



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Programa Único de Especializaciones de Ingeniería

ESPECIALIZACIÓN: AHORRO Y USO EFICIENTE DE ENERGÍA

EVALUACIÓN ENERGÉTICA DEL CENTRO DE ACOPIO DE NOPAL
Y VERDURA Y DEL BIODIGESTOR ASOCIADO

TESINA

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE ESPECIALISTA EN AHORRO Y
USO EFICIENTE DE ENERGÍA

PRESENTA:

RAUL ORESTE CATALAN MARIN

DIRECTOR DE TESINA:

DR. RODOLFO ALBERTO HERRERA TOLEDO



Programa Único de
Especializaciones de Ingeniería

CIUDAD UNIVERSITARIA, D.F. JUNIO DEL 2017

Jurado

Presidente: M. EN I. AUGUSTO SÁNCHEZ CIFUENTES

Primer vocal: DR. RODOLFO ALBERTO HERRERA TOLEDO

Segundo vocal: M. EN I. VERÓNICA FLORES GARCÍA

Tercer vocal: M. EN I. JOSÉ ENRIQUE MORALES SAHAGÚN

Secretario: M. EN I. JUDITH CATALINA NAVARRO GÓMEZ

CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO D.F

TUTOR DE TESINA: DR. RODOLFO ALBERTO HERRERA TOLEDO

Agradecimientos

A mi familia, por estar siempre dándome su apoyo. También quiero agradecer a todo el cuerpo docente y compañeros del Programa *Ahorro y Uso Eficiente de Energía*. Además a la empresa Sustentabilidad en Energía y Medio Ambiente SA de CV por el apoyo e información proporcionada para la culminación del presente trabajo. Por último, a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México. ¡Gracias!

Índice

Lista de Figuras	1
Lista de Tablas	2
Resumen	3
Introducción	4
Planteamiento del problema	5
Justificación del problema	5
Hipótesis	5
Objetivo General	5
Capítulo 1 Generalidades	
1.1.- Revisión bibliográfica sobre eficiencia energética en mercados públicos	7
1.2.- Generalidades de eficiencia energética en mercados públicos	8
1.3.- Marco regulatorio de los mercados públicos	10
1.4.- Revisión bibliográfica sobre digestión anaerobia	12
1.5.- Generalidades del proceso de digestión anaerobia	13
Capítulo 2 Diagnóstico Energético del Centro de Acopio de Nopal - Verdura	
2.1.- Diagnóstico energético	19
2.2.- Recopilación de datos energéticos	21
2.3.- Análisis de la factura de la energía eléctrica	28
2.4.- Matriz energética	31
2.5.- Indicador energético	33
2.6.- Medidas de ahorro de energía eléctrica	34
Capítulo 3 Metodología para Evaluación Energética del Biodigestor	
3.1.- Procedimiento para la evaluación energética del biodigestor	39
3.2.- Evaluación energética del biodigestor	42
3.3.- Balance de energía del biodigestor	46

Capítulo 4	Uso del Biogás en Equipo de Cogeneración	
4.1.-	Tecnologías utilizadas para cogeneración	50
4.2.-	Secuencia de estudio de pre factibilidad técnico-económica	52
4.3.-	Selección de equipo de cogeneración	58
4.4.-	Costos y beneficios	62
4.5.-	Evaluación económica	65
	Conclusiones y recomendaciones	69
	Bibliografía	70

Lista de Figuras

Número de Figura	Nombre de la Figura	Página
1	Vista aérea del Centro de Acopio y Comercialización de Nopal-Verdura en Milpa Alta	19
2	Vistas del interior del Centro de Acopio y Comercialización de Nopal-Verdura en Milpa Alta	20
3	Lay Out CANV y señalamiento de intensidad energética	21
4	Distribución del consumo de energía eléctrica	26
5	Condensador enfriado por aire de refrigerador de bebidas	27
6	Perfil de potencia del Centro de Acopio Nopal-Verdura	27
7	Perfil de consumo de energía promedio diario y demanda máxima mensual	30
8	Evolución del precio de la energía en tarifa OM	31
9	Oportunidades de eficiencia energética; cambio de lámparas de menor consumo energético y mantenimiento de equipos de refrigeración	36
10	Evolución del consumo de energía. Línea verde consumo de energía centro de acopio después de sustitución de lámparas fluorescentes por led	37
11	Esquema de sistema de cogeneración y biodigestor	39
12	Diagrama de flujo del sistema para la realización de balance de energía	47
13	Presión parcial del vapor de agua en el biogás como una función de temperatura y humedad relativa del biogás. Las unidades de la figura son mbar y °C para el eje vertical y horizontal respectivamente.	54
14	Densidad de Metano (CH ₄) como una función de presión y temperatura del biogás. Las unidades de la figura son mbar y kg/m ³ para el eje vertical y horizontal respectivamente	55
15	Valor calorífico de biogás como una función de la densidad y volumen de % promedio de su contenido de CH ₄ ($\rho=0.72$ es la densidad a condiciones normales). Las unidades de la figura son kg/m ³ y kJ/m ³ para el eje vertical y horizontal respectivamente	55
16	Perfil de consumo de energía eléctrica del sistema de iluminación del Centro de Acopio Nopal-Verdura	57
17	Motor de combustión interna de la marca mopesa® e intercambiador de calor de la empresa Eficiencia Thermoe®	59

18	Esquema de cogeneración interactuando con el biodigestor	60
19	Perfil de temperatura en un tanque de almacenamiento térmico	61

Lista de Tablas

Número de Tabla	Nombre de la Tabla	Página
1	Relación de mercados públicos en el Distrito Federal	8
2	Normas con relación a la energía que aplican a un mercado público	10
3	Tipos de biomasa para digestión anaerobia	15
4	Condiciones de temperatura en proceso de digestión anaerobia	16
5	Matriz de identificación de intensidad energética	22
6	Relación de equipos instalados	23
7	Resumen de datos del recibo de energía eléctrica	28
8	Recopilación de datos de facturación de la energía eléctrica	29
9	Relación de equipos de consumo de gas LP	32
10	Matriz energética y costos diarios	32
11	Recopilación de datos de consumo y costo de energía	33
12	Especificaciones de luminarias de tipo LED	34
13	Lista de mediciones para llevar a cabo la evaluación energía	40
14	Comparación de tecnologías de cogeneración	50
15	Especificaciones del biogás	53
16	Datos de carga de iluminación del Centro de Acopio	56
17	Requerimientos de energía	58
18	Balance energético	65

Resumen

En este trabajo, se hizo una evaluación energética del centro de acopio y de la planta de tratamiento de residuos orgánicos de nopal verdura. El estudio también permitió determinar un sistema de cogeneración con la valorización del biogás como combustible para contribuir en las necesidades de energía eléctrica y calor en las instalaciones del centro de acopio y del proceso de digestión anaerobia.

Introducción

Ante la escasez de recursos energéticos convencionales se requiere hacer un uso cada vez más eficiente de energía. El Programa Especial para el Aprovechamiento de Energías Renovables 2013-2018 dentro del objetivo 5 plantea la estrategia 5.2 que es impulsar el aprovechamiento térmico de pequeña y gran escala y a su vez la línea de acción 5.2.1 diagnosticar y promover la generación y cogeneración distribuida en centros urbanos para llevar energía a centros de consumo de energía térmica y eléctrica¹.

Los mercados públicos son lugares de comercio al por menor en donde se encuentran alimentos de la canasta básica y que sirve de dieta de muchos habitantes. En el Distrito Federal, se encuentran dos tipos de mercados públicos; el de tipo general y los de corte especializado. Y uno de estos lugares de venta es el Centro de Acopio de Comercialización de Nopal-Verdura, ubicado en Villa de Milpa Alta, en la Delegación de Milpa Alta. El Centro de Acopio de Nopal-Verdura (CANV) se creó en el año 2000 para atender la constante producción de nopal en la delegación de Milpa Alta que hasta el día de hoy tiene una producción del 30 % del nopal que se comercializa a nivel nacional., además se estima que es más de 250.000 toneladas por año y se comercializan alrededor de 150 toneladas diariamente y por cerca de más de 5.000 productores.²

Los centros de abasto y mercados públicos son una de las edificaciones en donde se conjuga una demanda de energía y a su vez una generación de residuos orgánicos. Por lo que se busca la forma de dar un provecho a los residuos orgánicos para transformarlos en fuentes de energía. Una de ellas es por medio de un proceso de digestión anaerobia y obtención de biogás para que a través de un sistema de cogeneración, se pueda generar electricidad y calor.

La presente propuesta es relevante puesto que se inserta en el campo de la mitigación, en este sentido, cabe señalar que México ha fijado metas sobre la reducción de emisiones de gases efecto invernadero, hacia 2020 y 2050. Prácticas de ahorro y uso eficiente de energía

¹ (Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018. Programa Especial Para El Aprovechamiento De Energías Renovables, 2013)

² (<http://www.economiahoy.mx/cultura-eAm-mx/noticias/6649092/04/15/Nopal-el-oro-verde-de-la-produccion-agricola-en-Milpa-Alta.html>, 2016)

pueden contribuir enormemente a alcanzar esas metas, especialmente en el caso de usuarios con un alto consumo de energía.

Planteamiento del problema

La actividad de venta de nopal-verdura y verdura en el Centro de Acopio de Comercialización de Milpa Alta, genera entre 9 y 10 toneladas de residuos orgánicos³ que en su mayoría se compone de nopal-verdura, esto debido al acondicionamiento del nopal-verdura, por ejemplo, a este le quitan las espinas y la orilla con un cuchillo y se recolectan en canastas y ambos residuos; nopal-verdura y verdura se llevan a un contenedor. Y posteriormente a un centro de disposición.

Justificación del problema

Se sabe que una de las fuentes de emisión de gas metano es en los centros de disposición a cielo abierto o vertederos. El gas metano (CH₄) es un “gas de efecto invernadero”, lo que significa que su presencia en la atmosfera afecta la temperatura y el clima de la tierra. Después del dióxido de carbono (CO₂), el metano ocupa el segundo lugar en cuanto a gases de efecto invernadero causados por actividad humana. Dado que el biogás puede tener una considerable cantidad de gas metano entonces se vuelve importante aprovechar su poder calorífico para generar electricidad y calor.

Hipótesis

Se tiene una materia prima en forma abundante y continúa y que al aprovechar los residuos orgánicos es posible generar biogás en un biodigestor anaerobio y es posible producir energía eléctrica y que esta energía sirva para las operaciones diarias del proceso de biodigestión anaerobio y centro de acopio y con ello cubrir las necesidades por ejemplo de iluminación, movimiento de fluidos y energía térmica.

Objetivo General

³ (<http://www.paginaciudadana.com/en-centro-de-acopio-de-milpa-alta-al-menos-tres-toneladas-se-procesaran-en-biodigestor/>, 2016)

Este trabajo tiene como objetivo desarrollar un estudio energético del Centro de Acopio Nopal – Verdura y del biodigestor asociado a una planta de tratamiento de residuos orgánicos.

Por lo tanto, se plantean los siguientes objetivos particulares:

- Determinar el uso y consumo de energía eléctrica del Centro de Acopio de Nopal-Verdura.
- Determinar los requerimientos de energía térmica y eléctrica para operación de la digestión anaerobia.
- Hacer un balance energético del biodigestor anaerobio.
- Cuantificar el beneficio económico y ambiental desde el punto de vista de energía.
- Realizar un estudio de pre factibilidad para implementar un sistema de cogeneración que utiliza el biogás como combustible a través de descomposición anaerobia de residuos orgánicos de nopal-verdura.

Capítulo 1 Generalidades

En este capítulo se hace una revisión bibliográfica sobre trabajos hechos en el tema de eficiencia energética en centros de abasto y mercados públicos con énfasis en la valorización energética de los residuos orgánicos y su transformación en una forma de energía a través de la tecnología de digestión anaerobia. Además, se proporciona una introducción al proceso de digestión anaerobia.

1.1 Revisión bibliográfica sobre eficiencia energética en mercados públicos

Se presentan estudios, desarrollos y/o tecnologías realizados sobre eficiencia energética en mercados de abasto y la producción de biogás a través la digestión anaerobia con sustrato de nopal. Se buscó información en libros y revistas electrónicas de la base de datos de la biblioteca Central, UNAM y también se buscó información en la *internet* y en la página *web* de fabricantes, asociaciones e instituciones gubernamentales del país que tienen relación con la energía renovable con énfasis en aprovechamiento de la biomasa.

Los centros de abasto y mercados públicos son una de las edificaciones en donde se conjuga una demanda de energía y a su vez una generación de residuos orgánicos. Por lo que se busca la forma de dar un provecho a los residuos orgánicos para transformarlos en fuentes de energía. Por ejemplo, la Universidad de Guanajuato y la Central de Abastos de Irapuato llevaron a cabo la construcción de un biodigestor tipo bolsa para procesar residuos de fruta y hortaliza. El biodigestor tiene una capacidad de producción de biogás de 700 m³ y 0.5 toneladas de abono⁴.

La Central de Abastos de la Ciudad de México es la más amplia infraestructura para abasto de alimentos en el País. En esta se generan 780 toneladas de residuos orgánicos al día. Tovar Gálvez, Raúl *et al*⁵, construyeron un prototipo de reactor anaerobio con una capacidad de 180 litros, y capaz de procesar 40 kg de residuo orgánico y una producción

⁴ (<http://www.ugto.mx/noticias/noticias/7756-transforma-ug-desechos-de-la-central-de-abastos-en-energia.>, 2016)

⁵ (<http://academica.mx/#/noticia/ipn-podria-convertir-residuos-organicos-en-gas-y-electricidad.> , 2016)

de 6 m³ de biogás. Las características del reactor son: condición termofílica, agitación y la obtención de la energía calorífica por medio de calentadores de agua por energía solar. El investigador comenta que pretende escalar a los requerimientos de la central de abastos, es decir, a un sistema de biodigestión anaerobia para procesar 50 toneladas de residuo orgánico al día y producir 7.200 m³ de biogás, equivalente a una potencia eléctrica de 600 a 700 kW, sin embargo, en el portal de la central de abastos no se menciona algún proyecto para llevar a cabo dicha implementación por parte de las autoridades de la central de abastos⁶

Durante la revisión de estudios se pudo constatar que en el caso de México son pocos los trabajos que realicen un análisis técnico detallado que describa el aprovechamiento de la fracción orgánica procedente de centros de abasto y mercados públicos. Lo anterior pone en evidencia la existencia de un área de oportunidad que puede contribuir a la línea de acción de mitigación.

1.2 Generalidades de eficiencia energética en mercados públicos

Los mercados públicos son tradicionalmente lugares de comercio que satisfacen las necesidades de muchos habitantes del Distrito Federal, y donde principalmente se encuentran alimentos de la canasta básica que sirve de dieta a muchos mexicanos. En la Ciudad de México se encuentran dos tipos de mercados públicos; el tradicional y el especializado. La Secretaría de Desarrollo Económico (SEDECO) tiene registrados 329 mercados y una cifra mayor a 70.000 locales⁷.

Tabla 1 Relación de mercados públicos en el Distrito Federal

Delegación Política	No. Mercados	Locales	% total de mercados
Álvaro Obregón	16	1.876	4,9
Azcapotzalco	19	3.537	5,8
Benito Juárez	16	3.723	4,9
Coyoacán	22	3.542	6,7
Cuajimalpa	5	405	1,5

⁶ (<http://ficeda.com.mx/proyectos.html>, 2016)

⁷ (http://rincondegrandesbatallas.com/SEDECO/comercio_02departamentales.html, 2016)

Cuauhtémoc	39	14.248	11,9
Gustavo A. Madero	51	9.994	15,5
Iztacalco	16	3.145	4,9
Iztapalapa	20	3.027	6,1
Magdalena Contreras	5	354	1,5
Miguel Hidalgo	19	6.671	5,8
Milpa Alta	9	743	2,7
Tláhuac	19	1.464	5,8
Tlalpan	20	1.483	6,1
Venustiano Carranza	42	15.501	12,8
Xochimilco	11	2.298	3,3
Total	329	72.011	100,0

Fuente: http://www.sedecodf.gob.mx/archivos/Politica_de_Proteccion_Mercados_Publicos.pdf

El mercado público opera bajo el esquema de ventas al menudeo. Manejan productos de la canasta básica y está organizado en áreas según el producto. Comercio seco y fresco; abarrotes, misceláneas, semillas, frutas frescas, chiles. Comercio húmedo; carnicerías, pollerías, salchicherías, legumbres y verduras, plantas. Bodegas de almacenamiento y cámaras frigoríficas. Comidas y antojitos, refresquerías, neverías, juguerías, entre otros. Servicios generales; andenes para carga y descarga, zona de lavado, baños y vestidores para empleados, sanitarios, subestación, local para basura y patío de maniobras.

La eficiencia energética tiene diferentes propósitos entre los cuales se encuentra disminuir el consumo de energía sin que se afecte la calidad del servicio e inclusive se puede mejorar el mismo. En lo que respecta a los mercados públicos y centros de abasto, y en el contexto de eficiencia energética o cualquier norma que pudiera ser vinculada la presente investigación dio cuenta que los mercados públicos y centros de abasto carecen de normatividad energética específica o menos aun de una política energética, sin embargo, se tiene el Programa para el Fomento y Mejoramiento de los Mercados Públicos en el Distrito Federal. Con este programa se piensa dar un enfoque de lugares amigables con el medio ambiente en términos de reducción de residuos sólidos, ahorro, generación y uso eficiente de energía eléctrica y aprovechamiento del agua. También se tiene la intención de

impulsar proyectos de eficiencia energética, por ejemplo a través de la Oficina de Fomento a la Inversión para la Sustentabilidad Energética.⁸

1.3 Marco regulatorio de los mercados públicos

Los mercados públicos y centros de abasto tienen diversos instrumentos jurídicos para la correcta convivencia y aceptación de reglas de funcionamiento en estos lugares. Entre estos se encuentra; la Ley Orgánica de la Administración Pública del Distrito Federal que otorga a las delegaciones las facultades de construir, mantener, rehabilitar y administrar los mercados públicos, el Reglamento Mercados Públicos para el Distrito Federal vigente desde 1951 y regula los aspectos generales de los mercados, tal como: empadronamiento, traspasos, tipo de venta de productos, el Reglamento interior del Centro de Acopio y Comercialización de Nopal-Verdura, en Milpa Alta, vigente desde 2002 regula la operación y funcionamiento. Da a conocer quién es el encargado de administrar el Centro de Acopio, horarios y uso de suelo y los productos que se pueden comercializar.

