:

$$\text{Potencia disponible [kW]} = \eta_t * \text{PCI}_{\text{biogás}} * Q_{\text{biogás}}$$

En que:

η_t : rendimiento térmico de la generación eléctrica. Asume valores de 25%, 33% y 40% para los escenarios bajo, medio y alto, respectivamente.

$\text{PCI}_{\text{biogás}}$: poder calorífico inferior del biogás: se asume 5 kWh/m^3

$Q_{\text{biogás}}$: caudal de biogás capturado ($\text{m}^3 \text{ CH}_4/\text{hora}$).

Por último, es necesario tener en cuenta que el caudal capturado de biogás depende de la fuente de producción disponible, y que para el caso presente se tienen parámetros establecidos en estudios previos, que indican que un bobino lechero puede producir materia prima según lo que sugiere la FAO. Adicionalmente, es importante agregar que la producción de biometano a partir de la materia prima mencionada sería de $0.16 \text{ m}^3/\text{h}$, lo que equivale a $0.11 \text{ m}^3/\text{h}/\text{animal}$ de metano producido, dato que se emplearía como entrada de diseño para el presente trabajo.

Limitaciones y alcances

El trabajo parte de información y estudios de normativa comparada para extrapolar algunos de los datos relevantes de los cálculos, debido a la limitación de estudios similares en Costa Rica. Adicionalmente, el alcance está enfocado en determinar el dimensionamiento general de los sistemas de suministro de energía; por consiguiente, el alcance de la investigación no incluye los diseños para instalación, construcción y puesta en marcha de los sistemas de generación de electricidad.

CAPÍTULO 3

3. Determinación del potencial de energía disponible

Para efectos de la investigación se propone ahondar en el análisis de dos fuentes principales como solución para la independencia energética de la empresa. Para eso se trabajaría en determinar el potencial de irradiancia solar y la disponibilidad de biogás, dado que ambos recursos están disponibles en la zona. Se descarta el uso de minicentrales hidráulicas debido a que la fuente no está disponible en sitios cercanos a la zona y, por otro lado, a pesar de existir buena cantidad de viento, esta fuente también se descarta porque los generadores basados en sistema mini-eólicos no son una tecnología que se use en abundancia en el país y, además, el ruido que generan las hélices afecta la tranquilidad de los animales en el momento de la producción, si estas están muy cerca del sitio de producción lechera. Lo anterior se refuerza con el hecho de que, según se desprende de los informes de la Dirección de Energía del MINAE, al día de hoy los sistemas de generación distribuidos que más se han desarrollado en Costa Rica con el solar y la biomasa.

Tal como se puede ver en la siguiente tabla, se tiene que la energía solar predomina en las instalaciones de generación distribuida con 91,61 % y la eólica no llega ni a 1 % de los más de 2000 sistemas registrados en la actualidad.

Tabla No. 4. Resumen de las plantas de generación distribuida en Costa Rica

Generación distribuida en Costa Rica		
Fuente	Potencia MW	Porcentaje
Solar	62633,6	91,61%
Biomasa	5259,2	7,69%
Hídrica	469,6	0,69%
Eólica	5,2	0,01%
Total	68367,6	

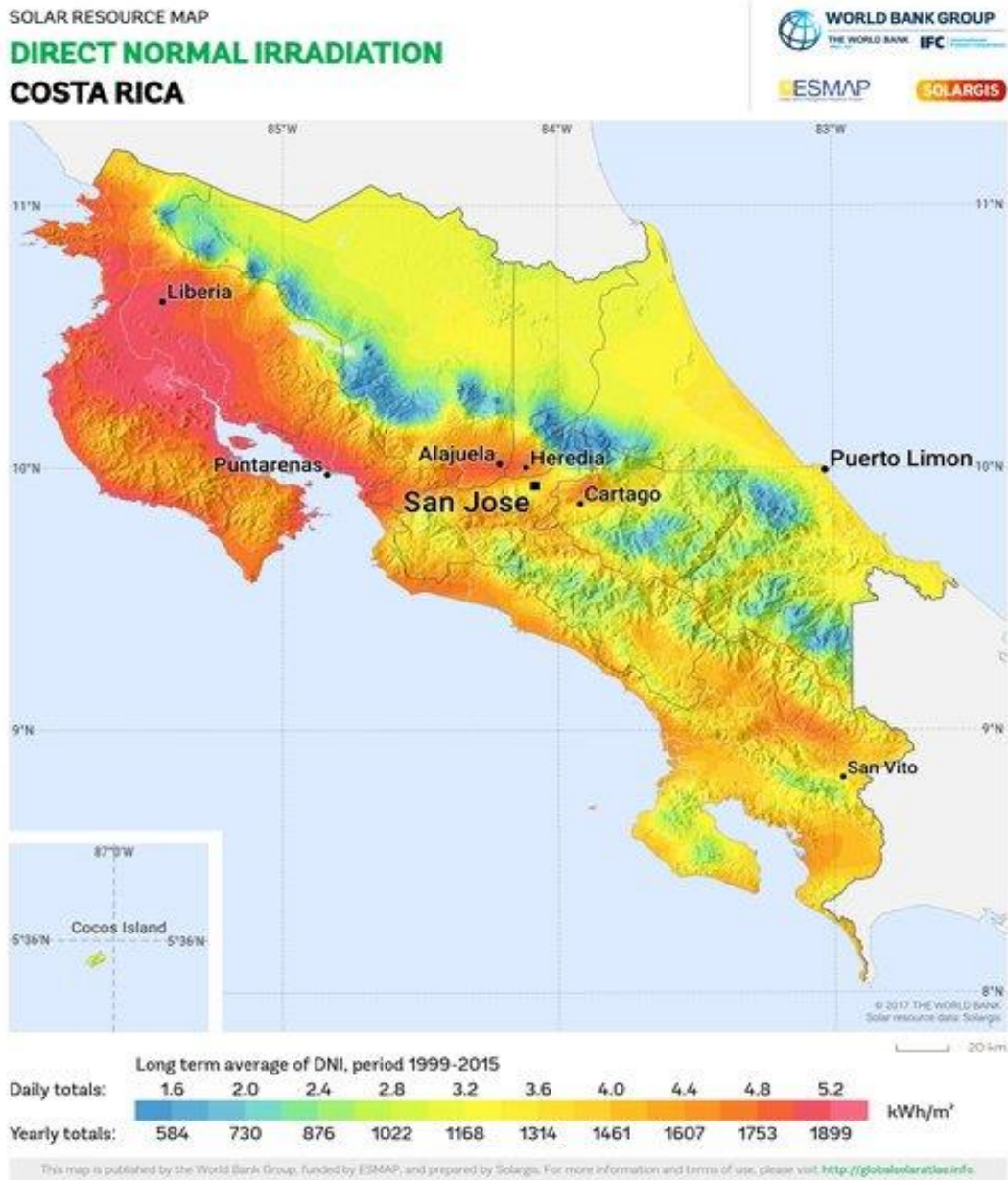
Elaboración con datos de la Dirección de Energía MINAE (2021)

3.1. Irradiancia solar

Para iniciar el análisis hay que considerar la ubicación geográfica de Costa Rica está en el hemisferio Norte entre $8^{\circ} 15' - 11^{\circ} 00' N$ y $83^{\circ} 30' - 86^{\circ} 00' W$. Al estar en una zona tropical no sufre variaciones drásticas en su clima ni en el ángulo de incidencia de los rayos del sol, los cuales son un factor determinante en el momento de calcular la cantidad de energía diaria de que se dispone para aprovecharla para la producción de electricidad. Los datos de este tipo para el cálculo de la irradiancia útil en la actualidad están bajo la responsabilidad del Instituto Meteorológico Nacional (IMN), el cual es una dirección adscrita al Ministro de Ambiente y Energía, como institución de enfoque científico a cargo de toda actividad meteorológica en Costa Rica y en la región, inclusive; pero también existen otras instituciones, como el ICE y asociaciones como ASESOLAR, que suministran información oficial sobre irradiación directa para efectos de cálculos y dimensionamientos de sistemas de generación eléctrica fotovoltaica, que también trabajan en coordinación con el IMN. Para efectos de esta investigación se emplean mapas de radiación solar en Costa Rica generados por la empresa Solargis, en cooperación con el Banco Mundial, que ha creado estos instrumentos para el país, tal como observa en la figura 14.

El mapa solar siguiente muestra el dato de la energía solar estimada disponible para generación eléctrica. En él se puede determinar el promedio diario de la irradiación global horizontal (GHI). Son datos calculados para un periodo de 20 años (del año 1999 al 2018). Además, se puede determinar de la información brindada que existe una producción anual por metro cuadrado en el nivel de la superficie que puede oscilar entre 1607 y 1753 kWh/m². Este tipo de herramienta tienen la ventaja de que permite al diseñador hacer cálculos bastante precisos, sin tener que recurrir a mediciones por cuenta propia por grandes cantidades de tiempo. A la vez, este tipo de mediciones tiene costos importantes que deben ser suplidos por los desarrolladores de proyectos, lo cual se podría justificar en proyectos comerciales que tengan el objetivo de producir energía para vender a alguna de las empresas distribuidoras. Pero no es el caso que se aplique para soluciones de autoconsumo porque podría comprometer la rentabilidad financiera de pequeñas empresas, como es el caso de esta investigación.

Figura No. 14. Irradiación solar directa en Costa Rica



Fuente: SOLAGIS/BM (2017)

Como datos útiles de la presente investigación cabe indicar que la empresa se ubica a 45 km al noreste de Liberia. Por consiguiente, se puede usar un dato de diseño inicial de 4.4 HSP a 4.8 HSP en promedio anual. No obstante, es necesario también determinar la variación

promedio mensual para determinar el dimensionamiento del equipo (paneles, inversores y sistema de almacenamiento) que se necesita para abastecer la carga que consume la empresa.

3.2. Curva de producción energética anual

Con el propósito de verificar los datos ofrecidos de los mapas solares se procede a evaluar la curva anual de producción de energía con base en los datos de la planta solar Miravalles, propiedad del ICE, que está ubicada a menos de 1 km de radio de la empresa en estudio, tal como se puede apreciar en la siguiente fotografía de la planta solar en que las instalaciones de la lechería se ven al centro.

Figura No. 15. Imagen de la planta solar Miravalles, propiedad el ICE



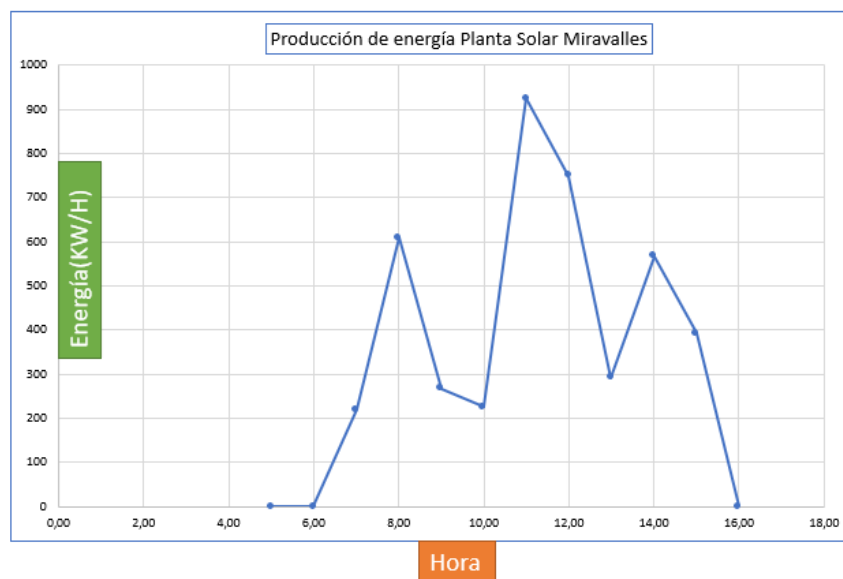
Tomado de Galería de fotos de plantas del ICE

Esta planta, propiedad del ICE, se inauguró el 22 de noviembre de 2012. Fue construida con una donación del Gobierno de Japón y fue, en ese momento, la primera planta solar en el país. La planta solar la forman 4 300 paneles fotovoltaicos de 235 watts de potencia cada uno y su capacidad instalada de 1MW es de potencia.

Con base en los datos suministrados por el ICE, para establecer las curvas de producción más cercanas a la realidad se analiza un año completo de producción con datos a intervalos de 1

hora, en que se indica la producción en MWh de energía. En total se procesan 8700 datos para establecer la curva mensual y comprobar los parámetros de la irradiancia promedio mensual para efectos de diseño. Se emplea como base para el análisis el año 2013, por dos razones principales: los paneles presentaban su máximo rendimiento porque se estaban empleando por primera vez, y es el primer año completo de producción después de la puesta en marcha. La base de datos se emplea solo para obtener los rendimientos, pero no están disponibles al público porque la empresa propietaria de los datos los considera confidenciales y no abiertos al público en general. El propósito de analizar los datos en detalle es que a partir de ellos se puedan apreciar los cambios en el comportamiento de la disponibilidad del recurso solar a lo largo del año y de cada día. Es decir, se puede observar la afectación del clima para determinar la variabilidad e intermitencia de energía suministrada por los sistemas fotovoltaicos, ya que su energía se clasifica como “no despachable” ni programable, dado que se depende de las condiciones atmosféricas, temperatura ambiente e incidencia de los rayos solares para determinar la energía que se puede producir a lo largo del año. A manera de ejemplo, se presenta la salida del reporte del 01 de enero de 2013, cuando se puede ver cómo varía la energía a lo largo del día desde las 00 horas hasta las 24 horas. A las 11 horas se observa la máxima irradiancia en la zona, ya que se registraron en este ejemplo en particular 920 w/m², luego de hacer las conversiones con base en la producción máxima posible del sistema de la planta solar Miravalles.

Figura No. 16. Producción de energía solar de un día típico



Los resultados del procesamiento total de datos se pueden observar en la siguiente tabla resumen, en la que se registra la variación de energía producida mes a mes. Se determina que en los meses de febrero y marzo es cuando se obtiene la máxima producción de un sistema solar, con su potencia en horas solar pico de 6.54 HSP y 6.26 HSP, en los meses de febrero y marzo, respectivamente. Los meses de menor disponibilidad corresponden a junio, que coincide con la entrada fuerte de la época lluviosa en la zona, y a octubre. Se consideran meses de abundantes precipitaciones, por lo que se tiene menos energía radiante disponible por la nubosidad típica de la época. En estos meses se observa la potencia radiante de 2.8 hora solar pico (HSP) para la condición más baja de producción.

