



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios de Postgrado
Maestría en Energía y Ambiente

**ESTUDIO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLANTA TERMOELÉCTRICA PILOTO
ORC, ALIMENTADA CON EL RESIDUO ORGÁNICO DEL CAMPUS CENTRAL DE LA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**

Ing. Carlos Manuel Quán Krueck

Asesorado por la MSc. Ing. Víctor Manuel De León Contreras

Guatemala, octubre de 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTUDIO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLANTA TERMOELÉCTRICA PILOTO
ORC, ALIMENTADA CON EL RESIDUO ORGÁNICO DEL CAMPUS CENTRAL DE LA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ING. CARLOS MANUEL QUÁN KRUECK

ASESORADO POR EL MSC. ING. VÍCTOR MANUEL DE LEÓN CONTRERAS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

MAESTRO EN ENERGÍA Y AMBIENTE

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
DIRECTOR	Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
EXAMINADOR	Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque
EXAMINADOR	Ing. Cesar Augusto Castillo Morales
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**PLANTA TERMOELÉCTRICA PILOTO ORC, ALIMENTADA CON EL RESIDUO ORGÁNICO
DEL CAMPUS CENTRAL DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 22 de marzo de 2017.

Ing. Carlos Manuel Quán Krueck



Decanato
Facultad de Ingeniería
24189101- 24189102
secretariadecanato@ingenieria.usac.edu.gt

LNG.DECANATO.OI.734.2022

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Estudios de Posgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **ESTUDIO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLANTA TERMOELECTRICA PILOTO ORC, ALIMENTADA CON EL RESIDUO ORGANICO DEL CAMPUS CENTRAL DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**, presentado por: **Carlos Manuel Quán Krueck**, que pertenece al programa de Maestría en artes en Energía y ambiente después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
Decana



Guatemala, noviembre de 2022

AACE/gaoc



Guatemala, noviembre de 2022

LNG.EEP.OI.734.2022

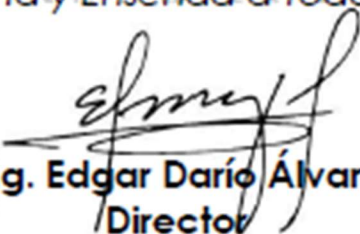
En mi calidad de Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del asesor, verificar la aprobación del Coordinador de Maestría y la aprobación del Área de Lingüística al trabajo de graduación titulado:

“ESTUDIO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLANTA TERMOELÉCTRICA PILOTO ORC, ALIMENTADA CON EL RESIDUO ORGÁNICO DEL CAMPUS CENTRAL DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA”

presentado por **Carlos Manuel Quán Krueck** correspondiente al programa de **Maestría en artes en Energía y ambiente**; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”


Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director

**Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería**





Guatemala, 17 septiembre 2022

EEPFI-1120-2021

Como Coordinador de la **Maestría en Energía y Ambiente** doy el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado: **"ESTUDIO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLANTA TERMOELÉCTRICA PILOTO ORC, ALIMENTADA CON EL RESIDUO ORGÁNICO DEL CAMPUS CENTRAL DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA"** presentado por la Ingeniero **Carlos Manuel Quán Krueck** quien se identifica con Carné **200915399**.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"

Mtro. Juan Carlos Fuentes Montepeque
Coordinador de Maestría
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería



Guatemala, 17 de septiembre de 2022

A quien corresponda,

En calidad como Asesor del Ingeniero **Carlos Manuel Quán Krueck** quien se identifica con el carné **200915399** procedo a dar el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado: **"ESTUDIO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLANTA TERMOELÉCTRICA PILOTO ORC, ALIMENTADA CON EL RESIDUO ORGÁNICO DEL CAMPUS CENTRAL DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA"**. Quien se encuentra en el programa de **Maestría en Energía y Ambiente** en la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Atentamente

"Id y Enseñad a Todos"



MSc. Ing. Víctor Manuel De León Contreras

Asesor

Víctor Manuel De León Contreras
MSc. Ing. Electricista
Colegiado 7739

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por todas sus bendiciones, por darme las fuerzas para superar los obstáculos y dificultades a lo largo de toda mi vida.
Mis padres	Carlos Quán (q. e. p. d.) y Hilda Krueck. Por su apoyo y amor incondicional.
Mis tíos	Juan Filippi, Lucrecia Quán de Filippi y Manuel Krueck (q. e. p. d.). Por los ánimos y el apoyo que siempre han mostrado.
Mis abuelos	Lucrecia Mencos de Quán, Hilda Juárez, Juan Krueck (q. e. p. d.) y Rafael Quán (q. e. p. d.). Por todas sus enseñanzas, sabiduría y cariño.
Mi prima	Ginna Filippi. Por su sinceridad, franqueza y buen humor.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala Por ser mi *alma mater*.