En el contexto de eficiencia energética en mercados públicos y centros de abasto puede ser aplicable la normatividad que se indica en la siguiente tabla:

Tabla 2 Normas con relación a la energía que aplican a un mercado público

<i>Instrumento jurídico</i>	<i>Descripción</i>	<i>Responsable</i>
ISO 50002 Energy audits, Requirements with guidance for use	Plasma los requerimientos mínimos para llevar a cabo una auditoría energética	Administrador
ISO 50001 Sistemas de Gestión de la Energía	Indican los pasos para llevar a cabo la implementación de un sistema de gestión de energía y con ello se evite el desperdicio de energía.	Administrador

⁸ (<http://www.cdmx.gob.mx/comunicacion/nota/presenta-gobierno-de-cdmx-oficina-para-proyectos-de-energia-sustentable>, 2017)

NOM-025-STPS-1999	Condiciones de iluminación en los centros de trabajo. En este ámbito aplica para áreas generales exteriores: distinguir el área de tránsito, desplazarse caminando, vigilancia, movimiento de vehículos. Tal como patios y estacionamientos. El nivel mínimo de iluminación de 20 lux	Administrador
NOM-022-STPS-2008	Electricidad estática en los centros de trabajo- Condiciones de seguridad-. Se está construyendo una planta de tratamiento de residuos orgánicos con el fin de producir biogás y por lo tanto aplica la presente norma ya que almacena, maneja y transporta sustancia inflamable. Además de los tanques portátiles y estacionario de gas LP.	Locatarios
NOM-007-ENER-2004,	<p>Eficiencia energética en sistemas de alumbrado en edificios no residenciales.</p> <p>Establece el nivel de Densidad de Potencia Eléctrica para Alumbrado (DPEA) según el inmueble en nuestro caso para Establecimiento Mercantil y además tiene una carga conectada mayor a 3 kW. El nivel de DPEA para Establecimiento comercial es de 20 W/m². Para estacionamientos abiertos >2000 m² es de 0,52 W/m².</p> <p>Condiciones de iluminación en los centros de trabajo. En este ámbito aplica para áreas generales exteriores: distinguir el área de tránsito, desplazarse caminando, vigilancia, movimiento de vehículos. Tal como patios y estacionamientos. El nivel mínimo de iluminación de 20 lux</p>	Administrador

Fuente: Elaboración propia

Para poner en contexto la relevancia en cuanto al consumo y costo por el uso de energía eléctrica a continuación se proporciona algunos ejemplos por Delegaciones políticas, estos datos correspondientes al año 2014.

Delegación política: Cuauhtémoc

Cantidad de mercados:	35	
Consumo de energía eléctrica, kWh	1.509.533	
Importe, pesos	3.816.201	Mes de diciembre 2014

Delegación política: Venustiano Carranza

Cantidad de mercados:	42	
Consumo de energía eléctrica kWh	11.435.341	
Importe	30.595.113	Año 2014

Delegación política: Miguel Hidalgo

Cantidad de mercados:	19	
Consumo de energía eléctrica kWh	7.324.239	
Importe	20.183.896	Año 2014

Fuente: Oficina de Información Pública de la Delegación Política

1.4 Revisión bibliográfica sobre digestión anaerobia

En esta sección se pretende buscar información o trabajos previos en la tecnología de la digestión anaerobia y poniendo énfasis en el residuo orgánico de nopal-verdura y de plantas tipo industriales de digestión anaerobia que han sido construidas en México. Además de comprender términos propios del proceso de digestión anaerobia.

El proceso de generación de biogás es común a muchos entornos naturales, por ejemplo, en los pantanos y en el rumen de los rumiantes. Y por el contrario en forma controlada la generación de biogás mediante un proceso de descomposición de biomasa usando microorganismos. Por lo que, la digestión anaeróbica es la descomposición microbiológica de materia orgánica en ausencia de oxígeno. Sus productos finales son el biogás (generalmente metano y dióxido de carbono) y digestato (sustratos descompuestos, aptos para fertilizar). El biogás, es un gas inflamable, ya que el medio energético es el gas metano, el cual es también un componente del gas natural. Su contenido de metano del 50 al 75 % determina el contenido energético del biogás (*KLAUS von MITZLAF, (1988)*).

En México se tiene algunos caso de aplicación de hecho de la literatura revisada se pudo observar que la tecnología predominante de digestión anaerobia son los sistemas tipo laguna (94 %), continuando los modulares (4 %), los de tipo bolsa y ferrocemento (1 %). El 90 % de estos se encuentran en granjas porcícolas y el 10 % restante en establos lecheros

(SAGARPA, 2100)⁹. De los digestores cilíndricos son de los menos construidos en México, tal vez puede ser debido al espacio de construcción o mayor costo. Sin embargo, en el proyecto de Camébaro, Michoacán, se tiene un reactor en forma de cilindro con capacidad de 100 m³ la carga de alimentación es de 8 toneladas al día de nopal fresco y la producción de biogás es de entre 450 m³ y 600 m³ a especificaciones de diseño, sin embargo, actualmente se opera a menor capacidad. El biogás se utiliza como combustible en máquinas tortilladoras y en un motorgenerador a biogás de 35 kW (AKÉ MADERA, Miguel, (2015)¹⁰

De los aspectos importantes para mantener el proceso de digestión anaerobia son el inóculo que se agrega al residuo orgánico y la demanda de energía térmica al biodigestor. *JIGAR, Elias*¹¹ y *BASRAWI, Firdaus*¹² encontraron respectivamente que una combinación óptima de 3:1 (75 % estiércol de vaca y 25 % penca de nopal para la producción de biogás también y que la demanda de calor debido a las pérdidas de calor del biodigestor ronda entre 26 – 39 % de la demanda de calor total del biodigestor anaerobio.

1.5 Generalidades del proceso de digestión anaerobia

El proceso tecnológico de digestión anaerobia en aplicaciones industriales de biogás se puede clasificar como un proceso de una etapa o dos etapas. En el proceso de una etapa, las cuatro fases (hidrolisis y acidogénesis) y (acetogénesis y metanogénesis) ocurren en forma simultánea y en el proceso de dos etapas, el proceso de digestión se separa en dos fases (hidrolisis y acidogénesis) y (acetogénesis y metanogénesis).

La Hidrólisis. Es el primer paso de una digestión anaeróbica en la que las moléculas complejas insolubles como carbohidratos, proteínas y grasas se descomponen en compuestos más simples por ejemplo, azúcares de cadena corta, ácidos grasos y aminoácidos. Las bacterias hidrolíticas que participan en esta etapa liberan enzimas que descomponen el material por medios bioquímicos.

⁹ (Diagnóstico General de la Situación Actual de los sistemas de Biodigestión en México, 2010)

¹⁰ (Nopal, fuente excepcional de energía renovable limpia y sustentable, 2015)

¹¹ (Jigar, 2011)

¹² (Basrawi, 2010)

La Acidogénesis. Durante esta etapa, los productos de hidrólisis que son compuestos solubles relativamente pequeños difunden en las células bacterianas a través de la membrana celular y luego fermentan o se oxidan anaeróbicamente (acético, prebiótico y butírico). Estos procesos ocurren mediante un consorcio complejo de microorganismos hidrolíticos y no hidrolíticos que son la fuente de energía para la población acidificante.

La Acetogénesis. El tercer paso o etapa de la digestión anaeróbica. Los productos de fermentación (ácidos orgánicos, alcoholes) se convierten en hidrógeno (H_2), dióxido de carbono (CO_2) y ácido acético (CH_3COOH). Esta etapa es importante la presión parcial del hidrógeno. Un contenido excesivamente alto impide la conversión de los productos intermedios de la acetogénesis por razones relacionadas con la energía. En consecuencia, se acumulan los ácidos orgánicos, como el ácido propiónico, el ácido isobutírico, el ácido isovalérico y el ácido hexanoico, e inhiben la formación de metano.

La Metanogénesis. El cuarto y último paso de la digestión anaerobia. Los metanógenos, que son estrictamente anaeróbicos, transforman el ácido acético (acetato), el dióxido de carbono y el hidrógeno en una mezcla de metano y dióxido de carbono (biogás) o biometanización.

Mientras que en el proceso de dos etapas ocurre una separación de fases; en la primera etapa se lleva a cabo la fase de hidrólisis y acetogénesis en un reactor y después de un tiempo se envían a otro reactor o biodigestor en donde se realiza la fase de acetogénesis y metanogénesis

La composición de biogás varía en función de la materia prima, la temperatura y parámetros de proceso.

Materia prima, sustrato o biomasa son términos similares; y describen el material de entrada (biomasa). Esta es cualquier fracción biodegradable de productos y residuos de origen biológico procedente de actividades agrarias y pesqueras (residuos agrícolas y ganaderos), de la silvicultura (residuos forestales), así como la fracción orgánica de los residuos industriales y municipales. Por lo que, se pueden utilizar una gran variedad de tipos de biomasa –líquida o sólida- para producir biogás. La tabla 3 muestra algunos ejemplos a este respecto

Tabla 3 Tipos de biomasa para digestión anaerobia

Clasificación	Ejemplos	Comentarios
Abono y lodo animal (estiércol)	Residuos de la actividad pecuaria	<ul style="list-style-type: none"> • Precio económico • contiene bacterias anaeróbicas • Estiércol: alto contenido acuoso (92 – 96 %), sirviendo como solvente para otros sustratos; <i>bombeable</i>
Residuos y subproductos agrícolas	Forraje, cereal y rastrojos de cosecha	<ul style="list-style-type: none"> • Muy apto para codigestión por su alto contenido de carbono y su buena digestibilidad
Cultivos energéticos	Pasto, maíz, pasto <i>Miscanthus</i> , sorgo, trébol, biomasa de zonas naturales	<ul style="list-style-type: none"> • Cultivados para uso energético • Elevados rendimientos de metano
Residuos orgánicos provenientes de las industrias alimentaria y agrícola	Residuos de la destilación	<ul style="list-style-type: none"> • Normalmente, buena digestibilidad • Elevado contenido acuoso
Fracción orgánica de residuos municipales y del <i>catering</i> (servicios de comidas)	Restos de comida y podas de jardines	<ul style="list-style-type: none"> • Pueden contener impurezas y contaminantes
Lodos residuales	Restos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales	<ul style="list-style-type: none"> • Pueden contener metales pesados y otros contaminantes; el digestato podría no ser apto para uso agrario

Fuente. Apuntes de Curso Fundamentos Energías Renovables. Institución RENAC (<http://www.renac.de/index.php?id=68>) 2016

Los procesos de digestión son sensibles y es necesario realizar una operación cuidadosa para obtener la cantidad óptima de biogás en forma continua a partir del sustrato de entrada.

Por lo que es importante un control exhaustivo de los principales parámetros del proceso como temperatura y potencial de Hidrógeno (pH).

Condiciones dentro del digestor

Los procesos de biogás son sensibles a procesos biológicos y es necesario realizar una operación adecuada para mantener la cantidad óptima de biogás en forma continua a partir del sustrato de entrada. El primer parámetro a tener un control, es la temperatura.

Temperatura

Los microorganismos que participan en la descomposición se pueden dividir en tres grupos según sus temperaturas óptimas, de hecho, esta es una de las variables relevantes a considerar en el proceso de biometización. Se distinguen en microorganismos psicrófilico, mesófilico y termófilico.

Tabla 4 Condiciones de temperatura en proceso de digestión anaerobia

Etapa térmica	Temperatura del proceso	Tiempo mínimo de retención
Psicrófilica	< 20 °C	70 a 80 días
Mesófilica	30 °C a 42 °C	30 a 40 días
Termófilica	43 °C a 55 °C	15 a 20 días

Fuente. Apuntes de Curso Fundamentos. Institución RENAC (<http://www.renac.de/index.php?id=68>) 2016

Al elegir una condición de operación del digestor según el microorganismo, entonces la temperatura dentro de digestor tiene que ser uniforme para asegurar un proceso óptimo de digestión. Es importante mantener las fluctuaciones de temperatura a lo largo del tiempo y también al desequilibrio de temperatura en diferentes partes del digestor. Las fluctuaciones y desviaciones graves de temperatura por encima o por debajo de ciertos parámetros de ajuste pueden impedir el proceso de digestión o incluso que se detenga por completo en el peor de los casos. Las causas que se pueden atribuir a que no se mantenga la temperatura pueden ser la siguiente:

-alimentación de sustrato fresco, para ello se puede precalentar el sustrato en intercambiadores externos antes de entrar al digestor y esto ayuda a evitar fluctuaciones de temperatura asociadas a la alimentación del sustrato

pH

El otro parámetro es la acidez y es medida por el pH (potencial de Hidrógeno). Los microorganismos que participan en las distintas etapas de descomposición requieren diferentes valores de pH para un crecimiento óptimo. El valor de pH se debe mantener alrededor de 7. Es importante que al percatarse de un valor distinto entonces tomar acciones correctivas por ejemplo, si cae el valor de pH, puede ser debido a una demasiada alimentación de materia orgánica, entonces se debe detener la alimentación y agregar compuestos alcalinos como limo para detener la destrucción de la población bacteriana. Por otro lado, el valor de pH puede incrementarse si se libera el amoníaco como resultado de la división de compuestos del nitrógeno orgánico. El amoníaco reacciona con el agua para formar amonio. En consecuencia incrementa el efecto de inhibición por amoníaco.

CH₄

Otro parámetro es la calidad del biogás. En condiciones de correcta operación, la composición del biogás permanece estable con una concentración de metano (CH₄) de entre 50 y 65 % en volumen dependiendo el tipo de sustrato.

Otros parámetros son:

Ácidos orgánicos volátiles y capacidad antioxidante total, estos parámetros proporcionan una indicación de la salud de las bacterias.

Conductividad eléctrica, este parámetro da una indicación de los sólidos disueltos y de los iones dentro del reactor.

Nitrógeno- Amoníaco, en combinación con el valor de pH, este parámetro de una indicación de la sensibilidad del sustrato para el inhibidor amoníaco.

Relación C/N, la relación entre carbono/nitrógeno y da una indicación de la tendencia del proceso a producir sustratos de amonio y amoníaco.

Requerimientos de energía

Para llevar a cabo el proceso de digestión en condición termofílica y un adecuado control de los parámetros antes vistos, se requiere de un suministro de energía en forma de trabajo (electricidad) y calor.

Calor

- para llevar el efluente a la condición de temperatura de operación.
- para mantener en el digestor la temperatura de operación y compensar las pérdidas de calor a través de las paredes del digestor.

Trabajo

- para que los contenidos del digestor se mezclen y se propicie una distribución uniforme de calor, nutrientes y la inoculación de sustrato fresco por contacto con el material semilla.
- para facilitar el proceso de digestión al aumentar zonas de contacto de las bacterias metano génicas con sustrato de biomasa.
- para evitar la sedimentación y la formación de una capa de nata en la superficie que impida al biogás salir del biodigestor.

Metodología del caso de estudio

Es importante conocer el patrón de uso y consumo de energía, además de los energéticos que emplea el Centro de Acopio y de la Planta de Tratamiento de Residuos Orgánicos. Primero se colocó un instrumento de medición de energía eléctrica en el tablero general del Centro de Acopio y además se llevaron a cabo cuestionarios a locatarios para conocer el tipo y la demanda de combustible para cocción de alimentos. Al finalizar el diagnóstico energético se está en posibilidad de proponer acciones y medidas de ahorro de energía, por lo que también forma parte del caso de estudio. En lo que respecta a la Planta de Tratamiento, se obtuvieron datos de los aparatos de medición de energía eléctrica, temperatura y se calculó el flujo de fluidos y pérdidas de calor. Por último, se determinó un estudio de prefactibilidad de un sistema de cogeneración con combustible a biogás procedente de la Planta de Tratamiento de residuos orgánicos de nopal-verdura. La factibilidad del sistema de cogeneración para obtener un ahorro en el consumo de energía del Centro de Acopio y un uso de energía térmica para el proceso de digestión anaerobia.

Capítulo 2 Diagnóstico energético del Centro de Acopio de Nopal-Verdura

En este capítulo se trata de dar un panorama sobre el uso y consumo de la energía del Centro de Acopio Nopal-Verdura, para ello se llevó a cabo un diagnóstico energético. Esto servirá para conocer el patrón de comportamiento de demanda de energía y cantidades de consumo de energía además de conocer oportunidades de ahorro de energía.

2.1 Diagnóstico energético

Para determinar cómo, dónde y cuánto se utilizan los energéticos en el Centro de Acopio, de Nopal-Verdura (CANV) primero se realizó un diagnóstico energético de nivel dos o fundamental, y que proporciona información sobre el consumo de energía eléctrica o térmica por áreas específicas o proceso. Este nivel provee datos acerca del ahorro de energía y en consecuencia de reducción de costos y con ello se obtiene un proyecto de ahorro de energético. Por lo que el diagnóstico energético del Centro de Acopio se empezó haciendo un recorrido por las instalaciones.