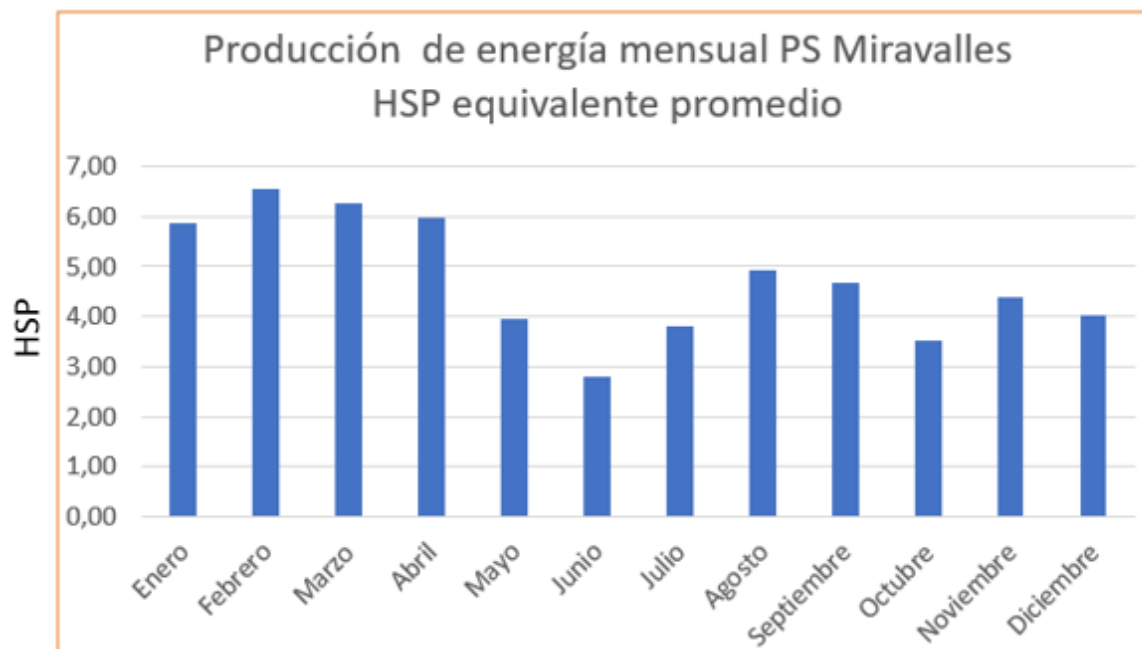
Tabla No. 5. Datos de potencial energético basado en la planta solar Miravalles

Planta Solar Miravalles			
Producción de energía mensual (año analizado 2013)			
Mes	KWh/mes	KWh/día	HSPEq
Enero	181 840	5865,81	5,87
Febrero	183 240	6544,29	6,54
Marzo	194 090	6260,97	6,26
Abril	179 000	5966,67	5,97
Mayo	122 430	3949,35	3,95
Junio	83 930	2797,67	2,80
Julio	118 470	3821,61	3,82
Agosto	152 860	4930,97	4,93
Septiembre	139 700	4656,67	4,66
Octubre	108 730	3507,42	3,51
Noviembre	130 990	4366,33	4,37
Diciembre	124 450	4014,52	4,01
Promedio	143 311	4723,5	4,72

Adicionalmente, se obtiene del análisis que la HSP es de 4,72 para efectos del diseño anual, dato que coincide con la lectura de la radiación del mapa solar pues se ubica exactamente

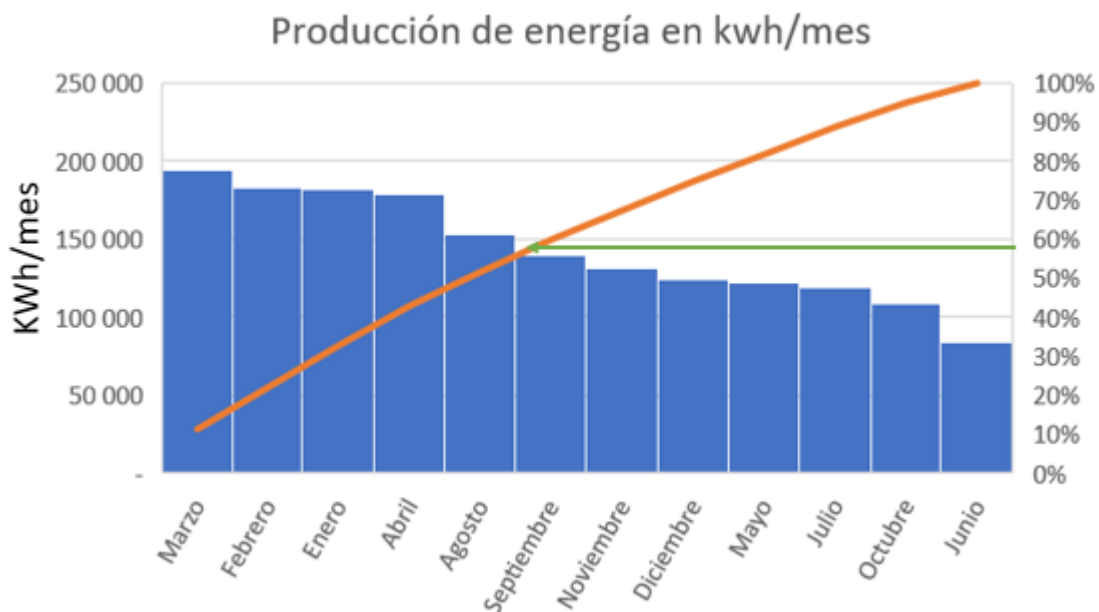
dentro del rango de los datos analizados en el mapa solar en mención, el cual indicaba que los parámetros de diseño están dentro de un rango de 4.4 HSP a 4.8 HSP. Por consiguiente, para efectos de diseño y dimensionamiento del sistema requerido para esta investigación se emplearán los 4,72 KW/hora/día/m² como potencia promedio máxima disponible para el sistema. La variación de los datos de HSP a lo largo del año se puede observar en el siguiente gráfico.

Figura No.17. Producción mensual de energía



Por otra parte, se puede analizar también que a partir de las curvas de generación de energía y los meses de mayor producción, de esta manera se facilita determinar los posibles intercambios con la red pública o con los dimensionamiento de los sistemas de respaldo, ya sea por baterías químicas o por depósito en la red de servicio público, al emplear las ventajas que ofrece el reglamento No. 39220-MINAE, el cual indica que se puede, en generación distribuida para autoconsumo, el uso de la red como batería virtual con entrega y retiro de excedentes, pagando la tarifa correspondiente fijada por la Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos (ARESEP).

Figura No. 18: Producción por mes de mayor a menor aporte de energía



En el gráfico anterior, mediante un análisis de Pareto, se obtiene que 60 % de la energía se produce en 5 meses del año (marzo, febrero, enero, abril y agosto), el cual es un dato clave adicional con el que se puede estimar en detalle en el diseño el tamaño óptimo del sistema. De esta manera, los excedentes de energía por encima de la potencia y energía requeridos para atender la carga de la empresa se pueden almacenar, y luego se pueden usar durante el periodo de menor producción, y así evitar el sobredimensionamiento del sistema. Es importante agregar en este punto que los intercambios permitidos con la red de la empresa ICE no podrán exceder 51 % para efectos de inyectar los excedentes y hacer retiros de energía. Es decir, se puede inyectar lo que el circuito pueda aceptar y lo que el sistema permita, pero en el mes siguiente solo puede retirar 51 % del acumulado de energía previa; el resto lo puede retirar en los meses subsiguientes.

3.3. Cálculo de carga demandada

Para efectos de diseño de las fuentes energéticas que se emplearían para la generación de electricidad en forma de sistemas distribuidos a aislados es necesario determinar la cantidad de energía y de potencia requerida por la empresa, tanto para operar el sistema de enfriamiento, bombas de vacío para extracción lechera, iluminación y demás cargas de la habitación contigua al sistema de ordeño. Si bien es cierto se puede emplear el consumo registrado en los pagos del servicio público para efectos de pago de energía, la empresa está realizando una ampliación que debe ser contemplada en el análisis, e identificar los requerimientos de potencia para el correcto diseño del sistema fotovoltaico y el uso posible con generación eléctrica a biogás que, junto con el dimensionamiento de los inversores de potencia, sean capaces de atender la demanda proyectada de la empresa. A manera de ejemplo, en la siguiente figura se puede ver parte del sistema de producción y sitio de carga de producto final

Figura No. 19: Vista interna de una línea de ordeño



Principales sistemas para el cálculo de la carga requerida

- **Sistema de enfriamiento**

Se tiene un sistema principal de enfriamiento de 7 245 watts, para un voltaje de 208/230 y una corriente de operación de 31.5 amperes, cuyo compresor tiene una máxima presión de 2.76 Mpa para una capacidad de 4 200 litros de almacenar y enfriar producto final. El segundo sistema auxiliar de enfriamiento es para una capacidad de 1 200 litros de producto terminado y requiere una potencia de 2 237 watts. En la siguiente imagen se puede observar el compresor de los sistemas de enfriamiento principal.

Figura No. 20: Compresor del sistema principal de enfriamiento



- **Bomba del sistema de ordeño**

Este sistema consiste en un motor de 5 HP para sistema de vacío para el sistema de ordeño el cual pasa activo 7 horas diarias para cubrir dos ordeños al día. En total se usan una potencia de 3 750 watts con un factor de utilización de 30 % diario. En las siguientes imágenes se puede visualizar el sistema de vacío (motor y bomba)

Figura No.21. Sistema de vacío, proceso de ordeño



Adicionalmente a las cargas mencionadas anteriormente, las instalaciones cuentan con una unidad habitacional que funciona como casa/oficina para los trabajadores que atienden las actividades operativas diarias. Por consiguiente, se deben agregar a las cargas requeridas totales para el dimensionamiento del sistema de generación eléctrica.

Para efectos de diseño se emplean los parámetros del estudio preparado por la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Costa Rica en el año 2019, el cual se denomina documento sobre el “Estudio para la caracterización del consumo energético en el sector residencial”, por medio de una encuesta nacional de consumo de energía del sector

residencial. Otro estudio es la consultoría solicitada por el Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE) y el Instituto Costarricense de Electricidad. En este estudio se revisan los parámetros de consumo promedio para viviendas, tanto de nivel rural como urbano, que generan suficientes datos estadísticos para usar promedios de diseño para calcular la demanda de energía mensual típica en Costa Rica. En cuanto a los consumos de los equipos de enfriamiento se emplea un factor de utilización de 80 %, asumiendo que los equipos son capaces de trabajar 20 % del tiempo con la inercia térmica y sin necesidad de demanda energética. Las bombas para el funcionamiento del sistema de vacío se trabajan con 6 horas diarias según el dato suministrado por el administrador de la planta. Con base en los datos anteriores se construye la siguiente tabla de requerimiento de potencia y energía mensual para efectos del diseño del sistema de generación.

Tabla No. 6. Requerimientos de potencia de las cargas de la planta

Resumen de requerimiento de potencia y energía de la planta			
Elemento	Potencia W	Factor de utilización %	Consumo mensual kWh
Area de producción			
Sistema de enfriamiento principal	7245	80,0%	4347,00
Sistema de enfriamiento auxiliar	2234	80,0%	1340,40
Bomba de vacío	3728	29,2%	816,43
Iluminación general Leds	200	16,7%	24,05
Sistema de agua caliente	* Funciona con GLP		
Oficina/habitación			
Refrigeradora	300	33,8%	36,45
Cocina un disco sellado	1000	1,7%	6,17
Arrocera	700	1,3%	3,32
Microondas	1200	0,3%	1,31
Coffe Maker	800	1,0%	2,83
Iluminación general	200	15,0%	10,78
Televisión	250	14,0%	12,62
Termoducha	8000	0,3%	9,36
Aire acondicionado	3500	0,2%	3,08
Computadora	45	9,1%	1,48
Equipo de sonido	600	1,2%	2,54
Lavandería	385	1,1%	1,59
Total	30 387		6619,4

En general, tomando en cuenta la cantidad de equipos que incluyen de manera anticipada las necesidades de ampliación de una de las líneas de ordeño, se requieren, en total, 6 619,4 kWh/mensuales para una potencia total de 30.3 KW, la cual por factor de utilización coincidente o de simultaneidad de uso se puede diseñar a 80 %, lo que significa una demanda de potencia de diseño de $30.3 \times 80 \% = 25 \text{ KW}$.

Por último, se debe considerar el dato de la energía requerida para el sistema de agua caliente del proceso de ordeño, la cual funciona con una mezcla de gas propano/butano. Para ello, según los registros, se emplea un consumo aproximado de 15 kg por mes, lo que equivale a un requerimiento de energía de 14 kWh de electricidad por cada kilogramo. Es decir, se requiere en total 158.76 kWh al mes, o sea, 576 mega-julios de energía.

3.4. Dimensionamiento de los paneles solares requeridos

Existen en el mercado nacional gran variedad de ofertas en celdas fotovoltaicas de diversas tecnologías, diferentes niveles de calidad de celdas, respaldo técnico y dimensionamientos de potencia que influyen en el diseño final, su vida útil y su eficiencia antes las variaciones del clima diario. Ante esta situación, se procede a establecer los parámetros bases para el diseño propuesto del sistema, para efectos de la solución del requerimiento de energía y potencia del inmueble.

Tabla No. 7. Resumen del sistema fotovoltaico seleccionado para el diseño.

Aspecto relevante	Selección de diseño	Justificación
Demanda de energía promedio diaria	218.3 kW-hora	Se emplea el cálculo de las diferentes cargas de la planta de producción y el crecimiento a corto plazo
Tipo de celda	Monocrystalino bifacial	Hay espacio disponible de alto rendimiento recomendado para aplicaciones agrarias. Inclinas a 18 grados hacia el sur.
Potencia de diseño	514 watts	Para sistemas de fincas en donde existe espacio se usan paneles de 72 células de

		hasta 514 Watts de 2.06 m X 1.02 m
Rendimiento sostenido hasta por 25 años	86 %	Es una de las degradaciones menores encontradas en el mercado
Tipo de inversor	Tres inversores de hasta 10 kW de potencia	Se descartan los microinversores por panel por el costo adicional que representan.
Vida útil estimada	25 años	Requiere reemplazo de microinversores en 100 % a la mitad de su vida útil

A partir del consumo de energía diario se procede a diseñar el requerimiento de paneles de forma tal que se pueda atender el requerimiento de electricidad para consumo simultaneo, y los excedentes se usarán para almacenar la energía en baterías químicas o usando la red de servicio público como batería virtual para su posterior consumo, cuando no se tenga el recurso solar disponible. El resumen de los cálculos se puede observar en la siguiente tabla:

Tabla No. 8. Cálculos de número de paneles monocristalinos.