Facultad de Ingeniería Por los conocimientos que me ha conferido.

Mis asesores Rocío Reyna, Erick Castillo y Víctor De León. Por sus conocimientos y la confianza que han puesto en mí.

Mis mejores amigos Diego Oliva, Diego Maldonado, Manuel Galicia, Thelmy Cruz y Maira Zecaida; por estar ahí siempre que los he necesitado.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XII
PLANTEAMIENTO DE PROBLEMA Y FORMULACIÓN DE PREGUNTAS ORIENTADORAS	XV
OBJETIVOS	XXI
RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO	XXIII
INTRODUCCIÓN	XXVII
1. CONTEXTO DEL CAMPUS CENTRAL	1
1.1. Estudios previos	1
1.2. Quema a cielo abierto de biomasa y sus efectos en el campus central	5
1.3. Demanda energética en el campus central	6
1.3.1. Edificios con mayor consumo energético	7
1.3.2. Intensidad energética per cápita	9
1.3.3. Emisiones asociadas al consumo de energía	10
1.4. Lineamientos de la política energética universitaria	12
1.4.1. Propuesta de la Política Energética por López 2015	12
2. BIOENERGÍA	15
2.1. Plantas térmicas	15
2.2. Eficiencia energética	17
2.3. Poder calorífico	18

2.3.1.	Poder calorífico inferior (PCI).....	19
2.3.2.	Poder calorífico superior (PCS)	19
2.4.	Biomasa	19
2.4.1.	Tipos de biomasa	20
2.4.2.	Conversión de la biomasa en energía	21
	2.4.2.1. Métodos termoquímicos.....	21
2.4.3.	Balance <i>CO2</i> neutro.....	22
2.4.4.	Ventajas del uso sostenible de la biomasa.....	23
2.5.	Plantas termoeléctricas de biomasa	24
2.6.	Ciclo Rankine.....	27
2.6.1.	Etapas del ciclo.....	28
2.6.2.	Fluido ideal	30
2.6.3.	Ciclo Rankine con fluido orgánico (ORC)	31
	2.6.3.1. Ventajas	33
	2.6.3.2. Desventajas	34
2.7.	Generador distribuido renovable (GDR)	34
2.7.1.	Norma técnica de generación distribuida renovable y usuarios autoprodutores con excedentes de energía (NTGDR).....	34
3.	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....	37
3.1.	Cantidad y calidad energética de la materia orgánica del <i>campus</i> central.....	37
3.2.	Propuesta de un bosque energético dentro del campus central	38
3.3.	Capacidad bioenergética del <i>campus</i> central	39
4.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	43
4.1.	Dimensionamiento y selección de componentes	43

4.2.	Ubicación propuesta para el centro de almacenaje y procesamiento de biomasa para la generación eléctrica	43
4.3.	Secado, astillado y almacenamiento de la biomasa.....	44
4.4.	Aporte energético.....	45
4.5.	Emisiones al ambiente antes y después	47
4.6.	Análisis técnico-financiero.....	49
4.6.1.	Propuesta administrativa	49
4.6.2.	Equipo requerido	50
4.6.3.	Estudio financiero	51
CONCLUSIONES		57
RECOMENDACIONES		59
REFERENCIAS		61