Figura 1 Vista aérea del Centro de Acopio y Comercialización de Nopal-Verdura en Milpa Alta

En la figura 1 se observa el Centro de Acopio con 4 infraestructuras principales las cuales abarca una superficie construida de 14.692 m². En la nave A y B es el espacio destinado para la comercialización de nopal con espinas al mayoreo y medio mayoreo, de vehículo a vehículo y su presentación es en canasto. La nave C, está para la actividad de venta de nopal sin espina (los comerciantes des-espinan el nopal a cuchillo) y este lugar es de mayor aforo de personas. Además, se tienen 10 espacios para la elaboración y venta de comidas preparadas que incluye una tortillería. En la nave D se lleva a cabo la actividad de comercialización de verduras, legumbres, frutas y hortalizas tal como: elote, calabacita, haba verde, chayote, rábanos, etc.



Canasto tradicional y oferta de nopal con espina



Vista panorámica nave C



Arribo de productores a nave C



Des-espinado de nopal

Figura 2 Vistas del interior del Centro de Acopio y Comercialización de Nopal-Verdura en Milpa Alta

Fuente ilustraciones <http://www.amigosmap.org.mx/2013/05/01/centro-de-acopio-del-nopal-en-milpa-alta/>

Otras infraestructuras son: un salón de usos múltiples utilizado para conferencias, cursos, eventos especiales, asambleas, etc., dos áreas para sanitarios y dos casetas de vigilancia, una oficina administrativa, una cisterna con tanque elevado con una bomba centrífuga y en construcción una Planta de Tratamiento de los Residuos de Nopal-Verdura para producir biogás. El horario de inicio de actividades es desde las 03:00 h a 15:00 h de lunes a domingo.

2.2 Recopilación de datos energéticos

Para iniciar con la evaluación del desempeño energético, primero se identificó el uso y consumo e intensidad energética en un esquema o layout.

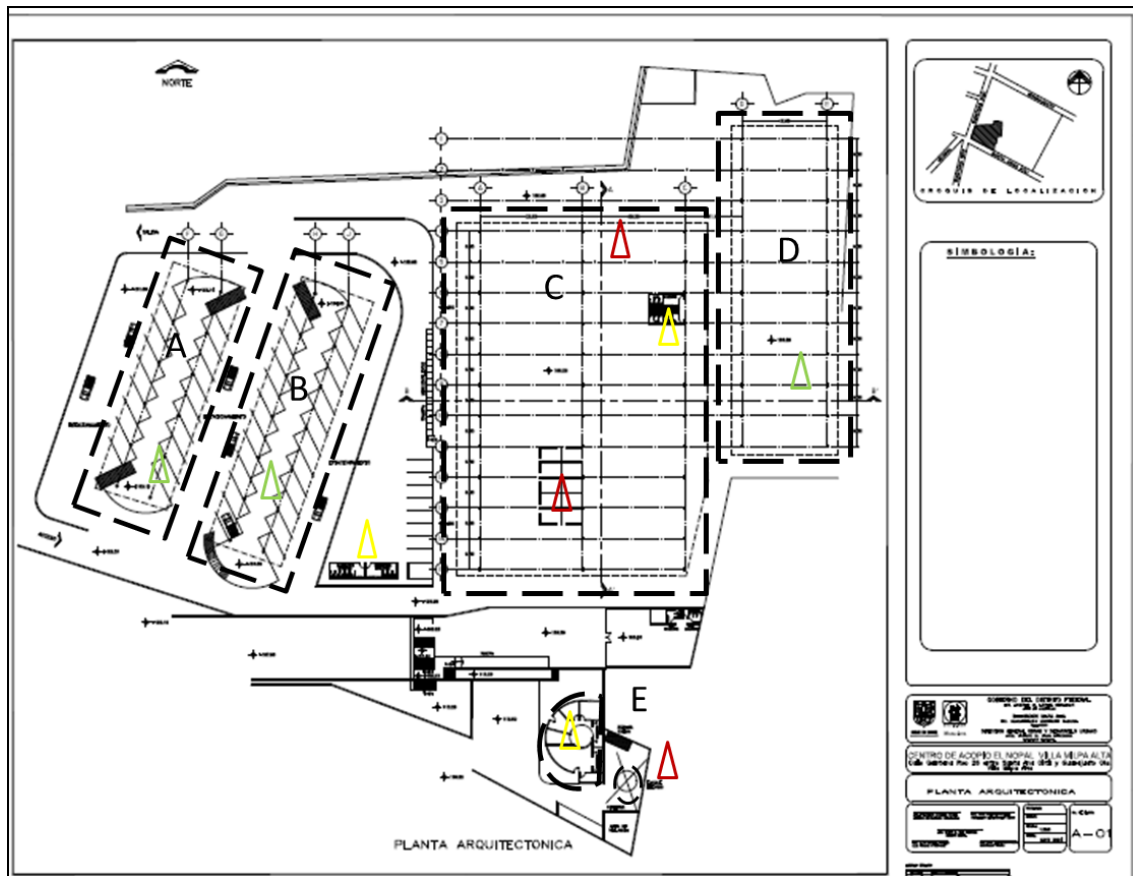


Figura 3 Lay Out CANV y señalamiento de intensidad energética

En una primera revisión a través de un recorrido, se identificó los lugares en que hay más equipos consumidores de electricidad y calor, en la figura se señala con un triángulo la

estimación de intensidad energética. El triángulo de color amarillo representa baja intensidad energética, el triángulo de color verde; media intensidad energética, y rojo; alta intensidad energética. Lo anterior permitió determinar áreas de oportunidad y por tanto delimitar acciones de eficiencia energética y con ello reducir la carga de energía eléctrica.

Tabla 5 Matriz de identificación de intensidad energética

Lugar	Sistema	Alto (triángulo rojo)	Medio (triángulo amarillo)	Bajo (triángulo verde)	Categoría	
A	Lámparas led	0	1	0	medio	
B	Lámparas led	0	1	0	medio	
C	Lámparas led	0	1	0	medio	
	Sanitarios Lámparas fluorescentes	0	1	0	alto	
	Locales	Lámparas fluorescentes	1	1	0	alto
		Refrigeradores	1	0	0	alto
		Hornos microondas	1	0	0	alto
	Estufas	1	0	0	alto	
Sanitarios	Lámparas fluorescentes	0	1	0	medio	
Tortillería	Motores eléctricos	1	0	0	alto	
	Máquina tortilladora	1	0	0	alto	
Auditorio	Lámparas de halógeno	0	0	1	bajo	
D	Lámpara led	0	1	0	medio	
E	Lámpara fluorescente	0	0	1	bajo	
F	Moto bomba centrifuga	1	0	0	alto	
G	Lámpara fluorescente	0	0	1	bajo	

Fuente: Elaboración propia

De la matriz anterior se observa que el área de la nave C y los locales de venta de comida son los lugares en que se debe poner énfasis para llevar a cabo medidas de ahorro de energía.

Enseguida se realizó un levantamiento tipo censo, el cual abarcó a todos los equipos, se tomaron datos de placa de equipos consumidores de energía. Se realizaron entrevistas a los usuarios para saber de una manera cualitativa los horarios de uso de los energéticos en sus actividades diarias.

Tabla 6 Relación de equipos instalados

Lugar donde están instalados	Cant	Potencia (kW)	Demanda (kW)
Nave A			
Lámpara lineal de tubo led T8 2x 18 W 120 cm	24	0,18	0,5
Nave B			
Lámpara lineal de tubo led T8 2x 18 W 120 cm	32	0,18	0,46
Nave C			
Lámpara lineal de tubo led T8 2x 18 W 120 cm	64	0,18	0,92
Refrigerador comercial (refrescos) 0.45 m ³ (compresor Danfoss NF10FX R134a 1/3 HP 127 vca)	6	0,25	0,96
Refrigerador doméstico 0.22 m ³ (compresor embraco FFU100HAK R134a 1/3 HP 127 vca)	2	0,25	0,32
Lámpara fluorescente lineal tubular T12 2 x 80 W longitud 1.20 m	10	0,80	0,51
Lámpara fluorescente compacta autobalastada espiral 85 W	2	0,85	0,11
Lámpara fluorescente compacta autobalastada espiral 35 W	7	0,35	0,16
Foco incandescente 60 W	3	0,60	0,12
Lámpara fluorescente lineal tubular T-8 2 x 35 W longitud 1.20 m	2	0,35	0,04
Licuada	2	0,30	0,38
Horno microondas	5	1,0	3,20
Nave D			
Lámpara lineal de tubo led T8 2x 18 W 120 cm	36	0,18	0,52
Tortillería			
Motor corriente alterna 220 vca 3ph 60 Hz 1.492 kW marca ABB mod. M1AA	2	1,4	1,89
Lámpara fluorescente lineal tubular T12 2 x 80 W longitud 2.20 m	2	0,80	0,10
Sanitarios			
Lámpara fluorescentes lineales T8 2 x 35 W longitud 1.20 m	10	0,35	0,22
Salón de usos múltiples			
Luminaria tipo industrial de vapor de mercurio 3 x 1000 W	3	1,0	1,92
Luminaria tipo foco aditivo metálico 1 x 500 W	1	0,5	0,32
Lámpara fluorescentes lineales T8 2 x 35 W longitud 1.20 m	2	0,35	0,04
Oficina administrativa			
Lámpara fluorescentes tubular U T12 2 x 40 W	16	0,40	0,41

Foco incandescente 60 W	3	0,60	0,12
Cisterna con tanque elevado			
Motor monofásico corriente alterna SIEMENS tipo 1RF3 258-2YC44 127/220 vca 1ph 60 Hz 1.492 kW	1	1,4	0,95
Cuarto de máquinas			
Lámpara fluorescente lineal tubular T12 2 x 80 W longitud 2.20 m	2	0,80	0,10
Planta de emergencia CARE modelo 3.1EE0W 50 kW, 3 ph, 60 Hz, 0.8 FP, 1800 rpm	1	0,50	
Alumbrado Público			
Lámpara de descarga de alta intensidad 1 x 250 W Luminario SB- 2000 Sola Basic	21	0,25	4,20
Total			18,33

Fuente. Elaboración propia

De esta manera, se pudo conocer que la energía eléctrica en el centro de acopio se usa en las luminarias (alumbrado público, naves, oficina y salón de uso múltiple y locales), motores eléctricos y bomba centrífuga (tortillería y tanque elevado), además de ser utilizada en aparatos electrodomésticos de los locales (microondas, refrigeradores y licuadoras). Se estima que el CANV (Centro de Acopio de Nopal-Verdura) tiene una demanda de potencia eléctrica de 18.33 kW. La tensión que se utiliza es de 200 volt en las lámparas de las vialidades y 110 V en los electrodomésticos y luminarias de los locales.

En la siguiente figura se muestra una distribución del consumo de energía eléctrica por cada infraestructura del Centro de Acopio.

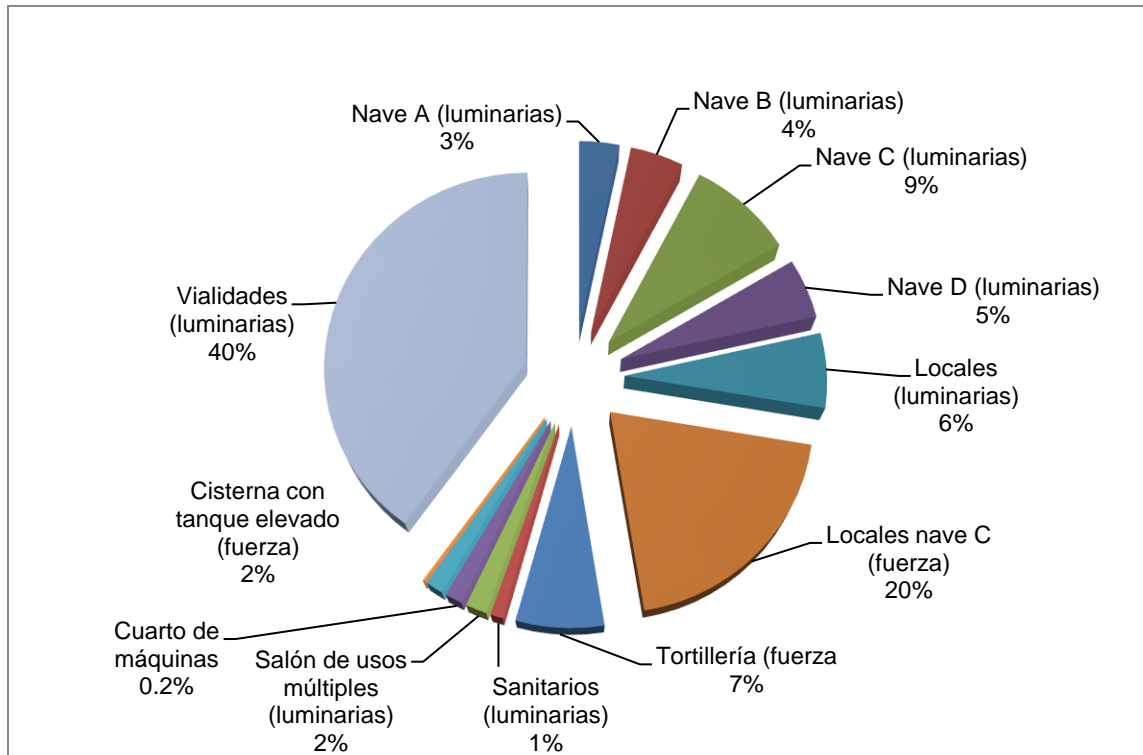


Figura 4 Distribución del consumo de energía eléctrica

Fuente: Elaboración propia

Se observa que la infraestructura de iluminación de vialidades es el mayor consumidor de energía eléctrica con el 40 %, esto es debido a la capacidad y tiempo de uso, es decir, cada lámpara es de una potencia eléctrica de 250 W y se tiene un total de 21 unidades, mismas que están encendidas desde el atardecer hasta el amanecer. Otro importante consumidor de energía eléctrica es el que se realiza en la nave C, con el 30 % esto puede ser debido a que en este lugar se utilizan además de luminarias, aparatos electrodomésticos tal como refrigeradores, hornos de microondas, televisión, etc. y además su uso es intensivo, por ejemplo, en el caso de los refrigeradores los cuales están ubicados dentro de los locales, con muy poco espacio de ventilación o enfriamiento de condensador y poco mantenimiento. Ver figura 5



Figura 5 Condensador enfriado por aire de refrigerador de bebidas

En el caso de la tortillería, representa el 9 % de consumo de energía eléctrica, debido a la capacidad eléctrica de los motores de 1,5 kW y su tiempo de 4 horas de uso continuo.

En la siguiente figura se muestra el perfil de potencia del Centro de Acopio en un periodo de 24 h.

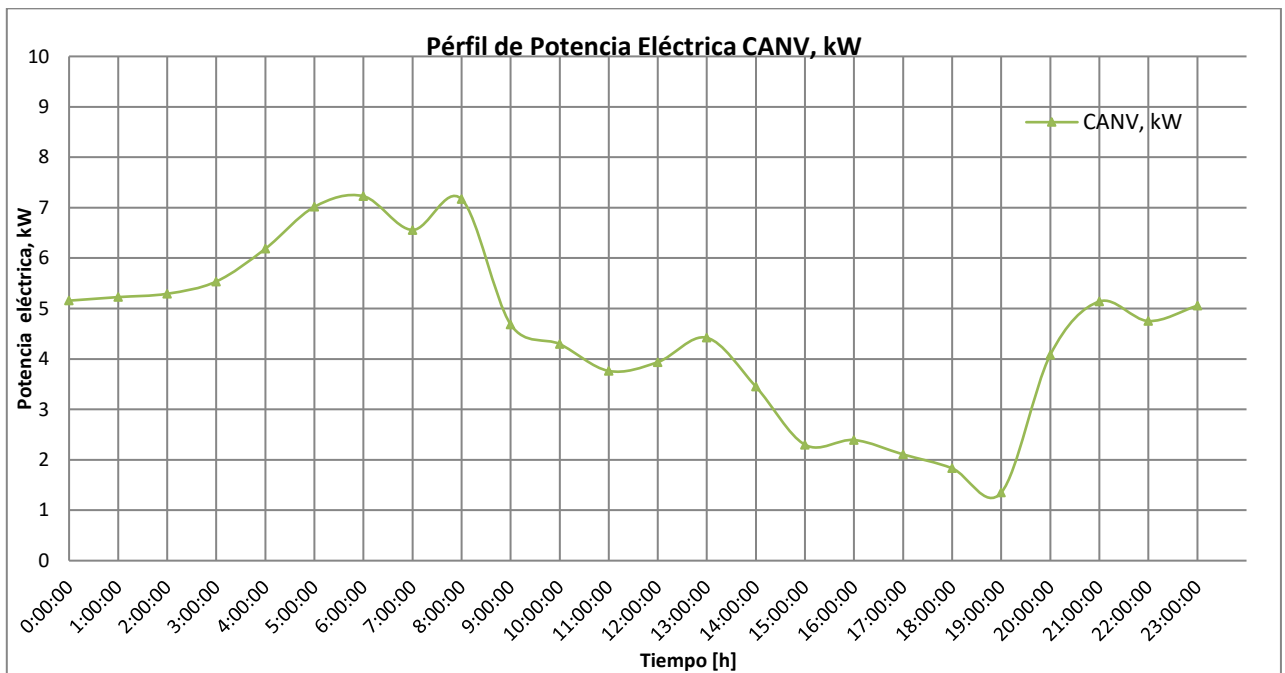


Figura 6 Perfil de potencia del Centro de Acopio Nopal-Verdura

Fuente: Elaboración propia

El perfil de potencia eléctrica se obtuvo con un analizador de redes marca AEMC modelo 3945 durante 5 días (03/02/16 a 07/02/16) en este periodo se registró una demanda máxima de 8 kW y un consumo promedio diario de 103 kWh. Cabe mencionar que estos datos

difieren con los registrados por medidor de CFE (ver tabla 8) esto puede ser debido a que en el periodo de medición no se prendió las luminarias del salón de usos múltiples. Por lo que será importante más tiempo de periodo de mediciones.