Cálculo de requerimiento de paneles		
Energía mensual requerida	6619,4	kWh
Energía diaria requerida	217,62	kWh
Potencia del panel	514	Watts
Hora solar pico de diseño	4,72	W/hora/día
Energía disponible diaria	2426,08	W/hora/panel
Cantidad de paneles	89,70	C.U
Dimensionamiento final	90	PFV de 514 W

Este tipo de tecnología monocristalino es relativamente nuevo, pero ampliamente usado en Europa porque disminuye el espacio de utilización. Tiene menos inversión en infraestructura e incluso el peso que soporta también baja hasta en 30 % menos con respecto a los módulos policristalinos usados con mayor frecuencia en Costa Rica. Si se optara por sistemas policristalinos la cantidad de paneles aumentaría a 145 unidades, tal como se observa en la siguiente tabla, y el peso se incrementaría en una tonelada, según datos obtenidos de las fichas técnicas de este tipo de fotocelda. En la siguiente tabla se hace el cálculo de requerimientos acerca de si se decide trabajar con los sistemas policristalinos empleados tradicionalmente en Costa Rica. Se pudo determinar que para atender la demanda mensual de energía se diseñaría con un total de 145 paneles adicionales de dimensiones similares a las del anterior.

Tabla No. 9. Cálculos de número de paneles policristalinos

Cálculo de requerimiento de paneles		
Energía mensual requerida	6619,4	kWh
Energía diaria requerida	217,62	kWh
Potencia del panel	320	Watts
Hora solar pico de diseño	4,72	W/hora/día
Energía disponible diaria	1510,4	W/hora/panel
Cantidad de paneles	144,08	C.U
Dimensionamiento final	145	PFV de 320 W

La comparación de precios y costos de instalación será la que realmente justificará la decisión final de la solución por elegir, dado que existen diferencias en aspectos como área necesaria, peso total de los paneles y potencia disponible por arreglo. Las principales diferencias se analizan en la siguiente tabla comparativa de dos posibles soluciones que se pueden obtener en el mercado nacional:

Tabla No. 10. Comparación técnica entre ambas tecnologías de paneles

Tipo de celda	Monocrystalina	Policristalina
Potencia pico (W)	535	320
Voltaje (V)	41,9	24
Corriente máxima(A)	12,26	12,5
Eficiencia	24%	16%
Dimensiones	2,06 m * 1,02 m	1,96*0,99 m
Peso unitario (kg)	22,0	22,6
Cantidad de paneles	90	145
Peso total (kg)	1980	3277
Área total (m2)	189,1	281,4

Entre las consideraciones más importantes acerca de esta comparación se observa que la tecnología monocristalina puede producir alrededor de 395 watts en la parte frontal y los 40 restantes se generan por irradiancia de reflexión en la parte posterior. No obstante, en el mercado costarricense predominan la oferta de paneles monocristalinos con potencias de entre 250 y 350 watts, lo que convierte en accesible a este tipo de tecnología. En consecuencia, si se desea instalar sistema bifacial monocristalino esto deberá hacerse contra pedido u obtener una licencia de importación y aplicar los beneficios fiscales de exoneración que ofrecen el Ministerio de Hacienda y el de Ambiente y Energía para estos fines.

Por otra parte, se tienen dos datos relevantes de la comparación que deben considerarse en el momento de la propuesta. En primer lugar, al usar la tecnología monocristalina se reduce el peso de los paneles en 40 % al pasar de 3,2 toneladas en celdas policristalinas a 1.98 toneladas, si se emplea monocristalina como decisión final. Por otro lado, se requiere menor área de instalación, ya que el uso del monocristalino requiere hasta 34 % de espacio; sin embargo, hay que recalcar que este último aspecto no es una limitante, debido a que la propiedad tiene suficiente espacio disponible para la colocación del sistema de generación,

el cual se tendría que realizar en suelo debido al peso importante y a que las instalaciones originales no tienen techos diseñados para soporte de tal cantidad de peso.

3.5.Presupuesto del sistema fotovoltaico

Tabla No. 11. Costos de los sistemas fotovoltaicos

Costos comparativos de los sistemas			
Elemento de costo	Precios de referencia	Sistema policristalino	Sistema monocristalino
Precio FOB Euros	Precio base	247,6	345,0
Flete	Agregar 55 %	136,2	189,8
Impuestos	Agregar 21 %	52,0	72,5
Aduanas	Agregar 5 %	12,4	17,3
Precio CIF		448,1	624,5
Total paneles		145	90
Precio total		64969,5	56200,5
TC USD/Euro		1,14	1,14
Presupuesto US\$		74065	64069
Dispositivos Rapid Shutdown (RSD) por grupos	4	996	996
Inversores híbridos inteligentes de 7000-15000 watts	3	5661	5661
Paneles, interruptores, conductores y tuberías	5 % adicional	3703,3	3203,4
Total sistema fotovoltaico		84425	73929
Mano de obra e ingeniería	10%	8442,5	7392,9
Monturas, licencias y otros	8%	7406,5	6406,9
Presupuesto total		100275	87729

El presupuesto anterior se basa en costo FOB de Europa, de empresas reconocidas que tienen paneles a disposición que cualquier persona en Costa Rica que tenga una licencia de importación puede tener. Pueden importarse de forma directa o por medio de un agente aduanero para nacionalizar los paneles en Costa Rica. Se agregan los costos de flete, algunos impuestos que no se exoneran y los gastos aduaneros para tener el material en Costa Rica. El sistema también se diseña con tres inversores para que puedan suministrar una potencia promedio de 27 kW en el momento de máxima demanda, según las agrupaciones de la configuración que se desee diseñar. No se emplean microinversores para cada unidad porque según los datos de mercado y los costos estándar que se emplean para este tipo de configuraciones podrían elevar el precio de los inversores hasta en 200 %. Por otra parte, se emplean dispositivos RSD como mecanismo de desconexión rápida, los cuales deben tener certificación UL1741 y tener compatibilidad con los inversores que se vayan a utilizar, y serán elementos claves que protegerán al inversor de cargas peligrosas que pudieran dañarlo.

Se recomienda también en cada una de las ramas de corriente directa provenientes de los módulos utilizar un interruptor de corriente directa integrado en el inversor. Cada uno de los sistemas fotovoltaicos estarán conectados a la red eléctrica convencional por medio de una caja de barras en la cual esta conexión se hará después del interruptor principal de la acometida; de tal manera que cuando se requiera desconectar toda la alimentación eléctrica en el sector solo se deba desconectar dicho interruptor. Se solicitará a la empresa distribuidora instalar también un medidor bidireccional, que será el encargado de realizar una resta interna entre la energía consumida de la red y la entregada por cada sistema fotovoltaico. Es importante mencionar que este medidor bidireccional debe estar ubicado en un sitio accesible para que el personal de ICE pueda consultarlo, ya sea en forma presencial o por vía remota por medio de los protocolos de comunicación que disponga la empresa distribuidora de electricidad. Esto se justifica porque la modalidad para configurar el sistema fotovoltaico será en generación paralela a la red, bajo la norma de generación distribuida para autoconsumo con intercambios a la red de hasta 51 % de la energía y bajo lo especificado en el Reglamento 39220-Minae. Conforme con lo investigado es mejor emplear la red de la empresa distribuidora para que funcione como batería virtual con entrega de excedente, retiros de depósitos de energía y “back-up” cuando falle el sistema fotovoltaico. Conforme con la revisión de información, colocar un banco de batería para un sistema de 27 KW de

potencia y demandas diarias de energía de casi 220 kWh requiere un sistema de aproximadamente 40 baterías de 12 V de 230 ampere-hora, lo que representa una tercera parte del costo de los paneles, situación que hace inviable financieramente el proyecto, aunque técnicamente es posible.

3.6. Cálculo de las baterías

Las baterías o acumuladores tendrán la función de suministrar energía en caso de que los sistemas fotovoltaicos o la generación eléctrica con biometano no produzcan dicha energía, o que su aporte se vea muy reducido, dado que en la implementación de un sistema híbrido se compensa la demanda mediante la energía solar, la red eléctrica de la empresa distribuidora o con baterías que funcionan como elementos de respaldo en caso de que no se cuente con los niveles de energía necesarios para operar en la lechería.

Anteriormente se identificaron las baterías de tipo plomo-ácido para la utilización en este proyecto. Por consiguiente, para el adecuado dimensionamiento y la cantidad de baterías por seleccionar se deben tomar en cuenta dos aspectos, la energía diaria consumida y la tensión de la instalación. La energía diaria máxima aportada demandada será de un total de 6619 Wh/día, mientras que la tensión de las baterías se seleccionará a 48 V.

El cálculo de la capacidad total que deberán tener las baterías se hará mediante la siguiente ecuación:

$$(3) \quad \text{Capacidad total} = \frac{E_n * N}{V * PD}$$

Según la ecuación 3;

Capacidad total= (Ah)

E_n = Consumo diario (Wh)

N = número de días que se quiere darle al sistema (en este caso se escogerán 1 días)

PD = profundidad de descarga permitida (60%)

V = tensión nominal (48 V)

Conociendo los datos anteriores se procede a sustituir en la ecuación anterior:

$$\text{Capacidad total} = \frac{6619 \text{ h} * 1}{48 * 0,6}$$
$$\text{Capacidad total} = 229.8 \text{ Ah}$$

De acuerdo con el cálculo anterior las baterías deben tener una capacidad mínima de 250 Ah. Dentro de esta propuesta se escogerá un banco de batería comercial con capacidad de 250 Ah y con un voltaje de 48V, el cual puede suministrar los 250 Ah por 24 horas de servicio.

3.7.Cálculo del inversor

En el caso del inversor, es el elemento que se encarga de realizar la conversión de corriente continua a corriente alterna. Deberá ser seleccionado a partir de una potencia máxima a la cual se le deberá aplicar un factor de seguridad de 20%, con el fin de garantizar una adecuada protección. Con base en la carga calculada de 27 KW, que se sabe, por criterio de simultaneidad de las cargas, que nunca trabajará a 100 %. Por lo tanto, ya existe un factor de seguridad por las condiciones operativas del sistema.

Se seleccionará una potencia máxima de 27 kW multiplicada por el factor de coincidencia de 0,8. Se obtiene un requerimiento de 21,6 de potencia de diseño para el dimensionamiento, lo que resulta en que se requiere un inversor cuyo valor será el máximo de potencia. Luego, a esta potencia total se le aplica el factor del 20% antes mencionado:

$$Potencia\ final = 21600\ W * 1,2 = 25900\ W = 25,9\ kW$$

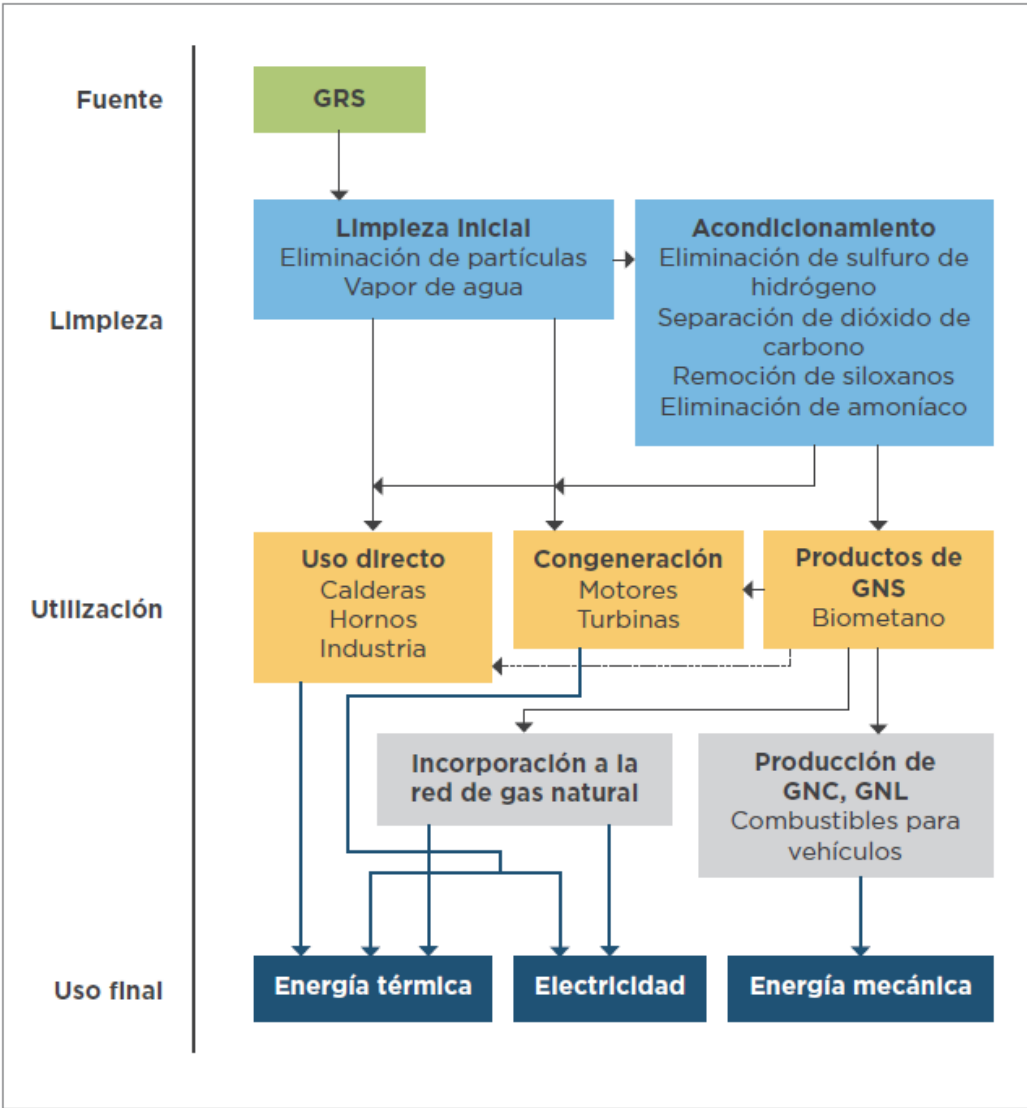
Con base en lo anterior se justifica emplear los 26 kW antes calculados. Por lo tanto, se seleccionarán tres inversores monofásicos comerciales con rango de operación de 7KW a 10 kW de potencia. Se dispone emplear tres inversores interconectados al tablero secundario del sistema fotovoltaico para distribuir la alimentación de los sistemas, para no depender de un solo inversor en caso de falla y para en casos de mantenimiento no sacar de operación en su totalidad el módulo fotovoltaico de generación eléctrica.

3.8.Generación con biometano

Dentro de la segunda opción determinada como una fuente posible de energía se tiene la de que el biometano se puede emplear para múltiples propósitos, dependiendo del volumen disponible y de las aplicaciones de uso que se tengan en la agroindustria. En la práctica se puede tener biometano recuperado por biodigestores que se emplean como sustituto de gas licuado de petróleo GLP, o se puede emplear para producir energía eléctrica. Tal como se puede apreciar en el siguiente diagrama proporcionado por el Banco Interamericano de

Desarrollo (2017), a partir de la disponibilidad de recurso se puede tomar la decisión de potencial de uso.