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Alimentación de ingenio azucarero con <i>chip</i> de eucalipto.....	2
2.	Modificación del hogar para la quema de biomasa	3
3.	Vista aérea de central térmica.....	5
4.	Distribución de consumo energético del campus central	7
5.	Edificios con mayor consumo energético anual	8
6.	Intensidad energética per cápita	9
7.	Emisiones por unidad académica	11
8.	Central térmica convencional	16
9.	Bomba calorimétrica no adiabática de Emerson	18
10.	Fuentes de biomasa.....	20
11.	Ciclo de la biomasa	23
12.	Central de cogeneración mediante biomasa	25
13.	Diagrama T-s del ciclo Rankine	28
14.	Ciclo Rankine con fluido orgánico	32
15.	Marco legal del subsector eléctrico en Guatemala.....	36
16.	Área propuesta para la plantación del bosque energético	38
17.	Área propuesta para el centro de almacenaje y procesamiento de biomasa para la generación eléctrica.....	44
18.	Aporte energético del proyecto al campus central	46
19.	Aporte energético del proyecto al edificio T-3	46
20.	Aporte energético del proyecto a la Escuela de Historia y Trabajo Social	47
21.	Reducción de emisiones de CO₂ del proyecto al campus central.....	49

22. Aporte económico del proyecto al campus central	53
---	----

TABLAS

I. Análisis de biomasas utilizadas durante las primeras pruebas de hibridación	4
II. Edificios con mayor consumo energético anual	8
III. Intensidad energética per cápita	10
IV. Emisiones por unidad académica	11
V. Poder calorífico superior de muestras del campus central	37
VI. Humedad relativa (HR) y factor de reducción (FR)	39
VII. Capacidad energética total	42
VIII. Producción anual de biomasa, energía eléctrica y reducción de la tarifa	45
IX. Reducción total de emisiones de CO₂	48
X. Equipo, infraestructura y servicios	51
XI. Financiamiento	52
XII. Gastos de operación y mantenimiento	52
XIII. Flujo de caja	54

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
BTU/h	<i>British Thermal Unit per hour</i> (Unidad Térmica Británica por hora)
CO₂	Dióxido de carbono
gal	Galón
Ha	Hectárea
Hz	Hertz
H	Hidrógeno
kJ/kg	Kilo joule por kilogramo
kW	Kilovatio
kWh	Kilovatio-hora
kV	Kilovoltio
MVA	Mega voltamperio
MJ/kg	Megajoule por kilogramo
CH₄	Metano
m	Metro
m²	Metro cuadrado
m³	Metro cúbico
CO	Monóxido de carbono
NO_x	Óxidos de nitrógeno
%	Porcentaje
Tm	Tonelada métrica

GLOSARIO

Bioenergía	Es un tipo de energía renovable procedente del aprovechamiento de la materia orgánica o industrial formada en algún proceso biológico o mecánico.
Biomasa	Materia orgánica utilizada como fuente energética.
Bosque energético	Son los que se implantan con el objetivo de obtener el material vegetal para la generación de energía térmica.
Broza	Conjunto de hojas, ramas, cortezas y otros despojos de las plantas.
Bunker	Técnicamente cualquier tipo de combustible derivado del petróleo usado para motores marinos.
Campus	Conjunto de terrenos y edificios en que se desarrollan actividades de una universidad.
Carbono negro	Conocido comúnmente como hollín, consiste en carbono puro en varias formas enlazadas y cuyo tamaño se compara al grosor de un cabello humano.
CEDA	Centro Experimental Docente de Agronomía.

Ciclo Rankine	Es un ciclo termodinámico que tiene como objetivo la conversión de calor en trabajo, constituyendo lo que se denomina un ciclo de potencia.
CNEE	Comisión Nacional de Energía Eléctrica
Dendroenergía	Es la energía producida con biomasa forestal, esa que proviene de los árboles.
EE	Eficiencia energética
EEGSA	Empresa Eléctrica de Guatemala, S.A.
EPA	Environmental Protection Agency (Agencia de Protección Ambiental)
ER	Energía Renovable
Factor de Reducción de Emisiones Térmicas	Es el valor por el que tenemos que multiplicar el PCS conocido de un material, para obtener su PCI basado en el grado de humedad de dicha materia.
FR	Factor de reducción
Fueloil	Es una fracción del petróleo que se obtiene como residuo en la destilación fraccionada.
GDR	Generador distribuido renovable