En la figura anterior se observa que la mayor demanda de potencia eléctrica se presenta entre las 05:00 h y las 08:00 h esto es debido a que al mismo tiempo se tiene conectado la iluminación de las naves y postes de la vialidad y la operación de los locales de venta de comida. También se observa que después de las 08:00 h comienza a descender la curva de la demanda de potencia, debido a que se apaga las luminarias de vialidad y naves. Además, continua en descenso la demanda de potencia eléctrica y esta coincide con la disminución de actividades en los locales (13:00 a 15:00), hasta alcanzar un mínimo que se presenta entre las 18:00 h y 19:00 h, sin embargo, hay un aumento súbito en la demanda de potencia; ya que en esos momentos se enciende la iluminación de vialidades y naves. Cabe mencionar que las luminarias de vialidades no cuentan con fotoceldas por lo que las luminarias se encienden y apagan manualmente al llegar el atardecer y amanecer del día.

2.3 Análisis de factura de la energía eléctrica

En la siguiente tabla se muestra un resumen de los datos del recibo de energía eléctrica del centro de acopio.

Tabla 7 Resumen de datos del recibo de energía eléctrica

Nombre y Domicilio;	GDF07. GDF Deleg Milpa Alta. Av. Quintana Roo Sn Villa Milpa Alta. Esq Santana Otli y Guanajuato San Agustín Villa Milpa Alta. Villa Milpa Alta; DF. C.P.12400
Tarifa OM	Ordinaria para servicio general en Media tensión, con demanda menor a 100 kW, zona central.
Numero de servicio	150 010 300 268
Carga conectada	101 kW
Demanda contratada	80 kW
Multiplicador	60

Fuente: Elaboración propia

En la siguiente tabla 8 se muestra un historial de dos años de los recibos de facturación eléctrica y a partir de los últimos 12 recibos o año 2015 se realizará el análisis de datos.

Tabla 8 Recopilación de datos de facturación de la energía eléctrica

Mes, 2015	Consumo, kWh	Consumo promedio diario	Importe, \$/kWh	Demanda, kW	Importe, \$/kW	F.P	F.C	Total factura
Enero	4.920,0	166,9	6.816,9	16,0	2.842,0	90,7	38,8	11.405,5
Febrero	4.980,0	177,9	6.573,3	16,0	2.624,7	95,1	43,2	10.741,6
Marzo	5.580,0	199,3	7.048,7	17,0	2.838,7	96,8	48,8	11.487,7
Abril	6.720,0	231,7	7.613,8	16,0	2.732,8	96,4	53,0	12.662,0
Mayo	5.580,0	199,3	6.210,5	18,0	3.093,8	95,5	46,1	10.692,0
Junio	5.520,0	184,0	5.989,2	17,0	2.932,2	95,7	45,1	10.450,0
Julio	5.940,0	212,1	6.397,4	16,0	2.768,5	95,7	52,0	10.713,0
Agosto	5.880,0	210,0	6.379,8	17,0	2.955,6	94,8	45,0	10.950,0
Septiembre	5.760,0	205,7	6.687,4	17,0	2.982,0	95,5	47,0	10.693,0
Octubre	6.360,0	227,1	7.104,1	17,0	3.020,4	95,7	49,0	12.251,0
Noviembre	6.120,0	218,6	6.475,0	17,0	3.032,8	95,7	50,0	11.334,0
Diciembre	5.880,0	210,0	5.709,5	16,0	2.854,1	95,9	51,0	10.483,0
Total	69.240,0	---	---	200,0	34.677,5	---	---	133.862,8
Promedio	5.770,0	203,5	6.583,8	16,7	2.889,8	95,3	47,4	11.155,2

Fuente: Elaboración propia

Durante el año 2015 se tuvo un consumo 69.240 kWh y un promedio diario de 203,5 kWh y un promedio de demanda de potencia de 16,7 kW. El importe promedio mensual por estos dos conceptos fue de la manera siguiente; 6.583,8 pesos por consumo de energía eléctrica, 2.889,8 pesos por demanda y además 137,39 pesos por bonificación de alto factor de potencia. El CANV a través del Gobierno del Distrito Federal pagó a su suministrador de energía eléctrica la Comisión Federal de Electricidad (CFE) un total de \$133.862,8 pesos en el año 2015.

A partir de los datos recabados de facturación se extraen los datos de consumo de energía promedio diario y demanda máxima de 2 años y 2 meses y se exponen en la siguiente gráfica.

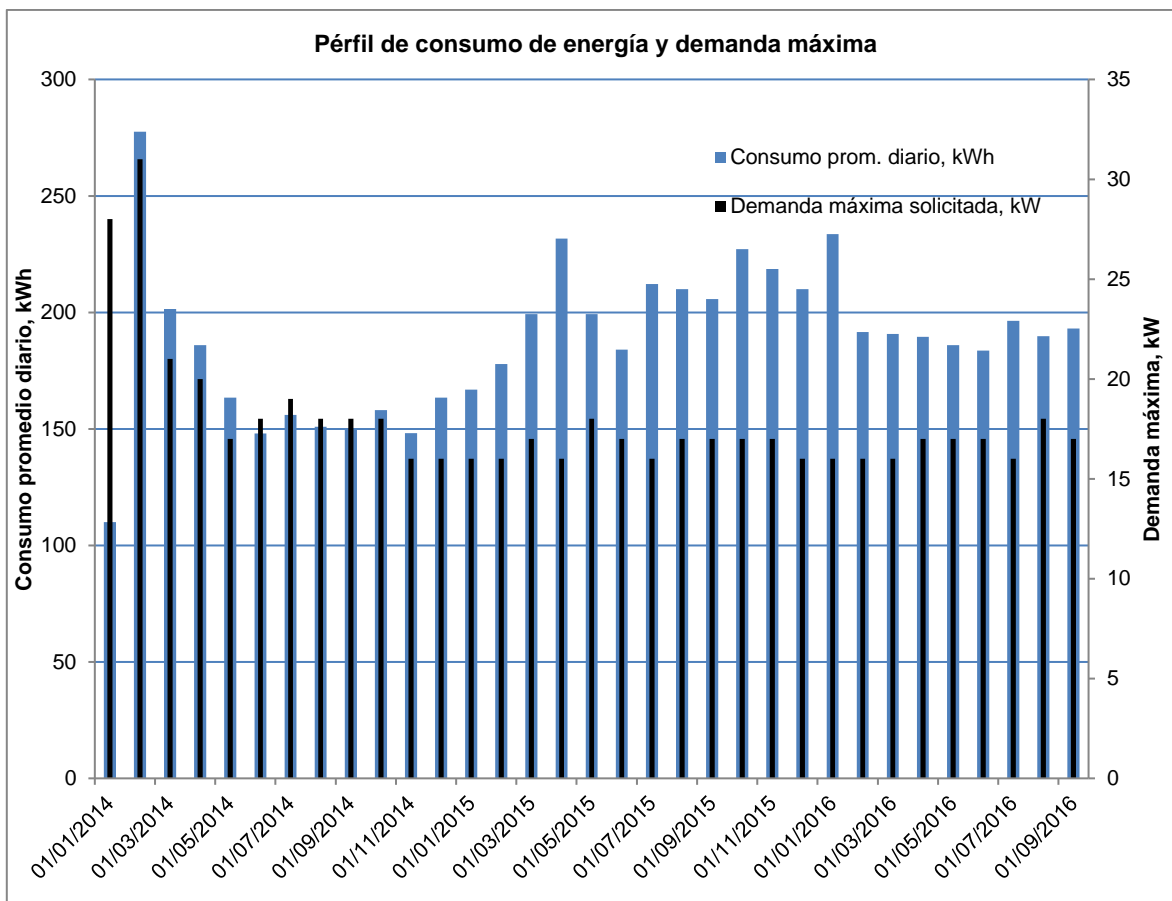


Figura 7 Perfil de consumo de energía promedio diario y demanda máxima mensual

Fuente: Elaboración propia

En la gráfica anterior se observa que en el primer mes del año 2014 la demanda máxima y el consumo de energía se encuentra en 31 kW y 277,5 kWh respectivamente y al siguiente mes de facturación disminuye en forma drástica los mismos conceptos a 21 kW y 201 kWh, esto puede ser debido a que se cambiaron las luminarias de alto consumo por luminarias de tipo led de 19 W.

En lo que respecta a la evolución de los precios de consumo de energía y demanda máxima en tarifa OM se pueden observar en la gráfica siguiente.

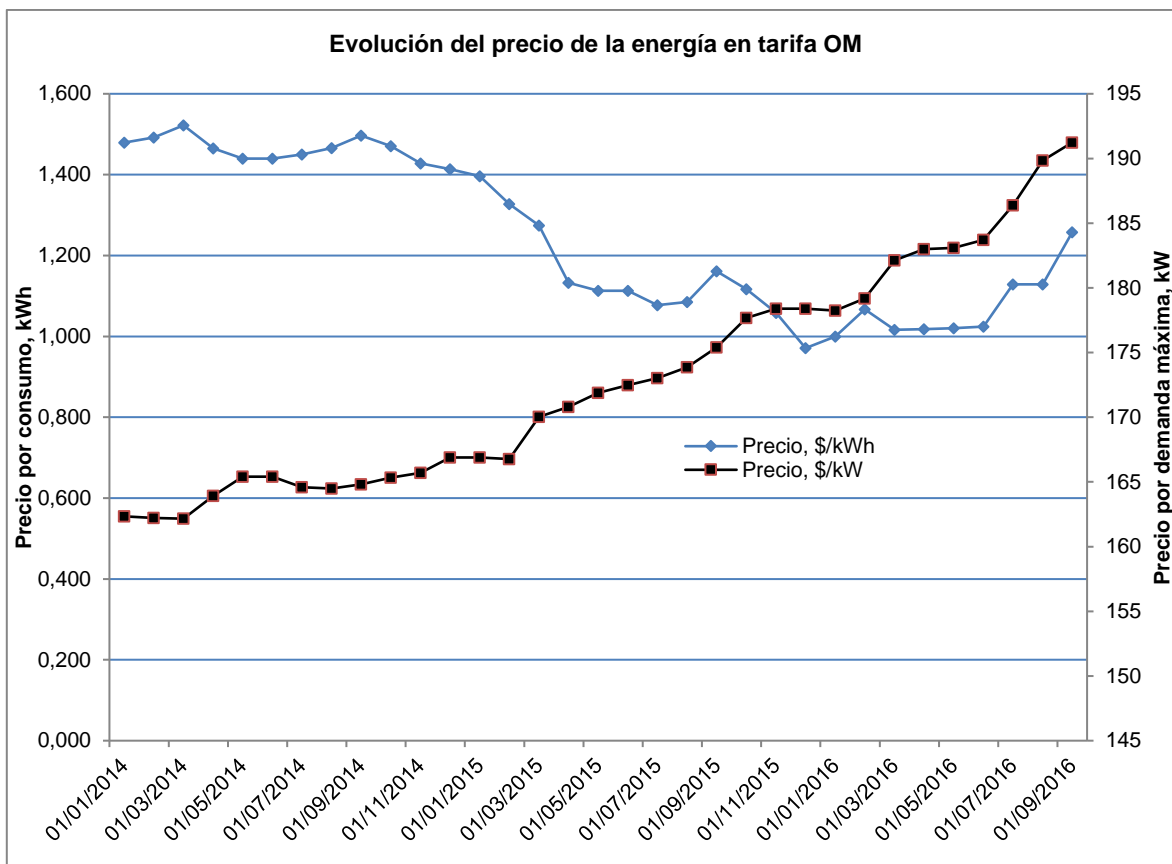


Figura 8 Evolución del precio de la energía en tarifa OM

Fuente: Elaboración propia

En la figura 8 se muestra que desde enero de 2014 a enero de 2015 el precio de energía ha disminuido en $\text{¢}0,479$ centavos y por el contrario el precio por el cargo de demanda máxima ha ido al alza en $\text{\$}15,91$ pesos.

A partir del análisis de los recibos, se observa que el precio promedio por consumo de energía eléctrica fue $\text{\$}1,152/\text{kWh}$ y para demanda un cargo de $\text{\$}172,97/\text{kW}$ durante el año 2015. Por otro lado, del último recibo con fecha 04/02/2016 a 03/03/2016 muestra que en la tarifa OM el precio por consumo de energía eléctrica fue de $\text{\$}1,016/\text{kWh}$ con un cargo por demanda máxima de $\text{\$}182,12/\text{kW}$.

2.4 Matriz energética

Tal como se ha mencionado en párrafos anteriores, en el caso de estudio se hace uso de dos energéticos: electricidad y gas LP. Se tienen 10 locales de venta de comida con

medidas de 1,80 m frente x 2,20 m fondo. De los cuales 6 tienen estufas hechas de perfil de herrería y un tanque cilindro portátil de gas LP que varían en capacidades de 10 y 20 kg. Además, se tiene una tortillería con máquina tortilladora y tanque estacionario de gas LP de capacidad de 1.000 L.

Para estimar el consumo de gas LP, se realizó una entrevista con el dueño y/o encargado de cada local. Los datos obtenidos en la entrevista se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 9 Relación de equipos de consumo de gas LP

Local	Capacidad/duración	Consumo (kg/día)
1	1 cilindro cap. 20 kg / 4 días	3.8
2	1 cilindro cap. 20 kg / 24 días	0.6
3	1 cilindro cap. 20 kg / 5 días	3.0
4	1 cilindro cap. 10 kg / 5 días	3.0
5	1 cilindro cap. 20 kg / 9 días	1.7
6	1 cilindro cap. 20 kg / 5 días	3.0
7	1 cilindro cap. 20 kg / 4 días	3.8
8	1 cilindro cap. 20 kg / 24 días	0.6
Tortillería	Máquina tortilladora marca Celorio. Producción 100 kg/h, consumo gas 3.57 kg/h	14.28
Total		33.78

Fuente: Elaboración propia

El resultado arroja una estimación de consumo de gas LP de 33.78 kg/día.

En la siguiente tabla se muestra la intensidad energética del CANV.

Tabla 10 Matriz energética y costos diarios

Período, diario	Energía(kJ)	Pesos (\$)	Energía (%)
Electricidad, kWh	732.776.6	\$ 211,10	28%
Gas LP, L	1.931.946.9	\$ 570,70	73%
Total	2.664.723.5	\$ 781,80	100%

Fuente: Elaboración propia

Homologación de unidades

La tabla anterior se realizó al hacer la conversión de la magnitud de consumo de energía eléctrica de kWh a kJ y en el caso del combustible de gas LP de L a m³ y tomando en cuenta la densidad del gas LP en kg/L y su poder calorífico en kcal/L y su posterior conversión a kJ. Datos de cálculo 1 kWh=3600 kJ. Poder calorífico inferior gas LP (30 % propano y 70 % butano)=11.000 kcal/kg (19.799 Btu/lb)¹³. Densidad gas LP=0.88 m³/kg

En la tabla anterior se muestra que el 72.5 % de los energéticos corresponde al uso del gas LP y 27.5 % a la energía eléctrica y se estima que el costo diario que se paga por los energéticos es de \$781.8 pesos. Cabe mencionar que el costo por la energía térmica es pagado por los dueños de cada local y tortillería y el de la energía eléctrica por el GDF.

2.5 Indicador energético

Con base a la información que se recopiló y se analizó se calcularon los siguientes indicadores, para lo cual se tomó en cuenta la superficie del Centro de Acopio el cual tiene una superficie construida de 14.692 m² lo anterior permitió el cálculo de la línea de base a partir de datos de facturación eléctrica.

Tabla 11 Recopilación de datos de consumo y costo de energía

Mes 2015	Consumo, kWh	Costo, \$ total	IDE	
			kWh/m ²	\$total/m ²
05/01/2015	4.920	11.405,5	0,33488	0,7763
04/02/2015	4.980	10.471,6	0,33896	0,7127
05/03/2015	5.580	11.487,7	0,37980	0,7819
05/04/2015	6.720	12.662,0	0,45739	0,8618
06/05/2015	5.580	10.692,0	0,37980	0,7277
04/06/2015	5.520	10.450,0	0,37571	0,7113
04/07/2015	5.940	10.713,0	0,40430	0,7292
04/08/2015	5.880	10.950,0	0,40022	0,7453
04/09/2015	5.760	10.693,0	0,39205	0,7278
04/10/2015	6.360	12.251,0	0,43289	0,8339
04/11/2015	6.120	11.334,0	0,41655	0,7714

¹³ (<http://www.powermaster.com.mx/guia-tecnica/combustibles/>, 2016)

04/12/2015	5.880	10.483,0	0,40022	0,7135
Total	69.240,0	133.862,8		

Fuente: Elaboración propia

Cabe aclarar que el cálculo del Indicador de desempeño energético $IDE_{n,base}$ Consumo eléctrico total por superficie construida 4,71 kWh/m² y se determinó considerando la siguiente relación:

$$IDE_{n,base} = \frac{\text{Consumo de energía eléctrica, kWh}}{\text{superficie construida, m}^2} = \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}$$

Concepto	Unidad de medida	$IDE_{n,base}$
Consumo eléctrico total por superficie construida	kWh/m ²	4,71
Costo de la energía por superficie construida	\$/m ²	9,11

2.6 Medidas de ahorro de energía eléctrica

Entre otros elementos, se tienen lámparas fluorescentes lineales de tipo T12, focos incandescentes y condensadores de refrigeradores con falta de mantenimiento (ver figuras siguientes) y las luminarias de vialidad y naves se prenden al iniciar la noche y sin embargo, no hay actividad de comercio hasta las 03:00 h. Por lo tanto, se evalúan las siguientes acciones para determinar un potencial de ahorro de energía eléctrica.