Figura No. 22. Usos del biometano



Fuente: BID con base en estudios de Duket *et al* (2017)

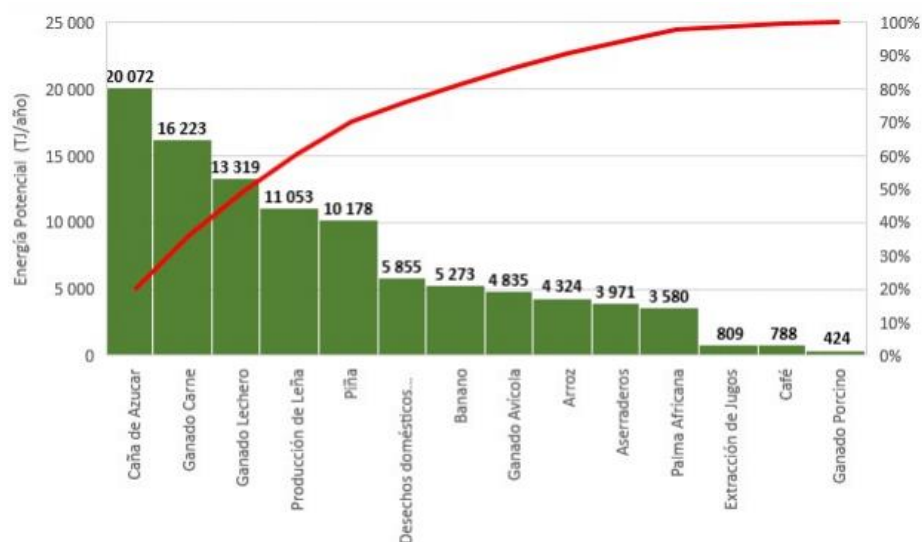
El nombre genérico que emplean algunos autores es el de GRS (biogás de relleno sanitario) para referirse a biometano por descomposición anaeróbica, cuya recuperación en el caso de este estudio se realiza por medio de vertederos que provienen de la lechería y que consisten en llevar una mezcla de aguas y residuos a un pequeño biodigestor para almacenar el material en donde se deposita para que la bioquímica se encargue del proceso. A pesar de que la presenta investigación no incluye los detalles del diseño del biodigestor se cuenta con

suficiente información en el país para su dimensionamiento, según información suministrada por la Asociación de Biogás de Costa Rica.

3.9. Cálculo del potencial del biometano

Para calcular la cantidad de biogás en este caso interesa la mezcla a base de metano que se puede producir a partir de los residuos de la agroindustria, y para efectos de este estudio se utilizarán, en primera instancia, parámetros de rendimientos de investigaciones anteriores realizadas en el país para determinar el uso potencial energético de la actividad ganadera. Con base en el estudio de la Secretaría de Planificación Energética Sectorial (SEPSE) del Ministerio de Ambiente y Energía se determina que sí es posible establecer el valor energético aprovechable a partir de datos oficiales y elaborados por expertos en estudios de la biomasa seca y húmeda en el nivel nacional, tal como se aprecia en la siguiente figura.

Figura No. 23. Potencial energético de la biomasa en Costa Rica (Fuente: MINAE)



Fuente: MINAE (2015)

Considerando los datos oficiales del estudio realizado en el año 2015 (se confirmó que existen actualizaciones de este dato a nivel nacional), estos se pueden extrapolar para los cálculos en pequeña escala, como sigue:

- Considerando la información del MAG, el hato lechero que se usa para el cálculo corresponde a un total aproximado de 480.920 animales, lo que se considera significativo para la representatividad del indicador de cálculo.
- De acuerdo con las principales características de la excreta del ganado lechero y según los estudios, se pueden obtener una producción de 1,77 toneladas de material seco por cada animal por año. Este dato coincide con las recomendaciones generales de cálculo que utiliza la FAO y con sus estudios, que están apoyados por la GIZ de Alemania y por el Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo PNUD (2017). Son los montos que se utilizan en esta investigación para el cálculo de producción de electricidad.
- Asimismo, el informe indica: “El potencial energético bruto sobre PCS (base seca) de las excretas de ganado bovino lechero es de 13 319 TJ, de los cuales el potencial energético bruto disponible sobre PCS (base seca) es 852 TJ, estimando 40% de la fracción disponible en las lecherías (zonas de ordeño)..., ya que el resto son desechos que se encuentran esparcidos en campo, y se dificulta poder recolectarlos (utilizado 4 horas al día, dos ordeños) o no son disponibles para un uso energético” (Sepse, 2015, pág. 204). Esto es importante, para ser conservador en determinar el material útil que puede capturarse para que se procese en el biodigestor, lo que solo se puede hacer mientras el ganado lechero esté en las instalaciones durante el ordeño o estabulación para alimentación, lo cual -se reitera- es de aproximadamente 6 horas diarias para cada animal.

Con base en las anteriores premisas o supuestos se construye la siguiente tabla a fin de determinar el indicador general promedio que se puede usar en el país para determinar el potencial energético bruto, usando base seca de material orgánico anual, que se emplea en la mayoría de los cálculos para este tipo de soluciones en el país:

Tabla No. 12. Aporte energético anual del biogás de nivel nacional

Potencial energético anual		
Cantidad ato nacional	480 920	c.u.
Producción material	1,77	T/año/animal
Energía producida	15,62	GJ/T
Energía total	13 296 188	GJ/T
Fracción disponible	5 318 475	40%
Factor de recuperación	0,1667	4 horas
Energía disponible	886 413	Giga-Julios

Con base en estos datos consolidados en el nivel nacional se procede a realizar un nuevo cálculo del potencial energético para el caso de la investigación. La empresa emplea 200 animales en promedio para dos ordeños diarios, pero se propone una variación en la cantidad de tiempo del factor de recuperación a 6 horas por día, dado que es el tiempo que los bovinos lecheros pasan entre alimentación y ordeño en la planta. En los cálculos se puede observar que se tienen disponibles 553 GJ de energía al año para determinar si es factible disponer de este recurso, el cual depende, sin duda, de los análisis tecnológicos y financieros para producir calor y especialmente para valorar si es posible usarlo como fuente para generar electricidad para la planta de ordeño. Los datos se resumen en la siguiente tabla:

Tabla No. 13. Aporte energético anual del biogás en la lechería

Potencial energético anual		
Cantidad ato empresa	200	c.u.
Producción material	1,77	T/año/animal
Energía producida	15,62	GJ/T
Energía total	5 529	GJ/T
Fracción disponible	2 212	40%
Factor de recuperación	0,2500	6 horas
Energía disponible	553	Giga-Julios

Adicionalmente, con base en los anteriores datos se procede a realizar el cálculo para valorar las emisiones de metano como gas de efecto invernadero, que produce el ato de la empresa en estudio. Para tal efecto se emplea la siguiente fórmula:

$$\text{Emisión } CH_4 = A * EF$$

Donde:

Emisión CH_4 : emisiones GEI en kg CH_4 /año

A: datos de actividad, representa el número de ganado por cabeza

EF: factor de emisión por defecto de IPCC expresado en kg CH_4 /cabeza

Por lo tanto, $A = 200$

El factor de emisión de metano en Costa Rica del ganado vacuno lechero es de 1 kg CH_4 /cabeza, por lo tanto, si $EF=1$, entonces:

$$\text{Emisión } CH_4 = 200 * 1 \text{ kg } CH_4/\text{año}$$

Si se considera que, para el biogás, la densidad es de $1.2 \text{ kg}/\text{m}^3$, para determinar la cantidad de CH_4 en m^3 , se procede a realizar el cálculo:

$$\frac{200 \text{ kg } CH_4}{1.2 \text{ kg}/\text{m}^3}$$

$$\text{Emisión } CH_4 = 166.67 \text{ m}^3 \text{ } CH_4/\text{año}$$

Tan solo en esta pequeña industria, según este estudio, es capaz de aportar casi 167 metros cúbicos de metano al año, con el ato de ganado actual con que cuenta la empresa.

Para efectos de diseño y cálculos de la cantidad de energía que se puede obtener del biometano recuperado en la finca lechera en estudio, se procede a usar los datos específicos que propone la FAO y que se usan en un estudio para el Gobierno de Chile, el cual coincide, en general, con los datos que se emplean en Costa Rica según la Secretaría de Planificación de Energía del MINAE. En la siguiente tabla se resumen los parámetros para el cálculo de biogás con composición de entre 55 y 70 % de metano. Conforme con los cálculos se determina que cada bobino lechero puede aportar 0,4 m^3 de biogás al día, del cual se podría

recuperar 33 % para emplearlo en el biodigestor. Los cálculos también indican que con estos datos de recuperación los índices de producción recomendados y el ato de 200 animales, se podría disponer al día de 32 kg de metano diario, es decir, de cerca de 27 m³/día durante todo un año.

Tabla No. 14 Producción de biogás recuperado en la lechería

Producción de biogás		
Producción de residuos por animal	10	kg/día
Porcentaje de recuperación	33%	kg/día
Cantidad total de animales	200	
Materia prima recuperada	666,7	kg/día
Producción de biogás por animal	0,4	m ³ /día/año
Volumen recuperado por animal	0,13	m ³ /día/año
Volumen total por ato de la finca	26,67	m ³ /día/año
Densidad del biometano	1,2	kg m ³
Peso total de biometano diario	32	kg
55 – 70% metano (CH ₄) 30 – 45% dióxido de carbono (CO ₂) Trazas de otros gases		

3.10. Potencia disponible a partir de biogás

En primera instancia se valora el potencial de producir energía eléctrica con el biogás existente, dado que en el sistema para escenarios bajos se recomienda emplear 25 % de eficiencia de transformación energética, por lo que se diseña para 5 kWh/m³ y un caudal de 26.67 m³ CH₄ /día. Para los cálculos de potencia y energía eléctrica se tiene la siguiente ecuación:

$$\text{Potencia disponible [kW]} = \eta_t * \text{PCI}_{\text{biogás}} * Q_{\text{biogás}}$$

η_t : rendimiento térmico de la generación eléctrica. Asume valores de 25%, 33%, y 40% para los escenarios bajo, medio y alto, respectivamente.

$\text{PCI}_{\text{biogás}}$: poder calorífico inferior del biogás: se asume 5 kWh/m³

$Q_{\text{biogás}}$: caudal de biogás capturado (m³ CH₄/hora)

$$\text{Potencia disponible [kW]} = 0.25\eta_t * 5 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3 \text{PCI}_{\text{biogás}}} * \left(\frac{26.67}{24}\right) \text{m}^3 \text{CH}_4/\text{hora} Q_{\text{biogás}}$$

$$\text{Potencia disponible [kW]} = 1.39 \text{ Kw}_t$$

$$\text{Energía diaria} = 33,34 \frac{\text{kWh}}{\text{día}}$$

$$\text{Energía diaria} = 1014,02 \frac{\text{kWh}}{\text{mensual}}$$

Empleando todo el caudal de biometano se puede producir un total de 1014 KWh al mes, lo cual representa casi 15 % de la energía requerida por los sistemas de la lechería. Este análisis debe complementarse con la revisión financiera para determinar si el biometano es competitivo para producir electricidad en comparación con los sistemas fotovoltaicos.

3.11. Usos potenciales de biometano

Conforme con las mejores prácticas en el nivel internacional, el biometano tiene usos directos como fuente de calor o combustible, o bien, se puede emplear para producir energía mediante un proceso de transformación de energía química a cinética y luego a electromagnética, con el inconveniente de que, en este último caso, las pérdidas son elevadas y llegan a valores cercanos a 70 % de pérdidas disipadas por calor.

a) Sustituto de GLP

Es importante analizar que la empresa requiere un consumo de GLP de 15 kg mensuales el cual puede ser utilizado directamente de biogás dado que, con ajustes en los regulares de presión, las válvulas y cambios en las tuberías, puede entonces emplearse como sustituto de gas licuado de petróleo. Al analizar la tabla No. 3 de esta investigación, en que se puede ver la relación del poder calórico de biogás con respecto al propano, se puede determinar que existe suficiente recurso para suplirlo si se toma en cuenta que en Costa Rica el GLP empleado es predominantemente propano, y considerando que la relación de eficiencia calórica del biogás con respecto al gas propano es de 3.71:1. Se puede decir que con 55.71 kg de biometano se atienden los requerimientos de la instalación para el proceso de calentamiento de agua en los sistemas de ordeño.

b) Funcionamiento de aparatos de cocción e iluminación

En el mercado existen algunas plantillas y sistemas de iluminación que pueden emplear directamente el biogás como combustible para su funcionamiento. Algunos ejemplos de ello se pueden observar en las siguientes figuras, en las que todos estos muestran que contienen los elementos que están contemplados en las cargas de consumo que se tomaron en cuenta en el momento de calcular las necesidades de energía en el sistema. Por consiguiente, al emplear el biometano para sustituir la olla arrocera y la plantilla eléctrica, así como la termoducha esto podría reducir en forma importante el requerimiento de paneles solares y hacer más rentable la combinación híbrida en el momento de hacer la propuesta de diseño de producción de energía para autoconsumo.

Figura No. 24. Equipos para biogás

Principales equipos para consumo de biogás.

	<p>Lámparas a biogás</p>	<p>Consumo biogás: 0.07 m³/hr</p>
	<p>Cocina a biogás de dos hornillas</p>	<p>Consumo biogás: 0,20 - 0,42m³/hr</p>
	<p>Olla arrocera</p>	<p>Consumo biogás: 0,14m³/hr</p>
	<p>Generador eléctrico (600W)</p>	<p>Consumo de biogás: 0,7 -0,8 m³/kWh</p>
	<p>Calentador de agua</p>	<p>Consumo de biogás: 2,2 m³/hr Presión ingreso del agua: 0,025 - 0,8MPa Presión de gas requerida: 1,6KPa</p>

Fuente: Banco Interamericano de Desarrollo (2017)

La producción de energía eléctrica se analizará por separado con el excedente del uso de biogás. Por la baja eficiencia de transformación energética para la producción eléctrica se recomienda primero hacer los usos directos del biometano y luego usar el restante para tener

energía eléctrica disponible, sin tener que recurrir en forma innecesaria a las transformaciones de energía, dado que la eficiencia del biogás para la producción de electricidad, como se mencionó anteriormente, es muy baja al no superar 25 % de aprovechamiento de la energía química para transformarla en electricidad.