GEI	Gases de Efecto Invernadero
HAP	Hidrocarburos aromáticos policíclicos
HC	Hidrocarburos no combustionados.
HR	Humedad relativa
Isoentrópico	En termodinámica, es aquel proceso en el que la entropía del sistema permanece constante.
MEM	Ministerio de Energía y Minas
MMBTU	Metric Million British Thermal Unit
NTGDR	Norma Técnica de Generación Distribuida Renovable y Usuarios Autoproductores con Excedentes de Energía
ORC	Organic Rankine Cycle (Ciclo Orgánico de Rankine)
PCI	Poder Calorífico Inferior.
PCS	Poder Calorífico Superior.
Planta Termoeléctrica	Es un tipo de central eléctrica en la que la energía térmica se convierte en energía eléctrica
PM	Partículas de materia suspendida

SGEn	Sistema de Gestión Energética.
TIR	Tasa interna de retorno
USAC	Universidad de San Carlos de Guatemala.
VAN	Valor actual neto

RESUMEN

En el campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala, USAC, debido a la gran variedad de plantas que se pueden encontrar dentro de él, se obtiene gran cantidad de residuo orgánico por el ciclo natural de las mismas y su mantenimiento, razón por la cual se realizó un estudio de la capacidad de estos residuos a manera de conocer su potencial de ser transformado para uso como energía de biomasa o bioenergía, ya que actualmente se queman a cielo abierto o es acumulado en el CEDA como relleno orgánico.

Dicho lo anterior, el objetivo general de este documento es determinar la viabilidad técnica y financiera de una planta termoeléctrica como piloto para generar potencia eléctrica utilizando biomasa procedente del residuo orgánico y un bosque energético localizado dentro del campus central de la USAC como fuente para la generación de energía renovable.

Para el objetivo descrito, fue necesario recopilar datos del residuo orgánico presente dentro del campus central con el fin de determinar el poder calorífico de la biomasa y con ello dimensionar la planta termoeléctrica a proponer para la generación eléctrica. Además, evaluar las áreas para la propuesta de creación de un bosque energético que provea el combustible para una generación continua.

Después de realizar el análisis, se concluye que el potencial energético para la propuesta de una planta termoeléctrica dentro del *campus* central de la USAC para generar electricidad a base de un recurso renovable de tipo biomasa supondrá un aporte a la matriz energética de la Universidad del 1.5 %, que

equivale a 87,600 kWh al año. Considerando además una reducción en las emisiones de CO_2 de 264.3 Tm anuales por la eliminación de quema a cielo abierto de dicha materia, y debido al consumo de energía de la red del Sistema Nacional Interconectado.

PLANTEAMIENTO DE PROBLEMA Y FORMULACIÓN DE PREGUNTAS ORIENTADORAS

Contexto general

La biomasa es utilizada de distintas formas en Guatemala, como leña, cogeneración con el bagazo de caña, biodigestores en basureros, entre otros. El uso del bagazo de caña y los biodigestores para la generación de potencia eléctrica representa el 21 % en la matriz energética. Es la segunda fuente de generación por recurso renovable del país después del recurso hídrico. Este tipo de combustible no presenta sulfuros porque es parte del ciclo natural del CO_2 , además de ser abundante y relativamente económico. También se han construido biodigestores para las familias en el área rural, pero en muchas ocasiones no se han operado de forma correcta, siendo un beneficio más para la agricultura como bioabono que propiamente energético. (FAO, 1996)

Con base en los estudios de consumo energético en Guatemala, cabe destacar que la leña es aún el recurso energético de mayor uso en el país. Pese a ser la principal contribución de la matriz energética, a partir de 2013 las políticas del sector energético revelan una carencia en el manejo sustentable de la leña, hecho que no puede ser aplazado por la tala del bosque local. Esto, de una u otra forma, representa unas 132.000 hectáreas por año. Lo cual hace de esto una práctica no sostenible a mediano y largo plazo. (Ponciano *et al.*, 2015)

Descripción del problema

En el campus central de la USAC, debido a la vasta vegetación, se obtiene gran cantidad de broza, tanto por residuos forestales como agrícolas. Actualmente, al acumularse este tipo de desecho orgánico, se apila, se quema o simplemente se utiliza como relleno en algunas áreas. Esto genera algunos problemas como, por ejemplo, produce cantidades de gases de efecto invernadero al quemarlo, principalmente CO_2 , aunque hasta el momento se desconoce su concentración y por ende su impacto hacia el ambiente. Es muy difícil medir y regular las emisiones de este tipo material al quemarse, por su naturaleza y variedad, por las áreas abiertas donde se realiza, e igualmente porque no se tienen datos reales del volumen de residuos orgánicos que se generan en la actualidad.