Cambiar lámparas fluorescentes lineales tubulares T12 y T8 y en espiral T3 por lámpara lineal de led T8 y bulbo led

En la siguiente tabla se muestra una relación de lámparas de LED propuestas para disminuir potencia y consumo.

Tabla 12 Especificaciones de luminarias de tipo LED

Locales de venta de comida	Cantidad	Potencia	Inversión sistema led MX(\$) p.u	Inversión sistema led MX(\$)

Lámpara tubo LED T8 marca biglumen modelo BLT810OP20/AC longitud: 1.200 mm; temperatura del color: 4.100K; voltaje: 120 – 240 vca; eficiencia: 80 lm/W; flujo luminoso: 1520 lm; IP65; cubierta de policarbonato diseño: opalino y cuerpo de aluminio.	24	19	\$224,0	\$5.376,0
Sanitarios				
Lámpara tubo LED T8 lineal marca Osram modelo: capacidad: 19 W; longitud: 1.200 mm; temperatura del color: 4.100K; voltaje: 85 – 265 vca; eficiencia: flujo luminoso: cubierta de vidrio y cuerpo de aluminio.	10	19	\$204,3	\$2.043,0
Salón de usos múltiples				
Luminaria High Bay LED abierto para suspender marca: Supra desarrollos modelo: HBL-120-G3; 4 módulos N120 de 30 W; IRC:>80; Flujo luminoso: 17400 lm; potencia de línea: 127 W; Eficiencia: 137 lm/W; Factor de potencia: >0.90; Corriente de línea: 1.13-0.50 Amp; vida promedio: 80000 h;	5	127	\$3.270,0	\$16.350
Oficina administrativa				
Lámpara curva U LED marca: biglumen modelo:BLT8120OP10/AC opalino U 10W T8 dimensión 609,6 mm	16	10	\$224,0	\$3.584,0
Cuarto de máquinas				
Lámpara tubo LED T8 lineal marca Osram modelo: capacidad: 19 W; longitud: 1.200 mm; temperatura del color: 4.100K; voltaje: 85 – 265 vca; eficiencia: flujo luminoso: cubierta de vidrio y cuerpo de aluminio.	2	19	\$204,3	\$408,6
Total		1.398,4		\$27.761,6

Fuente: Elaboración propia

En la tabla anterior se muestra que con la propuesta de sustitución de lámparas fluorescentes por LED que se podría obtener una carga de potencia eléctrica de 1,39 kW en vez de 3,38 kW (ver tabla 6).

Limpiar los condensadores de los refrigeradores de fresco

Para realizar esta acción no se requiere inversión monetaria solo inversión de tiempo y herramientas de trabajo. La hipótesis es; el compresor del refrigerador trabaja más tiempo debido a que no se abate la temperatura ambiente del interior del refrigerador, ya que no hay líquido que pase por el evaporador y por lo tanto no hay efecto refrigerante.



Figura 9 Oportunidades de eficiencia energética; cambio de lámparas de menor consumo energético y mantenimiento de equipos de refrigeración

Se tienen 6 Refrigeradores comercial (refrescos) 0.45 m³ (compresor Danfoss NF10FX R134a 1/3 HP 127 vca).

Con las acciones que se plantean se espera disminuir la carga eléctrica y el consumo de energía eléctrica y se vean reflejadas de la siguiente manera;

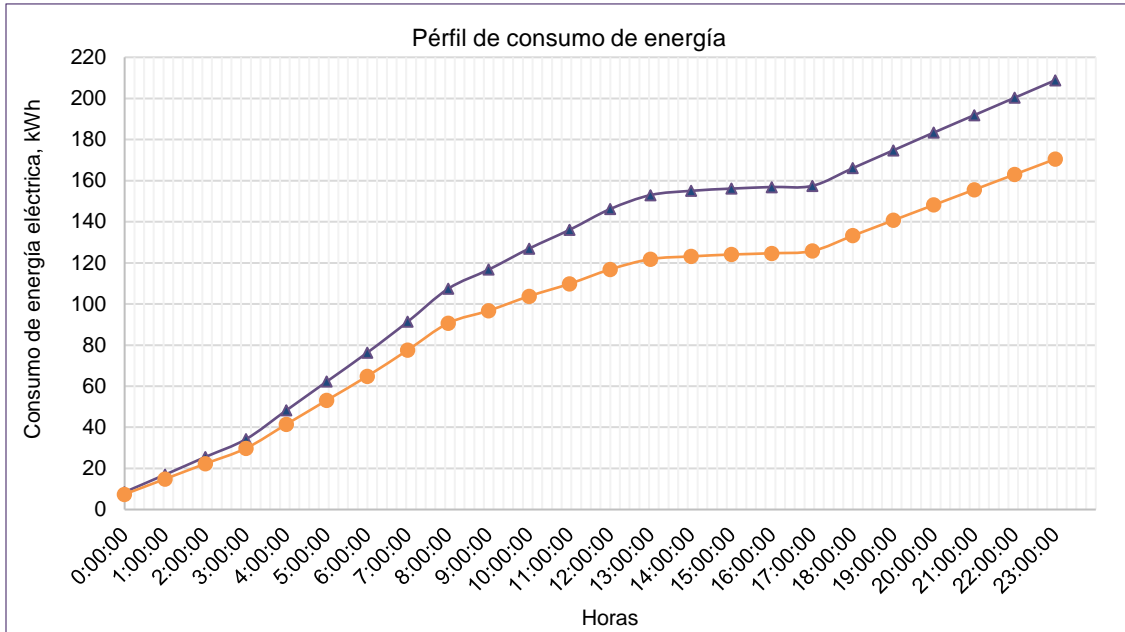


Figura 10 Evolución del consumo de energía. Línea verde consumo de energía centro de acopio después de sustitución de lámparas fluorescentes por led

Balance de energía

Consumo de energía eléctrica CANV 2015	69.240,0	kWh/año
Ahorro de energía eléctrica por sustitución de lámparas fluorescentes por led	13.869,6	kWh/año
Estimación de reducción de emisiones de CO ₂	6,27	tCO ₂ /año

Después de hacer un balance de energía se tiene un Índice de Mejora de Desempeño Energético (IMD_{n,estimadO}) en el caso de iluminación de;

Ahorro de energía eléctrica por superficie construida	kWh/m ²	3,76	21,1 %
---	--------------------	------	--------

En este capítulo se pudo constatar que se utilizan dos tipos de energéticos en el centro de acopio: electricidad y gas LP. Se obtuvo el perfil de demanda de energía eléctrica y el consumo de energía eléctrica del centro de acopio. Se encontró oportunidad de reducir la

carga de energía eléctrica y el consumo por medio de sustitución de tecnología de iluminación.

Capítulo 3 Metodología para la evaluación energética del biodigestor

En este capítulo se plantea como llevar a cabo en campo la evaluación energética del biodigestor de la planta de tratamiento de residuos orgánicos. Cabe aclarar que en el Centro de Acopio de Nopal-Verdura se encuentra en operación la Planta de Tratamiento de Residuos Orgánicos y dentro de éste el biodigestor anaerobio.

En la siguiente figura se muestran los equipos que utilizan energía térmica y eléctrica para llevar a cabo el proceso de obtención y consumo de biogás.

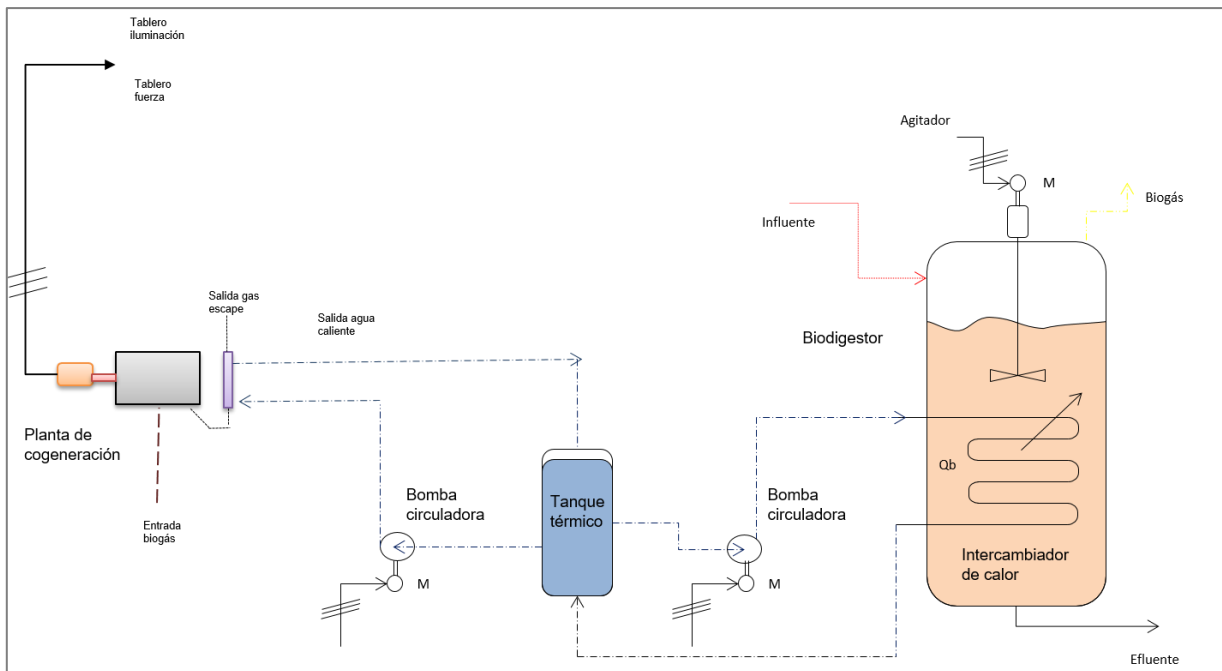


Figura 11 Esquema de sistema de cogeneración y biodigestor

El procedimiento para la evaluación energética del biodigestor de la planta de tratamiento de residuos orgánicos toma en cuenta los siguientes puntos:

- I. Trabajos previos de gabinete
- II. Recopilación de información

3.1 Procedimiento para la evaluación energética del biodigestor

I. Trabajos previos de gabinete

En este punto se describe el biodigestor anaerobio y se elabora un esquema del sistema para realización balance de energía. El biodigestor es de forma cilíndrica-vertical, tiene un sistema de agitación mecánica y con ello se evita la estratificación y se homogeniza la temperatura de la biomasa (ver figura 9). También tiene una tubería que se encuentra alrededor de la pared interior del biodigestor con el fin de hacer circular agua caliente y con ello calentar la biomasa. Para lograr tal propósito se aprovecha la energía de los gases de escape de un sistema de cogeneración a través de un intercambiador de calor gas-agua. El transporte de energía térmica en forma de agua caliente hacia el biodigestor se hace al utilizar un sistema de bombeo. Se hace notar que para evitar la pérdida de energía del biodigestor hacia el ambiente se tiene un aislamiento térmico que envuelve la pared del biodigestor.

II. Recopilar información de la instalación

Aquí se incluyen la recolección de datos clave de los sistemas involucrados en la interacción de energía del biodigestor. (bombas circuladoras, motores para arrastre de flecha, suministro y pérdida de calor, etc. Para ello se deben medir los parámetros necesarios que involucran la evaluación energética.

Tabla 13 Lista de mediciones para llevar a cabo la evaluación energética^{14, 15, 16}

Sistema	Instrumento de medición	Procedimiento
Recuperador de calor gas de escape	<ul style="list-style-type: none">• Termómetro• Registrador de temperatura• Caudalímetro	<ol style="list-style-type: none">1. Medir caudal de agua, m³/s2. Medir temperatura entrada y salida de agua, °C3. Medir temperatura entrada y salida de gas de escape, °C4. Determinar flujo másico agua, kg/s5. Calcular energía térmica que recibe el agua procedente de los gases de escape, W

¹⁴ (Aislamiento térmico NOM-009-ENER-1995, Eficiencia energética en aislamientos térmicos industriales.)

¹⁵ (ISO 50002 Energy audits, Requirements with guidance for use)

¹⁶ (NMX-J-SAA-50001-ANCE.IMNC-2011/ISO 50001:2011)

Biodigestor	<ul style="list-style-type: none"> • Termómetro • Registrador de temperatura • Caudalímetro • Manómetro carátula • Cronómetro 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Determinar caudal de entrada de agua al intercambiador de calor inmerso en el biodigestor 2. Medir temperatura de entrada y salida agua a través del intercambiador de calor inmerso en el biodigestor 3. Determinar pérdidas de presión a través de serpentín 4. Determinar propiedades térmicas de la biomasa 5. Determinar cantidad de biomasa en el biodigestor 6. Medir la temperatura de biomasa, T 7. Calcular el calor que se suministra al biodigestor 8. Medir el tiempo en que alcanza la temperatura de consigna termofílica de la biomasa
	<ul style="list-style-type: none"> • Termómetro • Registrador de temperatura • Estación meteorológica • Cronómetro 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Medir temperatura de biomasa dentro del biodigestor 2. Medir velocidad del viento 3. Medir la temperatura ambiente 4. Medir temperatura de la superficie externa del biodigestor 5. Calcular pérdida de calor del fluido dentro del tanque
Bombas circuladora	<ul style="list-style-type: none"> • Amperímetro de gancho • Medidor de potencia y energía • Manómetro carátula 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Medir la corriente y tensión del motor 2. Calcular la potencia eléctrica 3. Medir el tiempo en que opera el motor 4. Calcular la energía de suministro, W 5. Determinar el consumo energía, Wh
Agitador	<ul style="list-style-type: none"> • Amperímetro de gancho • Medidor de potencia y energía 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Medir la corriente y tensión del motor 2. Calcular la potencia eléctrica 3. Medir el tiempo en que opera el motor

		4. Calcular la energía de suministro, W 5. Determinar el consumo energía, Wh
--	--	---

3.2 Evaluación energética del biodigestor

El requerimiento de energía térmica del proceso de biodigestión se compone de la demanda de energía térmica al arranque y en operación continua y éstas consisten en:

- previamente ingresar la biomasa al biodigestor a temperatura ambiente y hacer pasar agua caliente por la tubería inmersa en el biodigestor hasta que alcance la biomasa la condición termofílica.
- restituir el calor debido a las pérdidas por conducción a través de la pared del biodigestor y a las pérdidas de calor debido a la evaporación del sustrato.

La demanda inicial $\dot{Q}_{\text{demanda de calor al arranque}}$ se muestra en la siguiente ecuación y es influenciada por la capacidad calorífica (Cp_{biomasa}), la cantidad de biomasa en el digestor (m_{biomasa}) y la diferencia de temperatura (ΔT) de la biomasa.

$$\dot{Q}_{\text{demanda de calor biomasa al arranque}} = \frac{m_{\text{biomasa}} Cp_{\text{biomasa}} [(T - T_{\text{inicio}})]}{t} + \dot{Q}_{\text{pérdidas de calor}} \quad (kJ)$$

Q_{arranque} es el calor necesario para el arranque del proceso [kJ]

Cp_{biomasa} es el calor específico de la biomasa dentro del digestor $\left[\frac{kJ}{kg K}\right]$

m_{biomasa} es la masa [kg]

$\Delta T [T - T_{\text{inicio}}]$ es el cambio de temperatura de la biomasa antes y después de alimentar al biodigestor [K]

[t] es el tiempo en que se agrega energía a la biomasa [s]

Pérdida de calor del biodigestor

Cuando la temperatura de la superficie de la pared del digestor ($T_{superficie}$) es mayor que la temperatura del aire ambiente (T_{∞}), el digestor se asume que está perdiendo calor. El flujo de calor que fluye por conducción en la interface pared-aire es igual a la suma de las pérdidas de calor por convección y radiación. El calor disipado hacia el ambiente puede evaluarse con la expresión;

$$\dot{Q}_{p\acute{e}rdida\ de\ calor\ a\ trav\acute{e}s\ de\ la\ pared\ del\ biodigestor} = \dot{Q}_{conducci\acute{o}n} = \dot{Q}_{convecci\acute{o}n} + \dot{Q}_{radiaci\acute{o}n}$$

$$\dot{Q}_{convecci\acute{o}n} = h(T_p - T_{\infty})$$

$$\dot{Q}_{radiaci\acute{o}n} = \varepsilon_{pared} \sigma (T_{pared}^4 - T_{\infty}^4)$$

$$Q_{p\acute{e}rdidas\ de\ calor} = \bar{h}_{convecci\acute{o}n\ natural} A (T_{pared} - T_{\infty}) + \varepsilon_{pared} \sigma A (T_{pared}^4 - T_{\infty}^4)$$

$Q_{p\acute{e}rdida\ de\ calor}$ es la pérdida de calor a través de la superficie del digestor [W]

A es el área de transferencia de calor [m^2]

T_{pared} es la temperatura de la superficie de la cubierta protectora del biodigestor [K]

$T_{aire\ ambiente}$ es la temperatura del aire ambiente [K]

h_e es el coeficiente de convección exterior del biodigestor [$\frac{W}{m^2K}$]

El coeficiente de convección ($\bar{h}_{convecci\acute{o}n}$) se podría calcular por el Número de Nusselt (Nu) como una placa vertical plana

$$Nu = \frac{h_c l_{pared}}{k_{aire}}$$

$$\left\{ \begin{array}{ll} 0,664 Re^{1/2} Pr^{1/3} & Re < 2 \times 10^5 \\ 0,037 Re^{4/5} Pr^{1/3} & Re > 3 \times 10^6 \end{array} \right\}$$

Donde, Pr es el Número de Prandtl, Re es el Número de Reynolds calculado como $Re = \frac{u_{\infty} l_{pared}}{\vartheta}$, k_{∞} es la conductividad del aire, u_{∞} es la velocidad del aire ambiente, ϑ es la viscosidad cinemática del aire, ε_{cielo} es el coeficiente de emisividad y σ es la constante de Stefan-Boltzmann y adquiere un valor igual a $5.67 \times 10^{-8} W/m^2K^4$.