El uso directo del biometano recuperado que se puede emplear en la empresa objeto de esta investigación se resume como sigue:

Tabla No. 15. Propuesta de alternativas del uso potencial del biogás en la agroindustria

Uso directo del biogás		
Sustituto de GLP	1,55	m ³ /día
Plantilla de GAS	1,26	m ³ /día
Olla arrocera	0,14	m ³ /día
Calentador de Agua	2,2	m ³ /día
Lamparas (5 lámparas * 4 horas)	1,4	m ³ /día
Consumo de biogás por día	6,55	m ³ /día
Adición de imprevistos de 15 %	7,53	m ³ /día
Bajo este esquema de uso directo del biometano, se deduce que quedarán disponibles para conversión de energía eléctrica un total de 19,14 m ³ /día		

De total de la producción diaria de biometano se puede emplear 28 % para uso directo, como se aprecia en la tabla anterior, y el restante 72 % para producir electricidad.

c) Generación eléctrica

Al considerar el remanente de energía química disponible de 19,14 m³ /día de CH₄, se puede estimar de nuevo la producción de energía eléctrica para atender la demanda en tiempos nocturnos, cuando se puede diseñar dimensionamiento de equipos con kit de biogás para un consumo promedio de 1.6 m³/h de CH₄. En este caso la potencia se puede calcular de la forma como sigue:

$$\text{Potencia disponible [kW]} = 0.25\eta_t * 5 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3 \text{PCI}_{\text{biogás}}} * \left(\frac{19.14}{12}\right) \text{m}^3 \text{CH}_4/\text{hora} Q_{\text{biogás}}$$

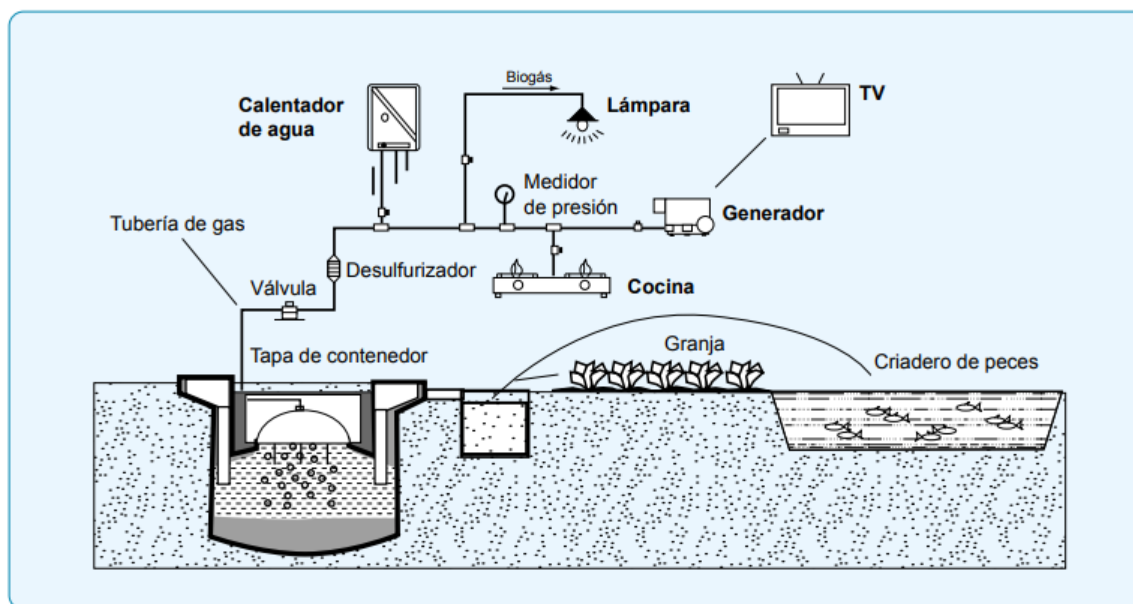
$$\text{Potencia disponible [kW]} = 1.99 \text{ Kw}_p$$

$$\text{Energía diaria} = 23,9 \frac{\text{kWh}}{\text{día} - 12h}$$

En el mercado existen generadores con kit de adaptación para biogás el cual se puede encontrar en rangos de potencia de 600 watts hasta 7 KW para microgeneradores. En este caso se requiere un sistema de generación de 2 KW de potencia de salida para 110V/230V, con amperajes de hasta 8,3 A. El precio de solo el equipo se estima en cerca de US \$ 2000, por lo que sería necesario agregar el costo del biodigestor, las tuberías y la instalación eléctrica para el debido análisis financiero. El esquema de solución en el uso del biometano se resume en el siguiente esquema recomendado por la FAO.

Figura No. 25. Diagrama general de un sistema de uso del biometano

Tendido de red de distribución.



Fuente: Diagrama aportado por la FAO en colaboración con GIZ y PNUD (2011)

En este esquema también es importante considerar los sistemas de desulfurador para evitar malos olores y corrosión en el sistema, así como todos los filtros de extracción del vapor de agua que afectan la calidad de la combustión de los sistemas.

3.12. Costo del sistema de generación a base de biometano

El costo del sistema de biometano que incluya el equipo de generación, el biodigestor, los accesorios, la construcción y el sistema eléctrico requerido se representa en la siguiente tabla.

Tabla No. 16. Costos estimados de instalar el sistema de producción de biometano

Costos sistema biometano		
Elemento de costo	Precios de referencia	Sistema 2 KW
Precio FOB Euros	Precio base	1100,0
Flete	Agregar 55 %	605,0
Impuestos	Agregar 21 %	231,0
Aduanas	Agregar 5 %	55,0
Precio CIF		1991,0
Total de equipos		1
Precio total		1991,0
TC USD/Euro		1,14
Presupuesto US\$		2270
Biodigestor	1	3500
Tuberías y accesorios	3	550
Paneles, interruptores, conductores y tuberías	5 % adicional	113,5
Total sistema de generación		6433
Mano de obra e ingeniería	10%	643,3
Presupuesto total		7077

El costo de la energía evitado corresponde a 23.9 KWh por día, es decir, que se pueden eliminar de la factura mensual cerca de 740 kWh, por lo que se puede pensar que fácilmente se podría atender 11 % de los paneles fotovoltaicos con este tipo de energía; esto significa que de los 90 paneles monocristalinos se pueden emplear 10 paneles menos para producir.

3.13. Análisis económico del sistema fotovoltaico

Para el análisis financiero se procede a analizar dos escenarios. El primero consiste en suplir la energía únicamente con sistemas fotovoltaicos en su totalidad y el segundo en emplear un sistema híbrido que incluya el uso directo del biogás, para bajar cargas de demanda eléctrica y para el uso de celdas solares como complemento. En ambos casos se emplea la red eléctrica como respaldo ante cualquier contingencia y, además, se usará la red de distribución del ICE como batería virtual para inyectar y retirar excedentes de electricidad producida durante el día, o en épocas de abundante radiación, dado que las baterías químicas son económicamente inviables, según la revisiones de mercado y los costos actuales para el sistema de la empresa.

En la tabla siguiente se obtiene, en términos de dinero constante sin deflactar, que la empresa sí invierte los US \$87728 iniciales, con una vida útil de 25 años y con costos de mantenimiento de \$ 1000 anuales. Con reposición completa de inversores, a los 12 años es posible recuperar la inversión en el periodo 8+1, es decir, a los nueve años.

Tabla No. 17. Análisis financiero de la propuesta basadas en paneles monocristalinos

Análisis financiero sistemas fotovoltaicos				
Energía producida:	6 550	kwh/mes		
Intercambio con la red	51	%		
Costo de inversión:	87 728	US \$		
Costo inversores 10 años:	5 661	US \$		
Mantenimiento anual:	1 000	US \$		
Tipo de cambio	640	¢/US\$		
Costo energía hasta 3000 kwh	96,05	¢/KWh		
Costo energía mayor 3000 kwh	57,48	¢/KWh		
Costo de potencia	9 799,72	¢/KW		
Costo retiro de energía:	28,3	¢/KWh		
Periodo	Inversión	Costo retiro	Costo evitado	C/B
Año 0	87 728	1 773	14 189,93	- 88 500,6
Año 1	1 000	1 773	14 189,93	- 77 083,2
Año 2	1 000	1 773	14 189,93	- 65 665,8
Año 3	1 000	1 773	14 189,93	- 54 248,4
Año 4	1 000	1 773	14 189,93	- 42 831,0
Año 5	1 000	1 773	14 189,93	- 31 413,7
Año 6	1 000	1 773	14 189,93	- 19 996,3
Año 7	1 000	1 773	14 189,93	- 8 578,9
Año 8	1 000	1 773	14 189,93	2 838,5
Año 9	1 000	1 773	14 189,93	14 255,9
Año 10	1 000	1 773	14 189,93	25 673,3
Año 11	1 000	1 773	14 189,93	37 090,6
Año 12	6 661	1 773	14 189,93	42 847,0
Año 13	1 000	1 773	14 189,93	54 264,4
Año 14	1 000	1 773	14 189,93	65 681,8
Año 15	1 000	1 773	14 189,93	77 099,2
Año 16	1 000	1 773	14 189,93	88 516,5
Año 17	1 000	1 773	14 189,93	99 933,9
Año 18	1 000	1 773	14 189,93	111 351,3
Año 19	1 000	1 773	14 189,93	122 768,7
Año 20	1 000	1 773	14 189,93	134 186,1
Año 21	1 000	1 773	14 189,93	145 603,4
Año 22	1 000	1 773	14 189,93	157 020,8
Año 23	1 000	1 773	14 189,93	168 438,2
Año 24	1 000	1 773	14 189,93	179 855,6

Adicionalmente, con estos datos se procede a usar un cálculo de VAN, con una tasa de rendimiento aceptable de 10 %, la cual incluye el retorno esperado de 7 % y 3 % de inflación

anual. Con estos datos se obtiene un VAN positivo al traer todos los datos a valor presente, lo que indica que es posible obtener un rendimiento incluso mayor al TMAR esperado. El siguiente extracto es la salida generada por el software del cálculo del VAN de la empresa *Numdea by fleebe*.

#	Años	Cobrospagos	VAN	
1	25	340.560,00 \$	72.213,00 \$	11.093,67 \$

El valor actualizado de los cobros y pagos futuros de la inversión, a la tasa de descuento elegida generará beneficios.

Asimismo, se determina que la tasa interna de retorno para llevar el rendimiento a valor futuro y determinar la tasa interna actual mediante el método TIR, al usar los datos en el mismo software mencionados, genera los siguientes datos:

#	Años	Cobrospagos	Flujos TIR	
1	24	340.536,00 \$	72.213,00 \$	268.323,00 \$ 11.95 %

Se verifica que la tasa interna de retorno es 11,95 % superior al TMAR usado al calcular el VAN, con lo que se establece que el proyecto es totalmente viable.

3.14. Análisis económico del sistema a base de biometano

A diferencia de los sistemas fotovoltaicos, en los que es posible obtener abundante información, en el caso de los sistemas para capturar metano, son más escasos. Para determinar el costo se emplean datos de estudios previos de la Universidad de Costa Rica, la Asociación de Biogás de Costa Rica, y algunos datos del mercado internacional. El costo total de la agroindustria en estudio se resume como sigue:

Tabla No. 18. Análisis financiero de la propuesta basadas en el uso del biometano

Análisis financiero sistemas de biogás				
Energía producida:	740	kwh/mes		
Intercambio con la red	0	%		
Costo de inversión:	7 077	US \$		
Costo equipos de generación	2 270	US \$		
Mantenimiento anual:	200	US \$		
Tipo de cambio	640	¢/US\$		
Costo energía hasta 3000 kwh	96,05	¢/KWh		
Costo energía mayor 3000 kwh	-	¢/KWh		
Costo de potencia	-	¢/KW		
Costo retiro de energía:	0	¢/KWh		
Periodo	Inversión	Costo retiro	Costo evitado	C/B
Año 0	7 077	-	111,06	- 6 077,0
Año 1	200	-	111,06	- 6 165,9
Año 2	200	-	111,06	- 6 254,9
Año 3	200	-	111,06	- 6 343,8
Año 4	200	-	111,06	- 6 432,8
Año 5	200	-	111,06	- 6 521,7
Año 6	200	-	111,06	- 6 610,7
Año 7	200	-	111,06	- 6 699,6
Año 8	200	-	111,06	- 6 788,5
Año 9	200	-	111,06	- 6 877,5
Año 10	200	-	111,06	- 6 966,4
Año 11	200	-	111,06	- 7 055,4
Año 12	2 270	-	111,06	- 9 214,3
Año 13	200	-	111,06	- 9 303,2
Año 14	200	-	111,06	- 9 392,2
Año 15	200	-	111,06	- 9 481,1
Año 16	200	-	111,06	- 9 570,1
Año 17	200	-	111,06	- 9 659,0
Año 18	200	-	111,06	- 9 748,0
Año 19	200	-	111,06	- 9 836,9
Año 20	200	-	111,06	- 9 925,8
Año 21	200	-	111,06	- 10 014,8
Año 22	200	-	111,06	- 10 103,7
Año 23	200	-	111,06	- 10 192,7
Año 24	200	-	111,06	- 10 281,6

Con base en los datos obtenidos se realiza una comparación costo/beneficio con datos sin deflactar y se observa que en ninguno de los periodos es posible recuperar la inversión inicial. El costo de todo el sistema de biogás es de US \$ 7000, aproximadamente, pero el sistema solo sustituye a alrededor de 740 KWh, lo cual, dentro de todo el consumo total, es solo 11 % de la energía total. En caso de emplear el sistema con biometano, el sistema fotovoltaico

puede reducirse en US \$ 6500; pero para la inversión en biogás se requieren los US \$ 7000 antes mencionados, que no se recuperan conforme con el costo-beneficio calculado para este caso. En consecuencia, se determina que no rentable disminuir la cantidad de inversión en los sistemas fotovoltaicos que ya se definieron como un sistema rentable, a cambio de una inversión que no se recupera en biogás. Se nota que para que los sistemas de biogás sean rentables lo que se ha usado ampliamente en Costa Rica es su desarrollo con programas de cooperación no reembolsable por medio de agencias internacionales, o bien, mediante programas de gestión de cuencas hidrográficas, con lo cual se apoya a los sectores agropecuarios con préstamos de sistemas de biodigestores para recuperar el gas sin incurrir en los costos de inversión inicial. En resumen, si la empresa lechera de este estudio emplea sistemas fotovoltaicos se determina, sin lugar a duda, que es una inversión rentable para 100 % de la energía de autoconsumo. Como complemento se puede emplear la red eléctrica como batería virtual para almacenar los excedentes y realizar los retiros de energía en forma posterior, bajo la regulación existente para generación distribuida para autoconsumo, bajo la modalidad neta sencilla.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- a. Los resultados de la investigación determinan que existen fuentes energéticas renovables para que la empresa agroindustrial dedicada a la producción de leche, ubicada en Miravalles de Guanacaste, pueda ser utilizadas para producir electricidad usando fuentes limpias, como energía radiante para instalar sistemas fotovoltaicos, y también se puede capturar biometano como combustible para sustituir gas licuado de petróleo; pero también existen tecnologías para la generación de electricidad a partir de biogás. Los sistemas analizados permiten determinar que sí es posible instalar un sistema basado en sistemas fotovoltaicos con capacidad de 27 KW y, además, la captura de biometano permite usar 28% en uso directo como sustituto directo del GLP por 7.53 m³/día y el 72 % adicional se puede emplear para generar electricidad.

- b. El sistema de generación de electricidad para autoconsumo recomendado para desarrollar el sistema fotovoltaico estaría basado en 90 paneles monocristalinos de 514 watts con dimensiones de 2.06 m X 1.02 m. Con esta tecnología se puede atender una demanda de 6619 KW/h mensual instalados en infraestructura sobre el suelo, dado que la empresa tiene suficiente espacio para concretar el proyecto. El sistema puede estar interconectado a la red de distribución del ICE, la cual tiene la función de respaldo para cuando no se tenga suficiente generación en los sistemas de consumo propio, o bien, para que funcione como batería virtual para depositar los excedentes de electricidad.

- c. En los resultados de la investigación se demuestra que la empresa puede producir 100 % de la energía eléctrica para atender la demanda de electricidad. No obstante, hay que considerar que la principal fuente por utilizar, como es el uso de tecnología fotovoltaica monocristalino, corresponde a una fuente intermitente de energía, es decir, que se depende de las condiciones de la naturaleza, pues no es programable su producción y requiere sistemas de respaldo. En ese sentido se determina que el sistema no debe independizarse de la red de servicio público, debido a que constituye la principal forma de respaldo, tanto para aquellos casos en que se tenga que hacer

inyección de retiro de energía; o bien, que tenga que usarse el servicio eléctrico de la red de la empresa concesionada por el Estado para alimentar la planta agroindustrial cuando no haya energía radiante solar disponible.

- d. Respecto al sistema basado en biogás, los cálculos también indican que los datos de recuperación de metano, los índices de producción recomendados y el ato de 200 animales, se podrían disponer al día de 32 kg de metano diario, es decir, cerca de 27 m³/día durante todo un año. Se puede usar parte del metano para sustituir el uso del GLP, y el resto se puede usar para generar electricidad, para lo que se requiere una inversión de US \$ 7000, aproximadamente, para producir energía de 740 KWh, lo cual dentro de todo el consumo total es solo 11 % de la energía total. No obstante, la inversión en biogás no se recupera conforme con el costo-beneficio calculado para este caso. En consecuencia, se determina que no es rentable el sistema basado en biometano.

- e. El sistema eléctrico requiere tres inversores convertidores de potencia y un sistema de seguridad y protección del sistema para evitar problemas dentro de él. Requiere un medidor bidireccional de energía para contabilizar la electricidad que se entrega a la red y se retira de ella. El sistema completo requiere una inversión inicial de US \$87728 para una vida útil de 25 años, con costos de mantenimiento de \$1000 anuales y con reposición completa de inversores a los 12 años. La inversión es posible recuperarla en el periodo 8+1, es decir, a los 9 años, con una TIR de 11 %.

4.2 Recomendaciones

- a. Conforme con los resultados de la investigación la empresa puede proceder a desarrollar el proyecto y tendrá, de alguna manera, energía casi gratis a partir del año 9, dado que se recupera la inversión en este periodo si se emplea energía fotovoltaica para suplir su propia demanda. No se recomienda desligarse totalmente de la empresa suministradora de energía, dado que la compañía puede usar la red del ICE como sistema de respaldo y batería virtual para entregar excedentes de electricidad. El sistema de banco de baterías aún no es rentable, ya que incrementa en casi 30 % el costo de los equipos por utilizar si emplea el sistema aislado de la red.
- b. Se recomienda realizar investigaciones a fondo con las distintas tecnologías de modulo fotovoltaico, o sea, definir parámetros en el nivel de laboratorio como el de eficiencia energética del ICE para comprobar los datos de las fichas técnicas y sus rendimientos bajo las condiciones climáticas de Costa Rica. El sistema de generación de electricidad para autoconsumo que se recomienda para desarrollar el sistema fotovoltaico estaría basado en 90 paneles monocristalinos de 514 watts, con dimensiones de 2.06 m X 1.02 m. Se basan en los datos técnicos de las fichas, pero no tienen pruebas de laboratorio que puedan hacer más confiables el uso de los datos.
- c. La empresa puede mejorar el rendimiento de la inversión si emplea algún tipo de financiamiento bancario de bajo costo para incentivar el desarrollo de energías renovables para el autoconsumo. Además, debe separar el espacio en la red de distribución para instalar el sistema de 27 MW, ahora que aún hay espacio de penetración con la potencia requerida de la empresa. Si el ICE deniega la solicitud, el sistema no se puede interconectar a la red y podría verse obligada a trabajar conectada a la red de distribución, pero sin entrega de excedentes, y esto implica instalación de sistemas de respaldo con baterías químicas.

- d. Se deberían efectuar más trabajos de investigación sobre el uso potencial del biometano, dado que la investigación determina que sí existe el recurso técnico, que se puede recuperar para usarlo como calor o generación de electricidad; pero es necesario ahondar en los detalles de diseño que no forman parte del alcance de esta investigación, como por ejemplo del diseño del biodigestor, o bien, trabajar con otras disciplinas de índole financiera o ambiental para el análisis de opciones de acceso a recursos no reembolsables, para incentivar el uso de esta tecnología de bajo costo y mitigar los efectos de gases de efecto invernadero por la emisión de biometano a la atmosfera.

Fuentes bibliográficas

AEBIG. (2021). Biometano. Nov. 2021, de Asociación Española de Biogás Sitio web: <https://www.aebig.org/biometano/>

Alonso José. (2015). ¿La Potencia de las Placas Solares es Real? Oct. 2021, de Sun Field Europa Sitio web: <https://www.sfe-solar.com/noticias/articulos/potencia-paneles-solares-real/>

Altec. (2020). Energía Eléctrica Fotovoltaica. Nov. 2021, de Altec Cerramientos Sitio web: <https://altec-cerramientos.com/2020/01/15/energia-electrica-fotovoltaica/>

Agronegocios. (2015). BIODIGESTORES, TECNOLOGÍA QUE PERMITE REUTILIZAR LOS DESECHOS ORGÁNICOS DEL SECTOR AGRO. Oct. 2021, de EDITORIAL LA REPÚBLICA S.A.S Sitio web: <https://www.agronegocios.co/tecnologia/biodigestores-tecnologia-para-reutilizar-desechos-organicos-2621025>

ARESEP. (2021). Nuevas tarifas de generación distribuida. Dic. 2021, de Aresep Sitio web: <https://aresep.go.cr/participacion/noticias/1711-nuevas-tarifas-de-generacion-distribuida>

Auto Solar. (2018). La curva de intensidad-voltaje y la de potencia-voltaje de un panel solar. El papel del regulador de carga. Dic.2021, de Autosolar Energy Solutions SLU Sitio web: <https://autosolar.es/blog/aspectos-tecnicos/la-curva-de-intensidad-voltaje-y-la-de-potencia-voltaje-de-un-panel-solar-el-papel-del-regulador-de-carga>

Barrantes, R. (2016). A la búsqueda del conocimiento científico. San José, CR: Editorial UNED.

Blanco y otros. (2017). Generación de electricidad a partir de biogás capturado de residuos sólidos urbanos: Un análisis teórico-práctico. Nov, 2021, de Banco Interamericano de Desarrollo Sitio web: <https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Generaci%C3%B3n-de-electricidad-a-partir-de-biog%C3%A1s-capturado-de-residuos-s%C3%B3lidos-urbanos-Un-an%C3%A1lisis-te%C3%B3rico-pr%C3%A1ctico.pdf>

Bowden and Honsberg. (2019). Declination Angle. Nov.2021, de Arizona University State Sitio web: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/declination-angle>

CENCE. 2020. Informes y Boletines. Oct.2021, de Instituto Costarricense de Electricidad Sitio web: <https://apps.grupoice.com/CenceWeb/CenceMain.jsf#>

CPS. (2021). El presente y el futuro de la energía solar, una gran alternativa de energía limpia. Junio 2021, de Chint Power Systems Latinoamérica Sitio web: <https://chintpowerlatinoamerica.com/blog/energia-solar/el-presente-y-el-futuro-de-la-energia-solar-una-gran-alternativa-de-energia-limpia/>

Datos Macro. (2017). Aumentan las emisiones de CO2 en Costa Ric. 2019, de expansion.com/ Datosmacro.com Sitio web: <https://datosmacro.expansion.com/energia-y-medio-ambiente/emisiones-co2/costa-rica>

Desconectados. (s.f.). ¿Qué es la Hora Solar Pico (HSP)? Nov.2021, de Desconectados España Sitio web: <https://desconectados.es/que-es-la-hora-solar-pico-hsp/>

Dirección de energía. (2021). Estadísticas de Generación Distribuida. Junio 2021, de Viceministerio de Energía Sitio web: https://energia.minae.go.cr/?page_id=2068

Deublein D., Steinhauser A. 2008. Biogas from waste and renewable resources: An Introduction. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co KGaA, Weinheim. 443 p

Efficiency for energy. (2020). ¿Cuántos tipos de células fotovoltaicas hay? Oct. 2021, de Blog E4E Sitio web: <https://www.e4e-soluciones.com/blog-eficiencia-energetica/cuantos-tipos-de-celulas-fotovoltaicas-hay>

Instituto Meteorológico Nacional. Informe Bienal de Actualización ante la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Primera Edición.2019.

Generatuluz. (2021). Tipos de inversores de corriente y sus características. Nov. 2021, de Generatuluz para autoconsumo Sitio web: <https://www.generatuluz.com/tu-propia-instalacion-aislada/tipos-de-inversores-de-corriente/>

Ministerio de Ambiente y Energía de Costa Rica (2015). VII Plan Nacional de Energía. MINAE.

MINENERGIA / PNUD / FAO / GEF. (2011). MANUAL DE BIOGÁS. Nov. 2021, de Ministerio de Energía de Chile Sitio web: <https://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>

Moncayo Gabriel. (2017). ¿QUE ES EL BIOGÁS? Nov 2021, de AQUALIMPIA ENGINEERING E.K. 29525 Uelzen – Niendorfer Str. 53 b Alemania Sitio web: <file:///C:/Users/Ronny/Downloads/QUE-ES-EL-BIOGAS.pdf>

Numdea. (2021). Calculadora de TIR. Nov. 2021, de Numdea by Fleebe Sitio web: <https://numdea.com/calculadora-de-tir>

Renewables Academy (RENAC) AG. (2017). PV - application. Munich Alemania: Renac.

Ruiz Eva. (2021). La diferencia entra las placas solares monocristalinos y policristalinos. Oct 2021, de Solar Plus España Sitio web: <https://solarplus.es/paneles-solares-policristalinos-monocristalinos>

SEPSE. (2019). Estudio para la caracterización del consumo energético en el sector residencial – Informe Final. Oct.2021, de Universidad de Costa Rica Sitio web: <https://sepse.go.cr/documentos/Estudio-para-la-caracterizacion-del-consumo-energetico-en-el-sector-residencial.pdf>

Sistema costarricense de información jurídica. (2015). Reglamento generación distribuida para autoconsumo con fuentes renovables modelo de contratación medición neta sencilla. Junio 2021, de PGR Sitio web: http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=80310&nValor3=101897¶m2=1&strTipoM=TC&lResultado=3&strSim=simp

Solar light Costa Rica. (2021). Energía Solar. Oct.2021, de Rara Theme. Powered by WordPress. Sitio web: <https://solarlightcostarica.com/energia-solar/>

Solargis. (2017). Mapas de recursos solares de Costa Rica. Oct 2021, de The World Bank, Solar resource data: Solargis Sitio web: <https://solargis.com/es/maps-and-gis-data/download/costa-rica>

Soto Juan. (2021). Comerciantes califican de ‘inaceptable’ solicitud del ICE de aumentar en 20% las tarifas eléctricas en 2022. Oct 2021, de Monumental Sitio web: <https://www.monumental.co.cr/2021/10/12/comerciantes-califican-de-inaceptable-solicitud-del-ice-de-aumentar-en-20-las-tarifas-electricas-en-2022/>

Varnero, M.T. y Arellano, J. 1990. Aprovechamiento racional de desechos orgánicos. Ministerio de Agricultura (FIA). Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Informe Técnico. Santiago, Chile, 98p

Verweij, S. (2014). A Short Introduction to Qualitative Comparative Analysis. 2019, de Department of Public Administration Erasmus University Rotterdam Sitio web: <https://stefanverweij.eu/wp-content/uploads/2015/01/A-Short-Introduction-To-Qualitative-Comparative-Analysis.pdf>

Anexo No. 1

Características técnicas del biometano

¿QUE ES EL BIOGÁS?

Prep.: Dipl. Ing. Gabriel Moncayo Romero (09/2017)

El biogás es un combustible natural, no fósil, de alto poder calorífico dependiente del contenido de gas metano (CH₄). El poder calorífico del biogás es de 4.700 a 5.500 kcal/m³ o 6,27 kWh/m³ dependiendo del contenido de gas metano (CH₄) y puede generar una cantidad de calor equivalente a 22.000 BTU/m³ o 21.5 MJ/m³ (573 BTU por pie cúbico), valor que puede variar entre 19.7 y 23 MJ/m³. Su temperatura de autoignición es similar a la del metano puro y varía de 650 - 750 °C.

Composición del biogás		
Componentes	Unidad	Contenido
Metano	%	50-75
Dióxido de carbono	%	30-45
Nitrógeno	%	1-2
Oxígeno	%	0,1
Sulfuro de hidrogeno	%	0,01-0,40
saturación con vapor de agua	%	80-100

En la tabla siguiente se presentan algunas equivalencias energéticas del biogás.

Equivalencias energéticas 1 m ³ de biogás		
Cantidad equivalente	Tipo de Biomasa o sustrato	Capacidad energética
0,6 kg	de diesel	12 kWh/kg
0,7 kg	carbón	8,5 kWh/kg
0,6 m ³	gas natural	5.3 kWh/m ³
0,24 m ³	gas propano	25 kWh/m ³
1 m ³ biogás	generar electricidad	2,2 kWh

En la tabla siguiente se exponen las características más relevantes del biogás en relación con otros gases.