Por lo tanto, en el arranque la biomasa dentro del biodigestor debe ser calentado hasta la condición de proceso es termofílica es decir 55 °C. Para ello se hace circular agua caliente por un serpentín inmerso en el biodigestor. El flujo másico del agua caliente que pasa por el serpentín inmerso dentro del digestor y mantener constante la temperatura de la biomasa se obtiene al despejar el flujo másico de la ecuación de calor sensible.

$$\begin{aligned} Q_{\text{agua caliente}} &= \dot{m}_{\text{agua}} C_{p_{\text{agua}}} (T_{\text{entrada de agua}} - T_{\text{salida de agua}}) \\ &= Q_{\text{demanda de potencia térmica al arranque}} \quad (W) \end{aligned}$$

$Q_{\text{demanda de potencia térmica al arranque}}$ es el calor a suministrar para calentar la biomasa desde el arranque del proceso [W]

$C_{p_{\text{biomasa}}}$ es el calor específico de la biomasa dentro del digestor $\left[\frac{kJ}{kg K} \right]$

\dot{m}_{agua} es el flujo másico del agua que circula por el serpentín $\left[\frac{kg}{s} \right]$

$\Delta T [T - T_{ref}]$ es el cambio de temperatura de la biomasa antes y después de alimentar al biodigestor [K]

$$\dot{m}_{\text{agua}} = \frac{\dot{Q}_{\text{demanda de calor biomasa al arranque}}}{C_{p_{\text{agua}}} (T_{\text{entrada de agua}} - T_{\text{salida de agua}})} \quad \left(\frac{kg}{s} \right)$$

Suministro de trabajo al agitador

El biodigestor tiene un sistema de agitación mecánica para hacer al fluido más uniforme, eliminando gradientes de concentración, temperatura y otras propiedades. Éste se efectúa por intercambio de material entre diferentes lugares para producir la mezcla final de los componentes. Esto es debido a que se puede ingresar biomasa de alimentación a diferente temperatura a la encontrada en el interior, por lo tanto, se evita evita la estratificación y se homogeniza la temperatura de la biomasa.

El agitador se mueve por medio de un motor eléctrico y la potencia necesaria para una determinada velocidad de agitación depende de la resistencia ofrecida por el fluido a la rotación del rodete. El rozamiento producido en la caja de cambios del motor del agitador y las juntas reducen la energía transmitida al fluido, por lo que la potencia eléctrica del motor

del agitador siempre es mayor a la necesaria para la mezcla y su magnitud también depende de la eficacia del mecanismo utilizado.

La potencia de mezcla para fluidos no aireados depende de la velocidad de giro del agitador, del diámetro y geometría del rodete y de las propiedades del fluido como densidad y la viscosidad. La relación entre estas variables se expresa generalmente en forma de número adimensional, como el número de Reynolds de rodete Re y el número de potencia Np que se define como:

$$N_p = \frac{P}{\rho N_i^3 D_i^5}$$

Donde

P es la potencia eléctrica del motor

ρ es la densidad del fluido

N_i la velocidad del agitador

D_i el diámetro del rodete

La relación entre Re y Np se determina por experimentación para diversos intervalos de configuración de rodete y tanque. El número de Reynolds se determina por la siguiente relación como:

$$Re_i = \frac{N_i D_i^2 \rho}{\mu}$$

Donde

Re_i es la potencia

ρ es la densidad del fluido

μ es la viscosidad dinámica del fluido

N_i la velocidad del agitador

D_i el diámetro del rodete

Tipo de rodete	$k_1 (Re=1)$	$Np (Re=10^5)$
Turbina Rushton	70	5-6

Canalete	35	2
Hélice marina	40	0.35
Ancla	420	0.53
Cinta helicoidal	1000	0.35

Una vez que se conoce el valor de N_p , la potencia se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$P_{mez} = N_p * \rho * N_i^3 * D_i^5$$

Consumo de energía de motores

Consumo de electricidad de proceso de biodigestión anaerobia.

Equipo	Potencia eléctrica nominal, kW e	Tiempo de operación estimada al día, h	Consumo de energía por equipo [kWh]
Agitador de la biomasa en biodigestor	2,2	2	4,4
Bomba circuladora serpentín biodigestor	0,55	24	13,2
Bomba circuladora planta de cogeneración	0,26	24	6,3

Fuente: Elaboración propia

3.3 Balance de energía en el biodigestor

Cuando la temperatura de biomasa no se mantiene constante es necesario conocer cómo varía ésta con el tiempo. En la figura siguiente se muestra el diagrama de flujo y límites del sistema del biodigestor. La energía térmica se suministra en forma de agua caliente a través de un serpentín inmerso en el reactor, el trabajo mecánico se suministra a la biomasa por medio de un agitador y el flujo de calor que se pierde por la pared del reactor.

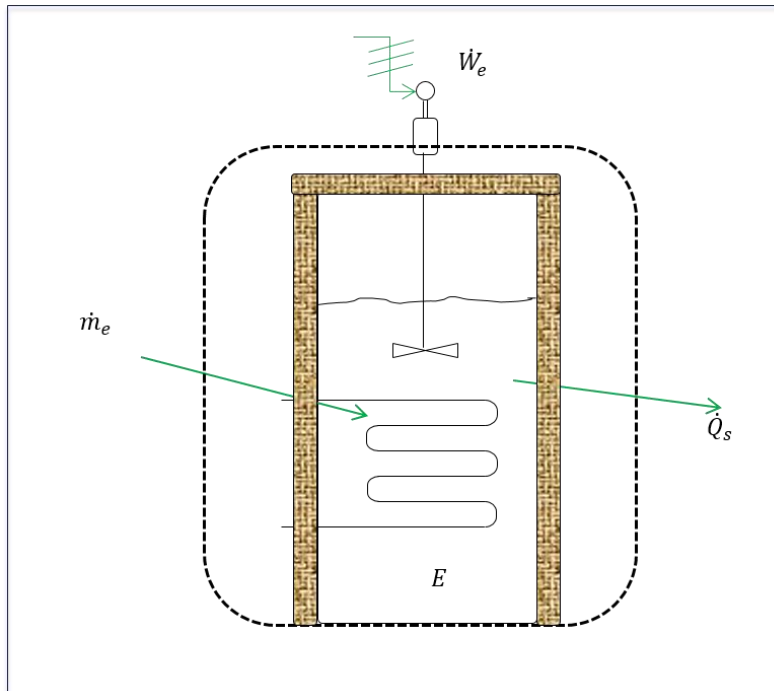


Figura 12 Diagrama de flujo del sistema para la realización de balance de energía

Para calcular la *tasa de cambio* de energía en el sistema, se realiza primero la ecuación del balance de energía mostrada a continuación.

$$\left| \begin{array}{l} \text{energía que entra a través} \\ \text{de los límites del sistema} \end{array} \right| - \left| \begin{array}{l} \text{energía que sale a través} \\ \text{de los límites del sistema} \end{array} \right| = \left| \begin{array}{l} \text{energía que se acumula} \\ \text{en el sistema} \end{array} \right|$$

Donde E es la energía total del sistema que en nuestro caso es representada por el contenido de biomasa en el biodigestor, \dot{W}_e es el trabajo mecánico que se realiza al sistema a través de un motor eléctrico que acoplado a una flecha y paletas mueven la biomasa, \dot{Q}_s es la velocidad de eliminación de calor a través de la pared del biodigestor a pesar del aislamiento térmico y \dot{m}_e es el caudal másico hacia el sistema.

Suposiciones

- Se desprecia la energía cinética y potencial
- La capacidad calorífica de la biomasa es independiente de la temperatura
- No se tiene evaporación del agua de la biomasa

- Se considera que cualquier cambio de contenido de energía del sistema se debe a cambios de temperatura y de calor sensible. No se van a tomar en cuenta las reacciones químicas que suceden dentro del digestor.
- En la etapa de arranque del sistema, se llena el biodigestor de biomasa por lo que no se tiene corrientes de influente ni efluente.

La ecuación del balance de energía puede aplicarse sobre un intervalo de tiempo infinitesimal Δt durante el cual puede considerarse que \dot{W}_e , \dot{Q}_s y \dot{m}_e son constantes.

Entonces, los términos de la ecuación del balance de energía son:

- 1) Entrada; durante el intervalo de tiempo Δt la cantidad de energía que entra al sistema es $\dot{m}_e h_e \Delta t + \dot{W}_e \Delta t$, donde h_e es la entalpía específica de la corriente de flujo de entrada.
- 2) Salida; de la misma manera la cantidad de energía que sale del sistema $\dot{Q}_s \Delta t$
- 3) Acumulación; Representada por ΔE durante el tiempo Δt .

Al introducir estos términos en la ecuación con el primer término de acumulación:

$$\Delta E = \dot{m}_e h_e \Delta t - \dot{Q}_s \Delta t + \dot{W}_e \Delta t$$

Dividiendo ambos lados de la ecuación por Δt :

$$\frac{\Delta E}{\Delta t} = \dot{m}_e h_e - \dot{Q}_s + \dot{W}_e$$

La ecuación para la tasa de cambio de energía en un determinado instante se calcula tomando el límite de la ecuación anterior cuando Δt se aproxima a cero:

$$\frac{dE}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta E}{\Delta t} = \dot{m}_e h_e - \dot{Q}_s + \dot{W}_e$$

Para en el caso de que el biodigestor se lleve a la etapa de operación continua, en este caso si existen varias corrientes, influente y efluente y biogás por lo que todos los caudales másicos y entalpías deben sumarse:

$$\frac{dE}{dt} = \sum (\dot{m} h)_{entrada} - \sum (\dot{m} h)_{salida} - \dot{Q}_s + \dot{W}_e$$

Acumulación de energía en forma de calor

$$\dot{Q}_A = \frac{dE}{dt} = \frac{d}{dt} (m_{biomasa} C_p \Delta T) = \frac{d}{dt} (m_{biomasa} C_{p_{biomasa}} [T - T_{inicio}])$$

Al omitir las pérdidas de calor y trabajo de agitación y reescribir la entrada de calor a través del serpentín de calentamiento inmerso en el biodigestor entonces al igualar los términos de entrada y acumulación de calor;

$$\dot{Q}_E = (\dot{m} h)_{entrada} = UA(T_B - T)$$

$$\dot{Q}_E = \dot{Q}_A$$

$$UA (T_B - T) = (m_{biomasa} C_{p_{biomasa}}) \frac{dT}{dt}$$

$$\frac{dT}{(T_B - T)} = \frac{UA}{m C_p} dt$$

$$T_f = T_B - (T_B - T_o) e^{\left(\frac{-UA t}{m C_p}\right)}$$

Por lo tanto, el tiempo en que tarda la biomasa en alcanzar la condición termofílica se determina sustituyendo el término de acumulación de energía en la ecuación anterior y resolviendo para una temperatura de inicio T_{inicio} de la biomasa que será entonces el tiempo $t = 0$

Capítulo 4 Uso del biogás en sistema de cogeneración

Este capítulo trata sobre la pre factibilidad de utilizar el biogás que es generado en el proceso de biodigestión anaerobia a partir del residuo de nopal-verdura a través de un sistema de cogeneración; compuesto por un motor generador de combustión interna y un intercambiador de calor. Esto para hacer frente a la demanda de electricidad y calor del sistema de biodigestión anaerobia.

4.1 Tecnologías utilizadas para cogeneración

La cogeneración se define como la producción secuencial de energía eléctrica y/o mecánica y de energía térmica, aprovechable en los procesos industriales, a partir de una misma fuente de energía primaria. Para disponer de una visión general de las tecnologías que se utilizan en cogeneración, se muestra una tabla resumen con las principales características de los sistemas de cogeneración existentes:

Tabla 14 Comparación de tecnologías de cogeneración

	MCI Diesel	MCI Otto	Turbina de vapor	Turbina de gas		Micro turbina
				Ciclo simple	Ciclo combinado	
Capacidad (MW)	0,05-5	0,05-5	cualquiera	1-200	1-200	0,025-0,25
Eficiencia η eléctrico (PCI)	30-50%	25-45%	30-42%	25-40%	40-60%	20-30%
Espacio requerido (ft ² /kW)	0.22	0.21-0.31	<0.1	0.02-0.61	0.02-0.61	0.15-1.5
Disponibilidad (%)	90-95	92-97	99	90-98	90-98	90-98
Coste de instalación (USD/kWh)	800-1.500	800-1.500	800-1.000	700-900	700-900	500-1.300

Coste de O&M (USD/kWh)	0.005-0.008	0.007-0.015	0.004	0.002-0.008	0.002-0.008	0,002-0,01
Horas entre mantenimiento mayor	25.000-30.000	24.000-60.000	>50.000	30.000-50.000	5.000-40.000	
Combustible	Diésel, aceites residuales	Gas Natural, biogás, propano	Todos	Gas natural, biogás, propano, aceites destilados		Gas natural, biogás, propano, aceites destilados
Tiempo de arranque	10 s	10 s	1h-1dia	10 min. - 1h	60 s	60 s
Presión combustible (bar)	<0.35	0.07-3	-	8.5-35		3-7
Ruido	Moderado a alto, requiere edificio cerrado	Moderado a alto, requiere edificio cerrado	Moderado a alto, requiere edificio cerrado	Alto (requiere de edificio cerrado)		Moderado a alto, requiere edificio cerrado
NOx (lb/MWh)	3-33	2,2-28	1,8	0,3-4		0,4-2,2
Uso del calor recuperado	Agua caliente, vapor BP, "district heating"	Agua caliente, vapor BP, "district heating"	Vapor BP-AP, "district heating"	Calor directo, Agua caliente, vapor BP-AP, "district heating"		Calor directo, agua caliente, vapor BP
Temperatura aprovechable	82-480	150-260	-	260-595	205-595	205-345

Fuente: Tabla recopilada de Review of combined heat and power technologies (<http://www.distributed-generation.com/library/chp.pdf>, pág.5, 1999)

Para la generación de energía eléctrica de pequeña capacidad destacan la micro turbina y el motor de combustión interna con ciclo Otto. Ambos se encuentran en similares intervalos de parámetros tanto de huella de instalación, costo de instalación y de mantenimiento. Sin embargo, con diferencias en cuanto a emisión de ruido, NO_x y temperatura de los gases de combustión y, por lo tanto, cantidad de calor recuperado. Otro parámetro importante de

diferencia es la presión de admisión del combustible. Mientras que en el motor de combustión interna la presión es 1 lb/plg² o aspiración natural, en cambio en la micro turbina es 40 veces mayor e inclusive puede requerir un compresor.

4.2 Secuencia de estudio de pre factibilidad técnico-económica

La ejecución real de un proyecto viene precedida de una planificación y toma de decisiones que definen el marco en el que se realiza el proyecto. En este apartado se listan los pasos de inicio tal como la obtención del poder calorífico del biogás hasta la etapa de pre factibilidad económica del proyecto a través de indicadores de rentabilidad: valor presente neto, estimación de la tasa interna de retorno y costo nivelado de la electricidad.

1. Datos de partida
 - a) Poder calorífico del biogás
 - b) Requerimientos de demanda eléctrica y térmica de usuarios
2. Tamaño y selección de equipo de cogeneración
3. Costos
4. Evaluación económica

Datos de partida

a) *Estimación del poder calorífico del biogás*

La determinación del poder calorífico del biogás es una de parte importante en el proyecto de cogeneración junto con la cantidad o flujo volumétrico que se genera de biogás, ya que fija el tamaño de la máquina térmica.

Como se ha dicho anteriormente, el biogás está formado principalmente por metano, dióxido de carbono y ácido sulfhídrico y las cantidades presentes de cada uno son quienes determinan el valor calorífico del biogás. En este trabajo, el valor calorífico se determinará mediante gráficas y estas se basan en función de condiciones de presión, temperatura y densidad presente en el biogás. Se estima que la calidad del biogás (después del acondicionamiento) tenga las siguientes características listas para su uso;

Tabla 15 Especificaciones del biogás¹⁷

metano,	CH ₄ , %	50 - 60
bióxido de carbono	CO ₂ , %	35 - 40
ácido sulfhídrico	H ₂ S, ppm	40 - 70
humedad	H, %	3 - 5
temperatura	T, K	296.15
presión manométrica	p, mbar	70 - 300
presión atmosférica	p _{atm} , mbar	761,9
presión absoluta	p _{abs} , mbar	1.061,9
presión parcial de vapor de agua	P _{parcial vapor de agua} , mbar	110
densidad	ρ, kg/m ³	0,75
cantidad de biogás	m ³ /día	173

Fuente: Datos proporcionados por la planta

Primero se corrige la presión del biogás debido al contenido de humedad por el diagrama de la figura 13.