Características de biogás y comparación con otros gases						
Tipos de gas	Unidad	Biogás	Gas natural	Propano	Metano	Hidrogeno
Poder calorífico	kWh/m ³	6	10	26	10	3
Peso específico	kg/m ³	1,25	0,7	2,01	0,72	0,09
Relación a la densidad del aire		0,9	0,54	1,51	0,55	0,07
Temperatura de encendido	°C	700	650	470	600	585
Contenido de oxígeno para explosión	Vol.-%	6 - 12	4,4 - 15	1,7 - 10,9	4,4 - 16,5	4 - 7

De la lectura de esta tabla se desprende que el biogás tiene un poder calorífico menor que el gas natural y el gas propano, dependiente lógicamente del % de gas metano. Su densidad es de 1,25 kg/m³ y menos pesado que el aire. Esta característica hay que tenerla muy en cuenta cuando se ingresa en zonas en donde haya fugas de biogás, ya que el biogás no se acumula en el suelo, sino que sube a la superficie rápidamente y se mezcla con el aire formando una mezcla explosiva. La temperatura de encendido del biogás es relativamente alta en el orden de 700 °C como promedio. La velocidad de encendido es de 0,25 m/s. Debido al contenido de CO₂ del biogás se puede quemar cuando se mezcla con oxígeno entre un contenido de 6-12%. El propano e hidrógeno requieren de menores porcentajes de oxígeno para encenderse. El contenido de gas metano y dióxido de carbón que se produce de la materia orgánica depende del tipo de sustrato que se aprovecha en el biodigestor.

Contenido de CH ₄ y CO ₂					
Gas	Desechos Agrícolas	Lodos cloacales	Desechos industriales	Rellenos sanitarios	Características
Metano CH ₄	30-80%	40-80%	40-80%	45-65%	Inflamable, inodoro
CO ₂	30-50%	20-50%	30-50%	30-55%	Forma ácido, inodoro, asfixiante
Vapor de agua	Saturación	Saturación	Saturación	Saturación	Corrosivo
H ₂ S	100-3000 ppm	0-1000 ppm	0-5000 ppm	0-10000 ppm	Inflamable tóxico, fetido
Hidrógeno H ₂	0-2%	0-5%	0-2%	0-2%	Inflamable, inodoro
Amoniaco NH ₃	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	Corrosivo, irritante
Nitrógeno N ₂	0-15%	0-3%	0-1%	0-30%	Inerte, inodoro, asfixiante
Oxígeno O ₂	0-1%	0-1%	0-1%	0-5%	Corrosivo
Orgánicos	Trazas	Trazas	0-5 ppm	10 ppm	Corrosivos, olores

En la tabla siguiente se indican las características de los componentes del biogás

Características de los componentes del biogás						
	Unidad	CH ₄	CO ₂	H ₂ S	CO	H
Peso específico	kg/m ³	0,72	1,85	1,44	1,57	0,084
Relación de densidad con el aire		0,55	1,53	1,19	0,97	0,07
Temperatura de encendido	°C	600	-	270	605	585
% de O ₂ para explosión	Vol.-%	4,4 - 16,5	-	4,3 - 45,5	10,9 - 75,6	4-77

El biogás no se quema o explota con facilidad. No se enciende por sí solo, sino que necesita una mezcla de oxígeno-biogás para que encienda. Se debe formar una mezcla homogénea para que se pueda quemar. No se puede encender con un fósforo una fuga de biogás que sale por un hueco de una membrana de cubierta de un biodigestor. El fósforo se apaga inmediatamente al entrar en contacto con el biogás por falta de una mezcla adecuada de oxígeno. Eso sí hay que tener mucho cuidado cuando se escapa el biogás por una rasgadura en la membrana de cubierta o por alguna fuga en un tanque de almacenamiento, cuando este biogás tiene el tiempo suficiente para mezclarse con suficiente oxígeno y alcanza a formar una mezcla explosiva con un contenido de aire de 6-12 %.

INFORMACION CLAVE SOBRE EL BIOGÁS Y OTROS GASES

1 m ³	biogás	energía
1 m ³	biogás	50 - 75 % contenido de metano
1 m ³	biogás	ca. 0,6 l diesel
1 m ³	metano	9,97 kWh energía
1 m ³	metano	poder calorífico 36 MJ/m ³ o 50 MJ/kg
1 m ³	metano	Densidad 0,72 kg/m ³
1 m ³	metano	+ - 1 l diesel

Biogás	22.000	(BTU/m ³)
CH ₄	47.390	(BTU/kg)
Bunker C	41.025	(BTU/kg)
GLP	47.222	(BTU/kg)
Gas natural	36.000	(BTU/m ³)
Gas natural	38.500	(BTU/kg)
Ethanol	20.105	(BTU/kg)
Diesel 2	40.700	(BTU/kg)
Biodiesel	31.964	(BTU/kg)
Gasolina	41.844	(BTU/kg)
Propano	47.438	(BTU/kg)
Methanol	15.057	(BTU/kg)

APROVECHAMIENTO DEL BIOGÁS

El aprovechamiento del biogás comprende su uso como combustible para la generación de energía eléctrica en generadores y turbinas o para la producción de vapor en calderas. Un m³ biogás que se aprovecha en un generador de energía eléctrica es suficiente para generar un estimado de 2,2 kWh¹ de electricidad. La producción de electricidad depende considerablemente de la eficiencia de los equipos que se utilizan para el aprovechamiento del biogás. Por ejemplo, si se tiene una producción de biogás de 1000 m³/día se podría instalar un generador de 92 kW. En la práctica se instalaría un generador de 100 kW. El biogás tiene un poder calorífico de 22.000 BTU/m³. Comparando con el bunker C que se utiliza como combustible en calderas, puede reemplazar un estimado del 53-55 % de su poder calorífico. El biogás puede ser aprovechado en cualquier tipo de calderas cambiando el quemador y el ingreso de aire (oxígeno) para la combustión del biogás.

Anexo 2: Ejemplo de ficha técnica del panel comercial fotovoltaico monocristalino

LG NeON[®] 2 BiFacial

LG NeON[®] 2 BiFacial: ¡DESENCADENA LA FUERZA!

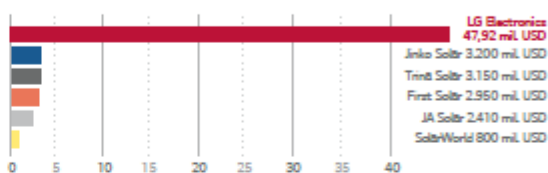
El módulo LG NeON[®] 2 BiFacial se basa en el conocido módulo de alto rendimiento LG NeON[®] 2. Gracias a sus 72 células monocristalinas de alta eficiencia, los módulos LG395N2T-A5 alcanzan ya en el frontal una potencia base de 395 vatios pico (Wp). Mediante la implantación de células bifaciales y de una lámina trasera transparente, ahora la potencia del módulo solar LG NeON[®] 2 con tecnología CELLO puede aprovecharse por completo. Y gracias al beneficio adicional del módulo trasero («bonus bifacial»), el rendimiento total del LG NeON[®] 2 BiFacial alcanza hasta 514 W en condiciones óptimas.

GARANTE LOCAL CON COBERTURA GLOBAL

LG Solar pertenece a LG Electronics, por lo que forma parte de una empresa de gran capacidad financiera a escala global con más de 50 años de tradición y experiencia.

Recuerde: LG Electronics es el garante de sus módulos solares. Además, LG Electronics lleva décadas presente en Europa con sucursales locales.

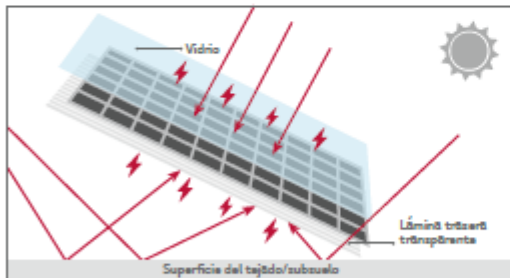
Nuestra facturación en 2016 en millones de USD



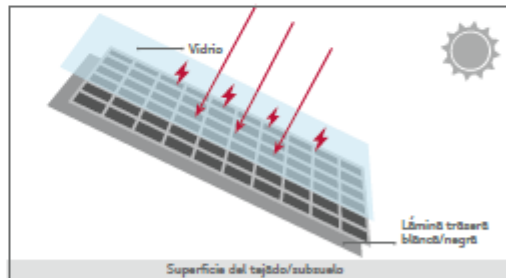
LG NeON[®] 2 BiFacial: ¡BONIFICACIÓN!

Las células y módulos tradicionales de una sola cara solo pueden absorber luz y transformarla en corriente a través de su frontal. El LG NeON[®] 2 BiFacial, en cambio, cuenta con células activas por ambos lados y una lámina trasera que deja pasar la luz. Gracias a ello es posible utilizar la luz incidente tanto en la parte frontal como en la trasera, y por consiguiente aumentar la ganancia de energía en hasta un 30% frente a los módulos tradicionales monofaciales con el mismo rendimiento nominal.

Módulo bifacial



Módulo monofacial



RENDIMIENTO SUPERIOR CON 25 AÑOS DE GARANTÍA LG DE PRODUCTO Y PRODUCCIÓN

Garantía de producto ampliada

25 años

Garantía de rendimiento lineal: 25 años*

* 1) El primer año: 98% del rendimiento nominal.
2) A partir del primer año: 0,5% de degradación anual.
3) 86% entre 25 años.

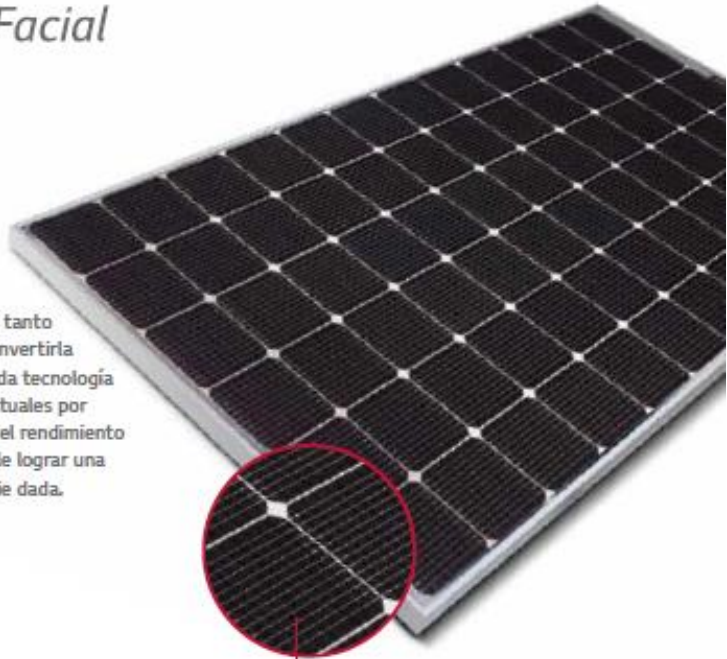


LG NeON[®] 2 BiFacial

LG395N2T-A5 | LG390N2T-A5

72 células

El módulo LG NeON[®] 2 BiFacial puede absorber luz tanto por el módulo frontal como por el trasero para convertirla en corriente. Estos módulos incorporan la premiada tecnología CELLO, que sustituye las 4 barras colectoras habituales por 12 alambres finos e incrementa aún más con ello el rendimiento y la fiabilidad. Con el LG NeON[®] 2 BiFacial es posible lograr una ganancia muy superior a la media en una superficie dada.



: Tecnología CELLO
: Lámina trasera transparente

CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES



Garantía de rendimiento ampliada de 25 años

Los módulos LG NeON[®] 2 BiFacial tienen una garantía de rendimiento lineal ampliada con una degradación anual máxima de -0,5%. LG garantiza con ella, como mínimo, el 86 % del rendimiento nominal incluso tras 25 años.



Mejor rendimiento en días soleados

Gracias a los coeficientes de temperatura mejorados, el rendimiento de los módulos NeON[®] 2 BiFacial en días soleados es más alto que el de los módulos tradicionales.



Potencia suministrada elevada

Los módulos LG NeON[®] 2 BiFacial están equipados con la nueva tecnología CELLO de LG. La eficiencia de las células traseras es inferior a las delanteras en cifras prácticamente insignificantes.



Ganancia de energía por ambos lados

En condiciones óptimas, es posible incrementar la ganancia de energía de los módulos bifaciales en hasta un 30% con respecto a los módulos tradicionales.



Mayor rendimiento también en nublado

Los módulos LG NeON[®] 2 BiFacial también generan más energía en días nublados gracias a su excelente funcionamiento en condiciones de poca luz.



Casi sin LID (degradación inducida por luz)

Las células tipo n utilizadas por LG apenas contienen boro y evitan gracias a ello la habitual pérdida de potencia inicial de los módulos tradicionales.

Acércate de LG Electronics

LG es una empresa con presencia internacional que expande sus actividades en el mercado de la energía solar. La compañía elaboró por primera vez en 1985 un programa de investigación de energía solar en el que su tiempo experimentó en los campos de los semiconductores, la tecnología LCD, la química y la fabricación de materiales resultó de gran ayuda. En 2010, LG Solar lanzó con éxito al mercado su primera serie Mono[®], que actualmente se comercializa en 32 países. En 2013, 2015 y 2016, los módulos LG NeON[®] (antiguamente Mono[®] NeON), NeON[®]2 y NeON[®]2 BiFacial fueron galardonados con el premio cívico AWARDS, lo cual demostró el liderazgo de LG en el sector, su capacidad de innovación y su compromiso.

Propiedades eléctricas (STC¹)

Módulo	LG395N2T-A5	Rendimiento adicional bifacial ²				LG390N2T-A5	Rendimiento adicional bifacial ²				
		5%	10%	20%	30%		5%	10%	20%	30%	
Potencia máxima (P _{máx})	[W]	395	415	435	474	514	390	410	429	468	507
Voltaje MPP (V _{mpp})	[V]	41,8	41,8	41,8	41,9	41,9	41,4	41,4	41,4	41,5	41,5
Corriente MPP (I _{mpp})	[A]	9,46	9,92	10,39	11,31	12,26	9,43	9,90	10,36	11,28	12,22
Tensión en circuito abierto (V _{oc})	[V]	49,3	49,3	49,3	49,4	49,4	49,2	49,2	49,2	49,3	49,3
Corriente de cortocircuito (I _{sc})	[A]	10,19	10,70	11,21	12,23	13,25	10,15	10,15	11,17	12,18	13,20
Factor de eficiencia del módulo	[%]	18,7	19,6	20,6	22,4	24,3	18,5	19,4	20,3	22,1	24,0
Temperatura de funcionamiento	[°C]	-40 ~ +90									
Tensión máxima del sistema	[V]	1000									
Corriente nominal del fusible en serie	[A]	20									
Coefficiente bifacial P _{máx} ⁴	[%]	76									
Tolerancia de potencia (%)	[%]	0 ~ +3									

¹ STC (Standard Test Condition/Condiciones estándar de prueba): irradiación 1.000 W/m², temperatura del módulo 25°C, AM 1,5. LG Electronics no garantiza la exactitud de los datos eléctricos.
² Según la altura de montaje y el ángulo del subsuelo.
³ LG garantiza un coeficiente bifacial P_{máx} de 76% durante 25 años basado en la garantía de potencia de célula frontal, con una tolerancia de ±7%.