Se considera que el biogás al salir del biodigestor se encuentre en estado de saturación

Presión total del biogás: $p_t = 300 \text{ mbar} + 761,9 \text{ mbar} = 1.061,9 \text{ mbar}$

La humedad relativa (después de la desulfuración y remoción de humedad) se estima en:

25 %. Entonces, a partir del diagrama de la figura 13, la presión parcial del vapor de agua

es de: $p_{parcial} = 5 \text{ mbar}$

¹⁷ Estimaciones propias a partir de datos de la empresa SUEMA

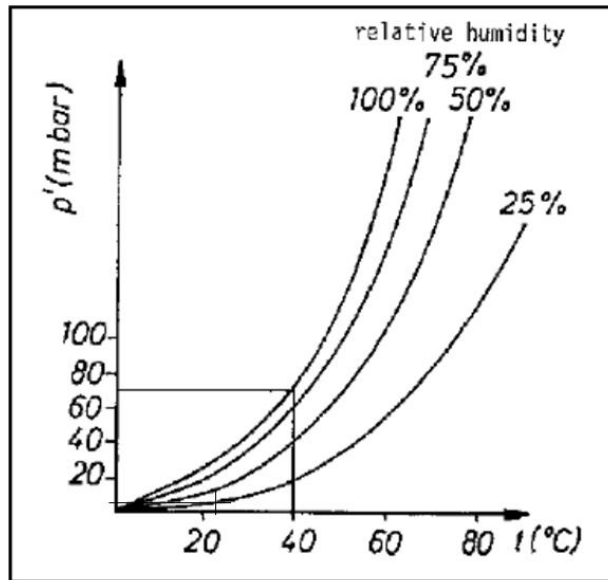


Figura 13 Presión parcial del vapor de agua en el biogás como una función de temperatura y humedad relativa del biogás. Las unidades de la figura son mbar y °C para el eje vertical y horizontal respectivamente.

Fuente: Klaus von Mitzlaff., *Engines for biogas: theory, modification, economy. operation.*; Wiesbaden: Vieweg, 1988. ISBN 3-528-02032-6

Entonces se corrige la presión del biogás;

$$p_c = p_t - p_c = 1.065,95 - 5 \text{ mba} = 1.060,95 \text{ mbar.},$$

Posteriormente, se determina la densidad actual de metano en el biogás usando la temperatura y presión actual del biogás a partir de la figura 13.

La temperatura del biogás: $t_g = 23 \text{ °C}$ (273 K)

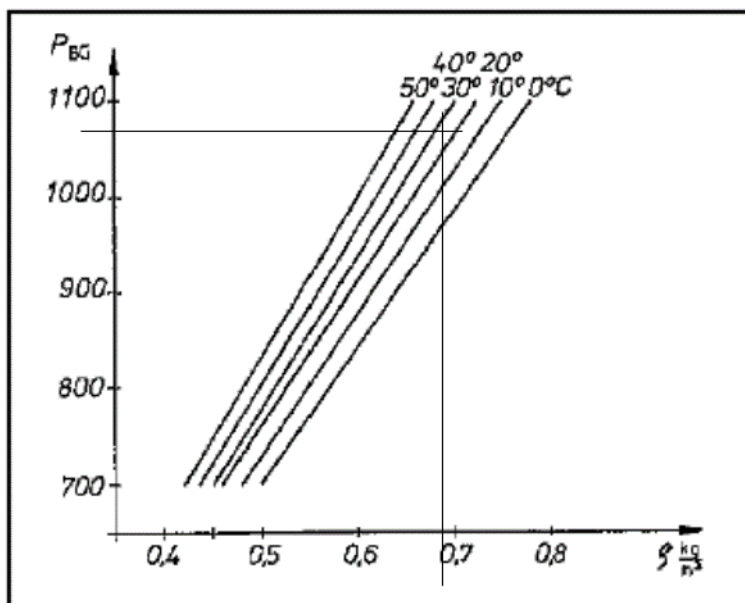


Figura 14 Densidad de Metano (CH₄) como una función de presión y temperatura del biogás. Las unidades de la figura son mbar y kg/m³ para el eje vertical y horizontal respectivamente.

Fuente: Klaus von Mitzlaff., *Engines for biogas: theory, modification, economy, operation*; Wiesbaden: Vieweg, 1988. ISBN 3-528-02032-6

Por lo que se determina una densidad del metano de 0.68 kg/m³. Ahora tomando este valor, se recurre al siguiente nomograma (ver fig. 14) para determinar el poder calorífico del biogás como una función de la densidad del metano y porcentaje de metano que se estima contenga el biogás después de los aparatos de remoción de ácido sulfhídrico y humedad.

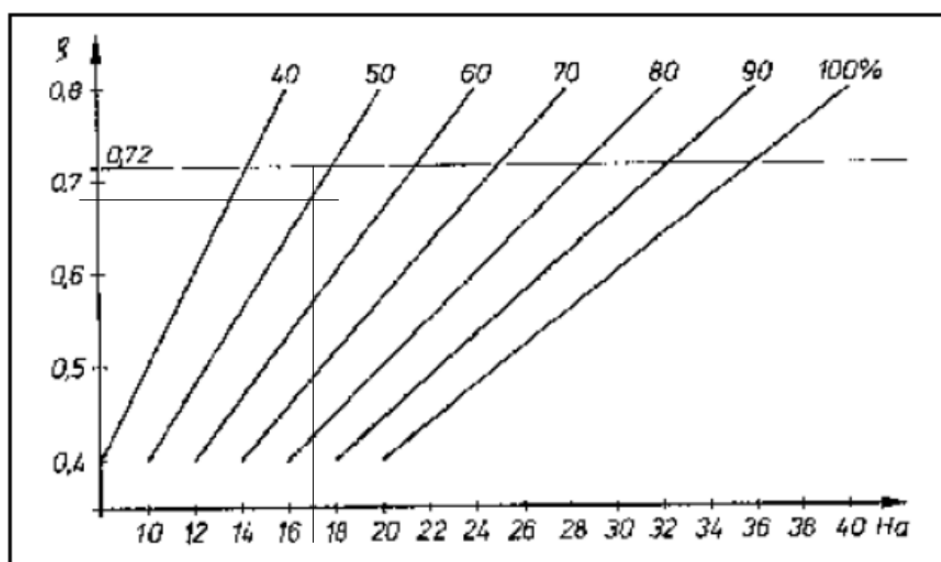


Figura 15 Valor calorífico de biogás como una función de la densidad y volumen de % promedio de su contenido de CH₄ ($\rho=0.72$ es la densidad a condiciones normales). Las unidades de la figura son kg/m³ y kJ/m³ para el eje vertical y horizontal respectivamente.

Fuente: Klaus von Mitzlaff., *Engines for biogas: theory, modification, economy. operation.*; Wiesbaden: Vieweg, 1988. ISBN 3-528-02032-6

Entonces a partir de la figura anterior se estima que el biogás tenga a la entrada de la máquina térmica un poder calorífico de 17.000 kJ/m³ (4,72 kWh/m³) (4.060,38 kcal/m³) a las condiciones de entrada a la máquina térmica y sitio.

b) Requerimientos de demanda de energía eléctrica y térmica

Demanda de energía eléctrica

Iluminación del Centro de Acopio de Nopal Verdura (CANV)

La electricidad que se produzca por el sistema de cogeneración se utilizara en parte en cubrir la carga de iluminación de las naves y vialidades del centro de acopio. La iluminación está constituida por lámpara lineal de tubo LED de 18 W en las cuatro naves y lámpara de descarga de alta intensidad de 250 W para las vialidades del lugar.

Tabla 16 Datos de carga de iluminación del Centro de Acopio

Equipo	Demanda eléctrica (kW)	Tiempo de operación (h)	Consumo de energía (kWh)	Consumo de corriente (A)
Lámpara lineal de tubo led T8 2 x 18 W 120 cm	2.25	13	29,25	23.4
Lámpara de descarga de alta intensidad 1 x 250 W Luminario SB-2000 Sola Basic	4.20	13	54,6	16.9
Total	6.45	13	83,85	40.3

Fuente: Elaboración propia a partir de diagnóstico energético

El tiempo de funcionamiento de la iluminación es de 13 h (desde las 19:00 h hasta las 08:00 h del día siguiente). Por lo tanto, una demanda de potencia eléctrica de 6.45 kW, un consumo diario de 83,85 kWh/día a una tensión de alimentación de 220 VCA. Por lo que el generador eléctrico debe proporcionar 8.8 kVA.

En la siguiente figura se representa el perfil de consumo de energía eléctrica del sistema de iluminación.

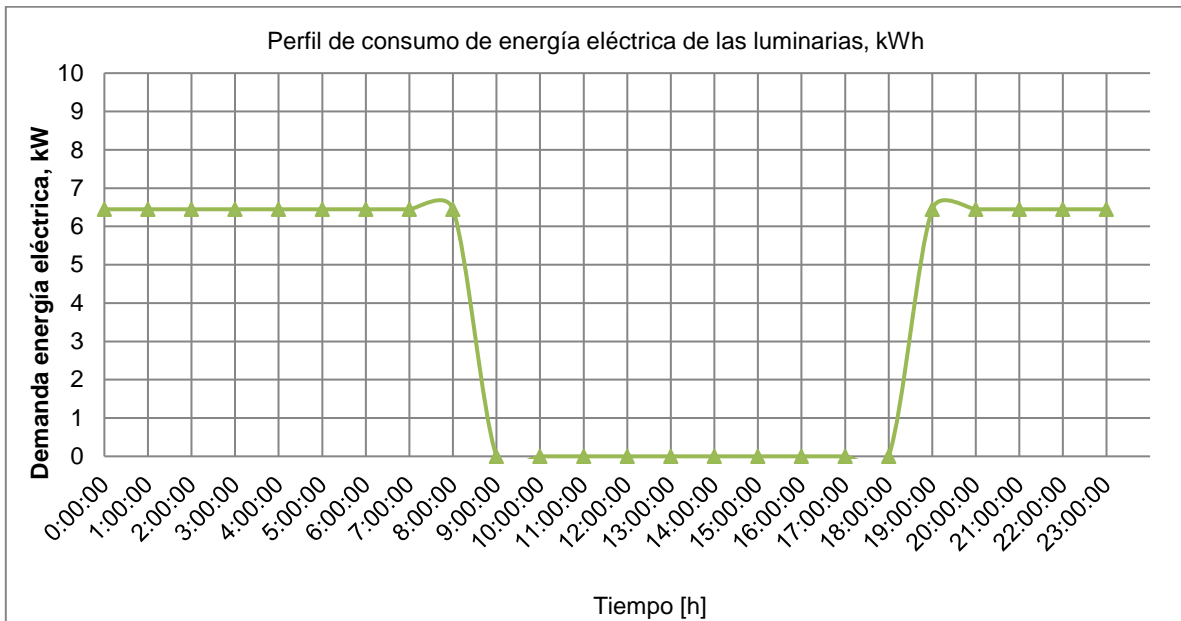


Figura 16 Perfil de consumo de energía eléctrica del sistema de iluminación del Centro de Acopio Nopal-Verdura

Se aprecia una carga constante y se estima que el motor generador operación estable.

Ahora por el lado de necesidades de electricidad por parte del proceso de biodigestión se muestra a partir de la figura 9 son para el arrastre de motores.

Consumo de electricidad de proceso de biodigestión anaerobia.

Equipo	Potencia eléctrica nominal, kW e	Tiempo de operación estimada al día, h	Consumo de energía por equipo [kWh]
Agitador de la biomasa en biodigestor	2,2	2	4,4
Bomba circuladora serpentín biodigestor	0,55	24	13,2
Bomba circuladora planta de cogeneración	0,26	24	6,3

Fuente: Elaboración propia

Demanda de energía térmica (agua caliente)

El requerimiento de energía térmica del biodigestor consta de tres conceptos;

- 1) la carga térmica al arranque de operaciones; calentar la biomasa desde 15 °C hasta 55 °C;
- 2) la carga térmica en operación continua, calentar la biomasa que se va a alimentar al biodigestor; y
- 3) la carga térmica debido a las pérdidas de calor por conducción a través de la pared del biodigestor.

Estos cálculos se pueden obtener a partir de las ecuaciones dadas en el capítulo 3. Se resumen de la siguiente manera.

Tabla 17 Requerimiento de energía

Fase	[J]
arranque	1.127.729.3457
operación continua	234.600.000

Fuente: Elaboración propia

Para el suministro de energía térmica en la etapa de arranque se hace uso del sistema de cogeneración con combustible de gas natural. Y en operación continua del combustible a biogás.

4.3 Selección de equipo de cogeneración

Hasta este momento ya se tienen datos para determinar la capacidad y el tipo del equipo de cogeneración. Por ejemplo, a partir de la generación de biogás de 192 m³ al día y suponiendo una operación continua de 24 horas, entonces se tendrá un flujo de consumo de combustible de 8 m³/h. El poder calorífico del combustible de 17.000 kJ/m³ (4,72 kWh/m³) (4.060,38 kcal/m³) a las condiciones de entrada a la máquina térmica y sitio. Por lo tanto, una potencia de 37,7 kW.

Con base con las condiciones de operación, el consumo de combustible y conocimiento de tecnología se optó por elegir un motor de combustión interna debido a que la capacidad del motor es de acuerdo con consumo de biogás, la aspiración de biogás del motor de combustión es natural, es decir no requiere elevar la presión de succión a diferencia de una

microturbina. El equipo seleccionado es un motor de combustión interna a biogás modelo E-QC100 marca mopesa. Potencia motor en continuo @ 1800 r.p.m. de 10,7 B.H.P y una potencia eléctrica de 8 kW e / 10 kVA y 70 % de metano en el biogás.



Figura 17 Motor de combustión interna de la marca mopesa® e intercambiador de calor de la empresa Eficiencia Thermoe®

Fuente: <http://www.mopesa.com.mx/Biogas.html>
<http://eficienciatermoe.com/>

Descripción del sistema de cogeneración.- La conversión de energía química del biogás a energía mecánica y posteriormente a energía eléctrica se lleva a cabo en un equipo de combustión directa. El biogás que es generado en el biodigestor se envía un equipo de combustión interna se convierte a energía mecánica al mover un generador eléctrico. La energía eléctrica se envía a un tablero de distribución mientras que la energía térmica de los gases de escape antes de ir al ambiente se hace pasar por los tubos de un intercambiador de calor por un lado y por otro el lado de la carcasa agua

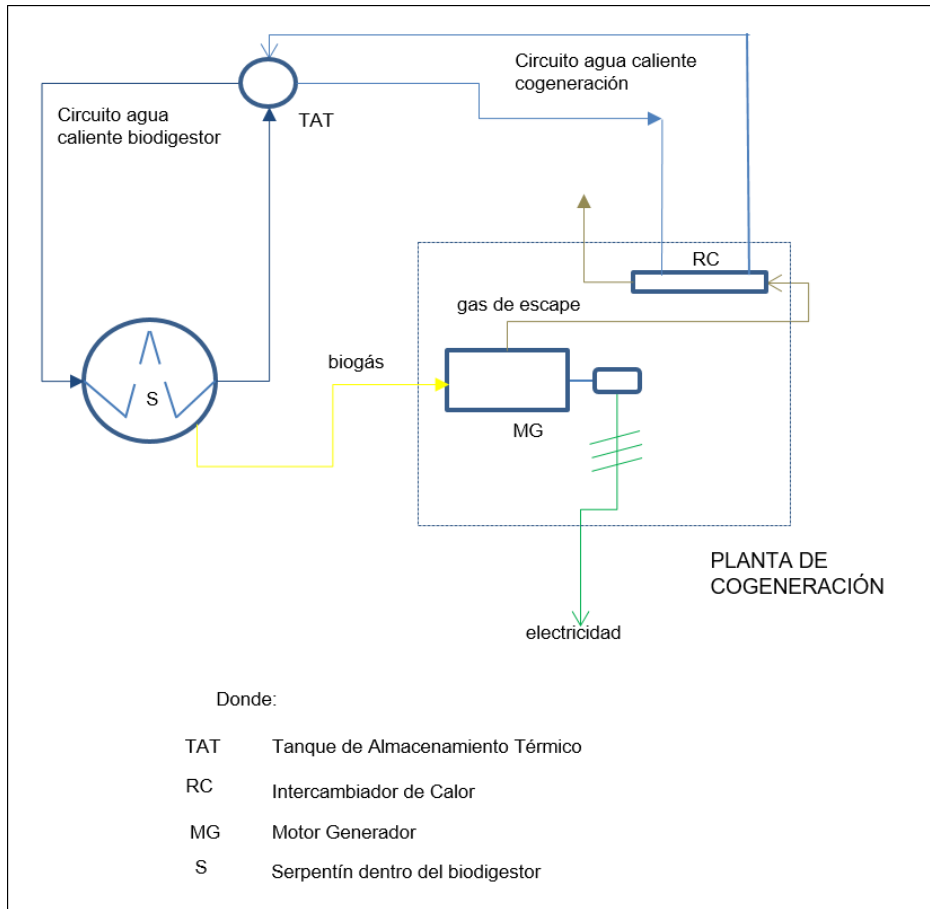


Figura 18 Esquema de cogeneración interactuando con el biodigestor

Fuente: Elaboración propia

La producción de electricidad al año tomando 90% de operación de los 365 días del año.

$$8 \text{ kW } e * 7.884 \text{ h/año} = 63.072 \text{ kWh } e/\text{año}$$

Ahora por el lado de energía térmica, el resto de la energía que proporciona el biogás al motor de combustión interna se disipa en forma de calor; gas de escape, enfriamiento de la camisa del motor o monoblock, radiación y otros. Se considera que del total de energía que posee el biogás un (44 %) se disipa en energía térmica y se desglosa de la siguiente manera;

- 1) Enfriamiento del aceite de lubricación, de 5 a 7 %
- 2) Enfriamiento del monoblock, 17 a 30 %
- 3) Gases de escape, 26 a 30 %

El calor residual producto de la combustión se va a recuperar por medio de un (intercambiador de calor de casco y tubos) para calentar el agua del tanque de almacenamiento térmico.

$$37,7 \text{ kW} * \left(\frac{30}{100}\right) = 11,3 \text{ kW t}$$

La producción de calor al año tomando 90% de operación de los 365 días del año.

$$11,3 \text{ kW} * 7.884 \text{ h/año} = 89.168 \text{ kW t}$$

Uno de los parámetros más importantes del proceso de digestión es mantener la temperatura de la biomasa dentro del biodigestor en una temperatura casi sin fluctuaciones +/- 2°C.