Propiedades mecánicas

Células	6 x 12
Fabricante	LG
Tipo de célula	Monocristalina tipo N
Dimensiones de la célula	161,7 x 161,7 mm
Barras colectoras	12
Medidas (largo x ancho x alto)	2.064 x 1.024 x 40 mm
Máxima capacidad de carga	5.400Pa 4.300Pa
Peso	22,0 kg
Conector, tipo	MC4
Tomá de conexión	IP68 con 3 diodos de pila
Cable de conexión, longitud	2 x 1.200 mm
Cubierta frontal	Vidrio templado de alta transparencia
Marco	Aluminio anodizado

Certificados y garantías

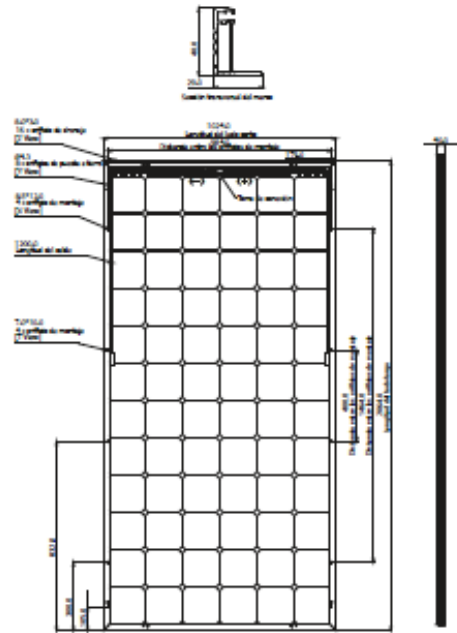
Certificados	IEC 61215, IEC 61730-1/-2
	IEC 62716 (Ensayo de resistencia a la corrosión por amoníaco)
	IEC 61701 (Ensayo de resistencia a la corrosión por niebla salina)
	ISO 9001
Resistencia al fuego de los módulos	Clase C
Garantía del producto	25 años
Garantía de potencia por P _{máx} (Tolerancia de medición ±2%)	25 años de garantía lineal ¹

¹ 1) El primer año: 98%. 2) A partir del primer año: 0,5% de degradación anual.
 3) 96% entre 25 años.

Coefficiente de temperatura

NOCT	[°C]	45 ± 3
P _{mpp}	[%/°C]	-0,36
V _{oc}	[%/°C]	-0,27
I _{sc}	[%/°C]	0,03

Medidas (mm)



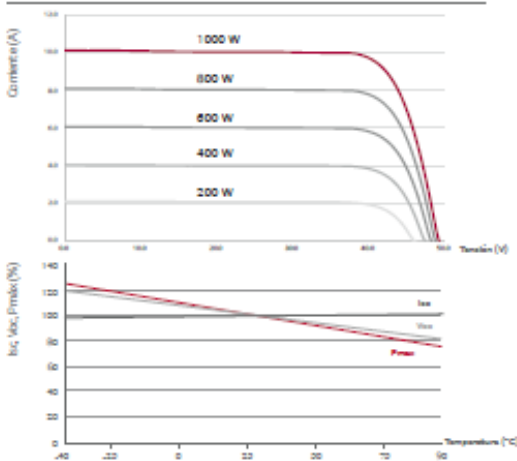
La distancia medida entre los puntos centrales de los orificios de montaje y puesta a tierra.

Propiedades eléctricas (NOCT¹)

Módulo	LG395N2T-A5	LG390N2T-A5	
Potencia máxima (P _{máx})	[W]	292	289
Tensión MPP (V _{mpp})	[V]	38,7	38,3
Corriente MPP (I _{mpp})	[A]	7,55	7,54
Tensión de circuito abierto (V _{oc})	[V]	46,0	45,9
Corriente de cortocircuito (I _{sc})	[A]	8,2	8,17

¹ NOCT (Temperatura nominal de funcionamiento de la célula solar): irradiación 800 W/m², temperatura ambiental 20 °C, velocidad del viento 1 m/s.

Curvas características





LG Electronics Deutschland GmbH
 EU Solar Business Group
 Alfred-Herrhausen-Allee 3-5
 65760 Eschborn, Alemania
 E-Mail: soltr@lge.de
 www.lg-soltr.com/es

Todos los datos de esta hoja de datos cumplen la norma DIN EN 50380.
 Sujeto a modificaciones y errores.
 Actualización: 05/2018
 Documento: DS-N2T-A5-ES-201805

Copyright © 2018 LG Electronics. Todos los derechos reservados.



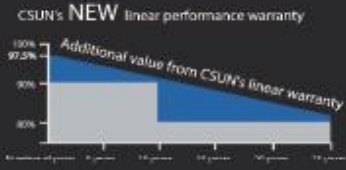
Anexo 3: Ejemplo de ficha técnica del panel comercial fotovoltaico policristalino.






**Powerguard Insurance
Global Coverage**

The power output shall not be less than 97.5% of the minimum power output stated in the product data sheet in the first year of the product's life cycle. The loss of power output shall not exceed 0.7% per year thereafter, ending with 80.7% in the 25th year.

■ CSUN ■ Standard warranty



CSUN320-72P

Premier choice for large scale project

Module Fire Performance: Type 1 (UL 1703)
Fire Resistance Rating: Class C (IEC 61730)







CSUN320-72P	CSUN315-72P
CSUN310-72P	CSUN305-72P
CSUN300-72P	

16.52%
Module efficiency

320 W
Highest power output

10 years
Material & workmanship warranty


25 years
Linear power output warranty

-  Industry leading conversion efficiency
-  Positive tolerance offer
-  Passed salt mist & ammonia corrosion, blowing sand and hail testing
-  Certified to withstand wind (2400 Pa) and snow load (5400 Pa)
-  Excellent performance under weak light condition
-  Good temperature coefficient enables better output in hot climates


- China Sunergy Co., Ltd. designs, manufactures and delivers high efficiency solar cells and modules to the world from its production centers based in China, Turkey, South Korea and Vietnam.
- Founded in 2004, China Sunergy is well known for its advanced solar cell technology, reliable product quality, and excellent customer service.
- As one of leading PV enterprises, China Sunergy has delivered more than 4.0GW of solar products to residential, commercial, utility and off-grid projects all around the world.

* Note: All specifications, warranties, certifications about module of „CSUN“ series also apply to that of „SST“.

All information and data are subject to change without notice and are provided without liability.



www.csun-solar.com



All rights reserved by CSUN
Version: 2/2014-ENG

Electrical Characteristics at Standard Test Conditions (STC)

Module Type	CSUN 320-72P	CSUN 315-72P	CSUN 310-72P	CSUN 305-72P	CSUN 300-72P
Maximum Power - P _{mpp} (W)	320	315	310	305	300
Positive Power Tolerance	0~3%	0~3%	0~3%	0~3%	0~3%
Open Circuit Voltage - Voc (V)	45.0	44.9	44.8	44.7	44.5
Short Circuit Current - Isc (A)	9.17	9.11	9.03	8.97	8.91
Maximum Power Voltage - V _{mpp} (V)	36.2	36.1	36.0	35.9	35.8
Maximum Power Current - I _{mpp} (A)	8.84	8.73	8.61	8.50	8.37
Module Efficiency	16.52%	16.27%	16.01%	15.75%	15.49%

Electrical data relates to standard test conditions (STC): irradiance 1000W/m²; AM 1.5; cell temperature 25°C; measuring uncertainty of power is within ±3%. Certified in accordance with IEC61215, IEC61730-1/2 and UL 1703

Electrical Characteristics at Nominal Operating Cell Temperature (NOCT)

Module Type	CSUN 320-72P	CSUN 315-72P	CSUN 310-72P	CSUN 305-72P	CSUN 300-72P
Maximum Power - P _{mpp} (W)	235	232	228	225	220
Maximum Power Voltage - V _{mpp} (V)	34.1	33.8	33.5	33.2	32.9
Maximum Power Current - I _{mpp} (A)	6.89	6.86	6.80	6.77	6.71
Open Circuit Voltage - Voc (V)	41.6	41.5	41.4	41.3	41.1
Short Circuit Current - Isc (A)	7.40	7.34	7.30	7.24	7.19

Electrical data relates to nominal operating cell temperature (NOCT): irradiance 800W/m²; wind speed 1 m/s; cell temperature 45°C; ambient temperature 20°C; measuring uncertainty of power is within ±3%

Temperature Characteristics

Voltage Temperature Coefficient	-0.292%/K
Current Temperature Coefficient	+0.045%/K
Power Temperature Coefficient	-0.408%/K

Maximum Ratings

Maximum System Voltage (V)	1000
Series Fuse Rating (A)	20
Reverse Current Overload (A)	27

Mechanical Characteristics

Dimensions	1956 x 990 x 50 mm
Weight	22.3 kg
Frame	Anodized aluminum profile
Front glass	Toughened low iron glass, 3.2 mm
Cell Encapsulation	EVA (Ethylene-Vinyl-Acetate)
Back Sheet	Composite film
Cells	6x12 polycrystalline solar cells (4BB or 5BB 156 X156mm)
Junction Box	Rated current ≥ 12A, IP ≥ 65, TUV & UL
Cable	Length 900 mm, 1 x 4 mm ²
Connector	MC 4/ compatible with MC 4

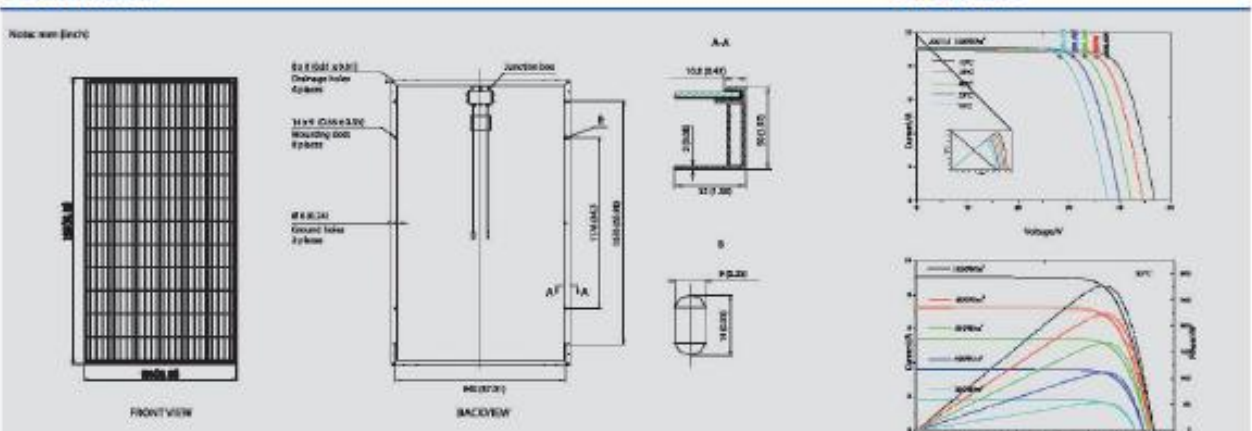
Packaging

Container 20'	252 pcs.
Container 40'	504 pcs.
Container 40'HC	552 pcs.

System Design

Temp. Range	-40°C to + 85°C
Hail	Max. diameter of 25mm with 23m/s impact speed
Max. Capacity	Snow 5400 Pa, wind 2400 Pa
Application Class	A
Safety Class	II

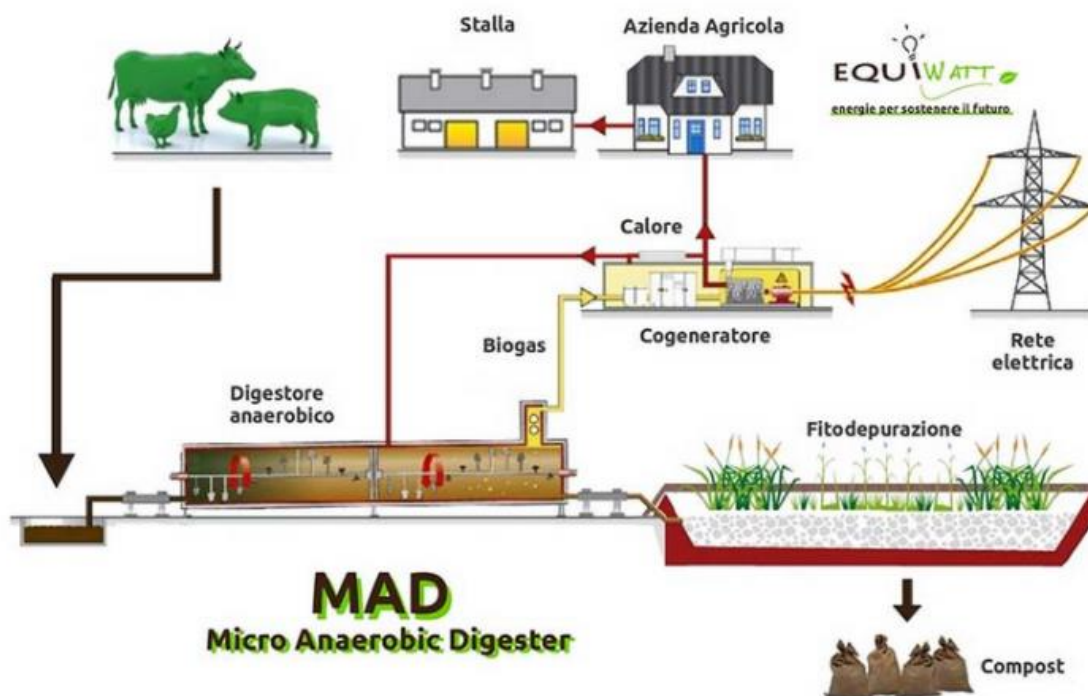
Dimensions



Anexo 4: Ejemplo de un sistema de generación eléctrica a base de biogás para pequeña escala

La aplicación del producto

Un generador de biogás es un reactor o sistema de procesamiento químico diseñado para descomponer orgáneamente materiales de origen biológico en gases como el metano y el hidrógeno que pueden combinarse con oxígeno para su uso como fuente de combustible. Muchos tipos de residuos se pueden utilizar para generar biogás, incluyendo desechos y estiércol, residuos de plantas de campos de cultivo, prados residenciales, parques y más.



Los detalles



Motor de Gas	
Modelo	ND68D6
Tipo de	Cuatro tiempos, refrigeración por agua, ignición electrónica (CU), estequiométrico
Potencia nominal	60kW
Velocidad nominal	1500/1800rpm
Regulación de	Electrónica
Cilindro de cantidad	1 6
Diámetro * carrera	105*130mm
Desplazamiento	6.75L
El gas combustible de	2kPa. 50kPa
El gas combustible de	Biogás