En la gráfica siguiente se representa el comportamiento de temperatura del tanque de almacenamiento cuando se agrega el calor residual procedente de los gases de combustión y además al suministro y pérdida de calor del biodigestor en un día de operaciones tal como se muestra en la tabla 8 y a partir de esta temperatura mandar el fluido al serpentín de calentamiento.

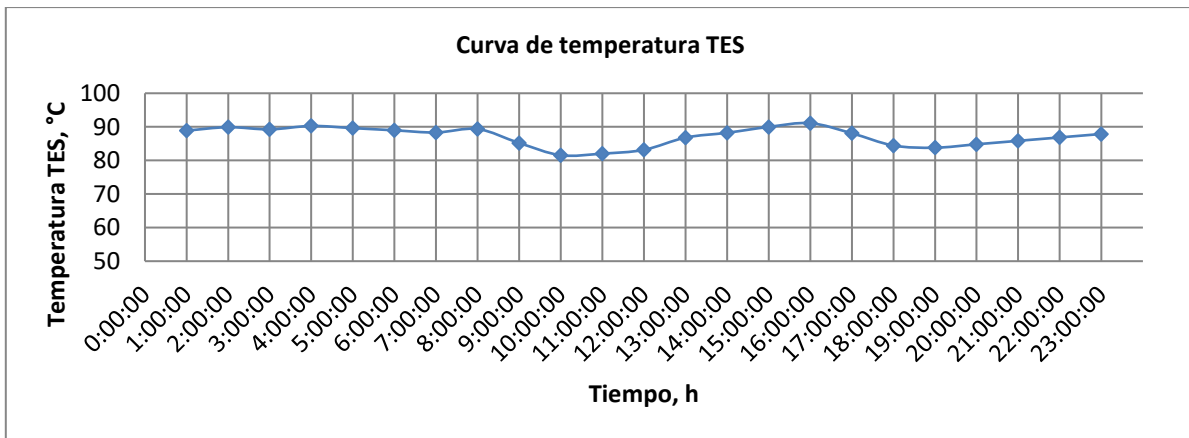


Figura 19 Perfil de temperatura en un tanque de almacenamiento térmico

La temperatura del agua en el tanque de almacenamiento térmico se mantiene casi constante en 90 °C. Entonces, una vez que se tenga producción de biogás se podrá poner en funcionamiento el sistema de cogeneración.

Eficiencia del sistema de cogeneración.- La eficiencia en equipos de combustión se define como el cociente de la energía entregada o útil y la energía suministrada, es decir:

$$Eficiencia = \frac{Energía\ útil}{Energía\ suministrada}$$

$$\eta_g = \frac{V + E}{Q}$$

en donde:

η_g Rendimiento global del sistema, %

V Valor útil producido, kW

E Energía eléctrica generada en el periodo, kW

Q Combustible consumido por la planta, kW (PCI)

$$\eta_g = \frac{V + E}{Q} = \frac{8,0 + 11,3}{37,7} * 100 = 51,2 \%$$

Se estima que el tiempo para alcanzar la temperatura de 55 °C de la biomasa en la fase de arranque sea de 4 semanas a través de un suministro continuo de potencia térmica de 11,3 kW procedente de los gases de combustión.

4.4 Costos y beneficios

Para el estudio económico, es necesario definir los costos de los equipos necesarios para generar energía eléctrica y térmica a través del biogás.

Costos.- Costos de capital son divididos en costos directos (gastos asociados a la compra del equipo) y costos indirectos (gastos asociados con la inversión inicial no directamente relacionada con la compra del equipo). Los costos de operación son divididos en costos fijos (gastos de funcionamiento que no varían con el tamaño del sistema o las horas de operación) y los costos variables (gastos de funcionamiento que varían con el tamaño del sistema y/o las horas de operación). Con respecto a los beneficios del proyecto son la reducción de la factura energética debido a la operación o proceso de biodigestión.

Inversión del sistema de cogeneración

Costos de capital

Costos directos	Pesos/año
Sistema de cogeneración (motor de combustión interna, intercambiador de calor de casco y tubos, bomba circulador, tubería, válvulas de mariposa, aislamiento térmico, estructura para soporte de tubería, silenciador e instrumentación)	\$172.080
Lámparas de tipo led	\$27.761,6

Fuente. Elaboración propia a partir de cotización de equipos

Costo del Mantenimiento

Costos de mantenimiento

Costos directos	Pesos/año
Refacciones (cambio de 4 L de aceite cada 250 horas y cambio de filtros de aire y aceite, cambio de bujías cada 500 horas de operación)	\$20.396

Fuente. Elaboración propia a partir de ficha técnica de un motor generador E-QC100 marca mopesa. Potencia motor en continuo @ 1800 r.p.m. de 10,7 B.H.P y una potencia eléctrica de 8 kW e / 10 kVA y 70 % de metano en el biogás

Costos de Operación del proceso de biodigestión

Costos de operación del proceso de biodigestión

Costos directos	Pesos/año
Consumo energía eléctrica de (agitador biomasa y sistema de bombeo)	\$ 9.095,2

Fuente. Elaboración propia tomando en cuenta que el cargo por consumo de energía eléctrica es de 1,040 pesos/kWh en tarifa OM

Beneficios

Reducción de costo de facturación por consumo de electricidad

Los beneficios fueron estimados a partir de un balance de energía entre la generación de energía eléctrica y el que es usado por los equipos propios del proceso de biodigestión anaerobia.

Reducción de costo de facturación por consumo de gas LP

Para conocer el beneficio de aprovechar el calor residual en lugar de generar calor por medio de un calentador con combustible convencional, por ejemplo gas L.P y estimar un

costo económico que es equivalente al calor que se espera tener por el aprovechamiento de los gases de combustión:

Generación de calor

$$11,3 \text{ kW t } (9.722,7 \frac{\text{kcal}}{\text{h}})$$

La cantidad de combustible de gas L.P para un requerimiento de calor considerando una eficiencia térmica, η de 80 % en un calentador de un paso sería:

$$\dot{m}_{\text{combustible}} = \frac{\dot{Q}_{\text{calor}}}{PCI_{\text{gas L.P}} \eta_{\text{calentador de agua}}}$$

$$\dot{m}_{\text{combustible}} = \frac{9.722,7 \text{ kcal/h}}{6.623 \text{ kcal/L (80 \%)}} = 1,83 \frac{\text{L}}{\text{h}}$$

$PC_{\text{gas LP}} = 6.623 \text{ [kcal/L]}$

<http://www.powermaster.com.mx/www/informacion/combustibles.html>

El tiempo de funcionamiento del motor de combustión interna es de 13 h, que es el mismo que se espera opere el calentador convencional entonces;

$$1,83 \frac{\text{L}}{\text{h}} * 13 \text{ h/día} = 23,8 L_{\text{gas L.P}}$$

El costo del gas LP es de: \$7,04 pesos/L¹⁸

Entonces el costo de generar calor se estima en:

$$\$7,04 \frac{\text{pesos}}{\text{L}} * 23,8 L = 167,9 \text{ pesos.}$$

Entonces;

$$\frac{\$167,9}{9.722,7 \frac{\text{kcal}}{\text{h}} * 13 \text{ h}} = 0,00132 \frac{\$}{\text{kcal}}$$

Con respecto a un año se estima un costo de operación de \$61.298,6 pesos, que sería el equivalente al calor que se espera tener por el aprovechamiento de los gases de combustión.

¹⁸ (http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5421976&fecha=31/12/2015)

Ahora se hace un balance por la parte de energía eléctrica entre lo que consume el centro de acopio antes de implantar un sistema de tratamiento de residuos de nopal-verdura, el biogás generado, las medidas de eficiencia energética y el propio del proceso de biodigestión.

Tabla 17 Balance energético

Consumo de energía eléctrica CANV 2015	69.240	kWh/año
	203	kWh/d
Consumo energía eléctrica de proceso de biodigestión (agitador biomasa y sistema de bombeo)	33.174	kWh/año
	91	kWh/d
Producción energía eléctrica por sistema de cogeneración	63.072	kWh/año
	192	kWh/d
Ahorro de energía eléctrica por sustitución de lámparas fluorescentes por led	13.869	kWh/año
	38	kWh/d

Tal como se observa en la tabla 17, la generación de energía eléctrica por el sistema de cogeneración y el ahorro de energía eléctrica debido a las medidas de eficiencia energética (cambio de luminarias fluorescentes por led) alcanza a cubrir la totalidad del consumo de energía eléctrica de energía eléctrica del correspondiente al CANV. Sin embargo, no es así cuando se agrega la carga eléctrica del proceso de biodigestión. Al hacer el balance de consumo de energía se espera una facturación de 25.473 kWh al año lo que representa 36,7%.

4.5 Evaluación económica

Se debe aclarar en el estudio de evaluación económica que el biogás tiene un costo de obtención, es decir al correspondiente a la infraestructura como es el biodigestor y el costo de operación y mantenimiento. Estos costos no se incluirán en el estudio solamente el correspondiente al sistema de cogeneración.

Valor Presente Neto.- es la ganancia o pérdidas en términos del valor de dinero en este momento (tiempo presente), después de haber recuperado la inversión inicial a una tasa de interés (i), que considera el cambio del valor del dinero en el tiempo. La fórmula para el cálculo es:

$$VPN = \sum_{t=0}^n \frac{(B_t - C_t)}{(1 - r)^t}$$

Donde:

B_t = beneficios totales en el periodo t;

C_t = costos totales en el periodo t;

r = tasa de descuento;

n = número de años del horizonte de evaluación, y

t = año calendario, en donde el año cero será el año del inicio de las erogaciones del gasto de inversión

Fuente:

http://www.shcp.gob.mx/LASHCP/MarcoJuridico/ProgramasYProyectosDeInversion/Lineamientos/costo_beneficio.pdf

Tasa Interna de Retorno.- Este indicador refleja el rendimiento de los fondos invertidos, siendo un elemento de juicio muy usado y necesario para cuando se hace bajo una óptica de racionalidad y eficiencia financiera. Es la tasa de actualización que hace nulo el VPN del proyecto. La decisión de inversión con base en la TIR es que se debe seleccionar el proyecto cuya TIR sea mayor que la tasa de oportunidad que los inversionistas han escogido.

El proyecto requiere una inversión inicial de	\$ 199.841
La tasa de descuento	10 %
Los ingresos por kWh de electricidad generada son:	1,04 \$/kWh
Los ingresos por kcal/h de agua caliente generada son:	0,00132 \$/kcal

Se espera que los flujos de efectivo durante los 5 años de vida útil sean los siguientes:

Periodo	0	1	2	3	4	5
Egresos de efectivo	\$ - 199.841	\$ -20.396	\$ -20.396	\$ -20.396	\$ -20.396	\$ - 20.396
Generación de electricidad (kWh)		43.767	43.767	43.767	43.767	43.767
Generación de agua caliente (kcal)		46.130.89 0	46.130.89 0	46.130.89 0	46.130.89 0	46.130.8 90

Ingresos de efectivo		\$ 106.410	\$ 106.410	\$ 106.410	\$ 106.410	\$ 106.410
Flujo neto de efectivo	\$ - 199.841	\$ 86.014	\$ 86.014	\$ 86.014	\$ 86.014	\$ 86.014
Flujo neto de efectivo descontado	\$ - 199.841	\$ 78.195	\$ 71.086	\$ 64.624	\$ 58.749	\$ 53.408
Flujo neto de efectivo descontado acumulado	\$ - 199.841	\$ - 121.646	\$ -50.560	\$ 14.064	\$ 72.813	\$ 126.221
El NPV es la suma de todos los flujos netos de efectivo descontados-->					NPV =	\$ 126.221
					TIR =	20%

Costo nivelado de energía.- Es una extensión del método basado en el VPN que incorpora un elemento 'generador de energía'. Se usa para comparar el coste de energía relativo producido por diferentes proyectos de generación de energía con independencia de su tamaño y periodo de vida.

$$LCOE = \frac{\text{Coste total del ciclo de vida del proyecto}}{\text{Total energía generada durante la vida del proyecto}}$$

Esto se puede expresar con la ecuación:

$$LCOE = \frac{I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{A_t}{(1+i)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+i)^t}}$$

Donde

I_0 es la inversión de capital en el periodo cero

A_t es el total de costos (egresos) en cada periodo subsecuente t

E_t es la energía generada (en kWh) en cada periodo t

i es la tasa de descuento utilizada

n es la vida útil del proyecto

Periodo	0	1	2	3	4	5
Inversión de Capital inicial	\$ 199.841					
Costos de operación		\$ 20.396	\$ 20.396	\$ 20.396	\$ 20.396	\$ 20.396
Ingresos (no por venta de energía)	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Flujo de efectivo neto	\$ 199.841	\$ 20.396	\$ 20.396	\$ 20.396	\$ 20.396	\$ 20.396
Flujo de efectivo neto descontado	\$ 199.841	\$ 18.542	\$ 16.856	\$ 15.324	\$ 13.931	\$ 12.664
Generación eléctrica (kWh)		43.767	43.767	43.767	43.767	43.767
Generación eléctrica descontada (kWh)		39.788	36.171	32.883	29.893	27.176

Costos totales descontados en vida útil	\$ 277.158
Generación de energía total descontada en vida útil	165.911 kWh
Por consiguiente, el LCOE es	1,67 \$/kWh

En este capítulo se llevó a cabo el estudio de usar el biogás como combustible en un motor de combustión interna y además aprovechar el calor residual del gas producto de la combustión. Se encontró oportunidad en que la energía eléctrica y térmica sea para el consumo del proceso de biodigestión anaerobia y centro de acopio.

Conclusiones y recomendaciones

Este estudio permitió constatar que un área de oportunidad de eficiencia energética es en los mercados públicos y centros de abasto debido a que con la tecnología de digestión anaerobia se puede contribuir a la mitigación de residuos orgánicos y consumo de energía eléctrica, además del aprovechamiento del calor residual del sistema de cogeneración en el proceso de digestión anaerobia.

La generación de energía eléctrica por el sistema de cogeneración y el ahorro de energía eléctrica debido a las medidas de eficiencia energética (cambio de luminarias fluorescentes por led) alcanza a cubrir la totalidad del consumo de energía eléctrica de energía eléctrica del correspondiente al CANV. Sin embargo, no es así cuando se agrega la carga eléctrica del proceso de biodigestión. Al hacer el balance de consumo de energía se espera una facturación de 25.473 kWh al año lo que representa 36,7%.

Se pudo constatar que en el caso de México son pocos los trabajos de digestión anaerobia de tipo industrial y la información insuficiente por lo que se recomienda para el caso de diseño de plantas y con énfasis en la eficiencia energética llevar a cabo estudios de exergía y con ello mejorar en el diseño de plantas y disminuir costos de operación y mantenimiento.

Bibliografía

Libros

- SAGARPA., *“Diagnóstico General de la Situación Actual de los Sistemas de Biodigestión en México”*
- SAGARPA, *“Aprovechamiento de biogás para la generación de energía eléctrica en el sector agropecuario”*, Documento de Trabajo, FIRCO, mayo del 2007.
- AKÉ MADERA, Miguel, (2015) *“Nopal, fuente excepcional de energía renovable limpia y sustentable*. SNTE 2015, México, ISBN: 978-607-8405-16-9.
- KLAUS von MITZLAF, (1988) *“Engines for biogas: theory, modification, economic, operation”*, GTZ, Federal Republic of Germany
- RINCÓN MEJÍA, Eduardo, (1999) *“Estado del Arte de la Investigación en Energía Solar en México”*, CUADERNOS FICA, México, ISSN 1405-387X

Artículos de investigación

- G.D. ZUPANCIC, M. Ros., (2003) *“Heat and requirements in thermophilic anaerobic sludge digestion”* Renewable Energy No. 28, p. 2255-2267.
- BASRAWI, FIRDAUS., et al. *“Effect of Ambient Temperature on the Energy Balance of Anaerobic Digestion Plants”*., Journal of Environment Engineering, Vol. 5, No. 3, 2010.
- JIGAR, Elias, et al. *“Study on renewable biogas energy production from cladodes of Opuntia ficus indica”*., Journal of Food and Agriculture Science, Vol. 1(3), pp.44-48, Diciembre 2011.
- GUTIERREZ GARCIA, Guadalupe et al, (2012) *“Biogás: una alternativa ecológica para la producción de energía”*, Ide@s CONCYTEG, 7 (85), pp. 881-894.

Revistas

- Revista La Gran Época. *“Biomasa de nopal (Opuntia) para la bioenergía: Aseguramiento de suministro en forma continua y sustentable”* del Instituto de Biotecnología y la Facultad de Ciencias Silvoagropecuarias de la Universidad Mayor de Chile

Internet

- SENER/acciones y Programas., Disponible en:

<http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/249/PEAER-2014.pdf>

- SAGARPA/SALA DE PRENSA/Boletines/ ., Disponible en:

<http://www.sagarpa.gob.mx/saladeprensa/2012/Paginas/2015B005.aspx>

-Concejo Nacional de Ciencia y Tecnología., Disponible en:

<http://www.conacytprensa.mx/index.php/tecnologia/energia/723-desarrolla-empresa-mexicana-biogas-y-electricidad-a-partir-de-la-biomasa-de-nopal>. Disponible: 28 de noviembre de 2015)

<http://tecnoagro.com.mx/revista/en-linea/2015/93-no-100/2597-nopal-el-oro-verde>

http://www.cofupro.org.mx/cofupro/cofupro_web.php?idseccion=1910. Disponible: 28 de noviembre de 2015)

<http://www.distributed-generation.com/library/chp.pdf>. Disponible: 28 de noviembre de 2015)