Adicional se tiene la problemática que, por la falta de actualización de algunos laboratorios, estos no cumplen con las demandas estudiantiles en la Facultad de Ingeniería. Por varios años algunos de estos no han recibido fondos para su actualización. Además, se presenta la carencia en la escuela de Mecánica y Mecánica Eléctrica de laboratorios para los cursos de Plantas de Vapor y de Sistemas de Generación, respectivamente. Con la siguiente propuesta se puede dar una solución a esta situación en conjunto a los temas energéticos y ambientales

Preguntas orientadoras

Pregunta central

¿Es viable técnica y financieramente una planta termoeléctrica piloto para generar potencia eléctrica, utilizándola como una fuente de energía renovable haciendo uso del residuo orgánico que se encuentra en el campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala?

Preguntas auxiliares

- ¿Qué potencial energético y cantidad de residuo orgánico se encuentra dentro del campus central? Y, ¿cuál sería su impacto dentro de la matriz energética del campus universitario y de Guatemala, al ser utilizado como un recurso renovable de tipo biomasa y generar electricidad?
- ¿Cuál sería el beneficio ambiental y social que aportaría el proyecto bioenergético al campus central?
- ¿Qué tan viable es financieramente para la USAC un proyecto de generación de energía eléctrica utilizando residuos orgánicos?
- ¿Qué beneficios y herramientas didácticas puede aportar el proyecto, para los estudiantes de las carreras de Ingeniería Mecánica, Eléctrica, Mecánica Eléctrica, ¿y otras carreras afines?

Delimitación del problema

Delimitación del sectorial

El proyecto posee beneficio enfocado para la Facultad de Ingeniería, para las carreras de Mecánica, Eléctrica y Mecánica Eléctrica ya que se ha identificado una fuente de elementos didácticos en los temas de generación de energía eléctrica y del Ciclo Rankine de vapor, así como en temas afines a estos. Adicional, se vería un efecto positivo en la matriz energética del campus central, abasteciendo una parte del consumo de energía eléctrica a través de la combustión de biomasa.

Delimitación geográfica

Este proyecto está enfocado en tener un impacto positivo para el campus central de la USAC, aquí es donde se encuentra la fuente de broza o residuo orgánico forestal y residuo orgánico agrícola del CEDA de la Facultad de Agronomía. Este sería el combustible principal de biomasa para la planta de vapor.

Delimitación tecnológica

Para este tipo de proyecto es imprescindible la presencia de un profesional para la supervisión en todos los aspectos: diseño, instalación, mantenimiento y utilización. Se propone la instalación de una caldera piro tubular para el consumo de una tonelada aproximadamente de desecho orgánico, de al menos 50 bhp de potencia para producir 1100 lb de vapor por hora. Al considerar una generación de entre 168 y 240 kWh, se emplearía una turbina de vapor conectada a un generador síncrono de 2 polos, con una excitatriz principal y una excitatriz piloto,

de 12.5kVA, de rotor liso, a una tensión de 120/240V, para una velocidad de 3 600rpm y 60Hz de frecuencia.

Se debe incluir un centro de transformación utilizando un transformador pad-mounted de 15kVA, para la elevar de tensión de 120/240V a 13.8kV y poder acoplarlo a la red. Además, incluido en él todos sus dispositivos de protección y de maniobra. Por otro lado, se deben realizar diseños de estructura, cimentación y de instalaciones eléctricas para el equipo. Para la caldera se requerirán además aislantes de calor y el diseño hidráulico del sistema, así como un área de almacenamiento del material orgánico. Además, se debe hacer un estudio de tierras para las cimentaciones de los equipos en el área respectiva.

Se debe conocer el poder calorífico y la cantidad de desecho orgánico recolectado en el campus central de la Universidad de San Carlos, para de esta forma conocer la cantidad de energía que esta puede aportar. Esto se debe hacer por medio de un proceso químico de laboratorio.

OBJETIVOS

General

Determinar la viabilidad técnica y financiera de una planta termoeléctrica piloto, para generar potencia eléctrica utilizando biomasa procedente del residuo orgánico y un bosque energético localizado dentro del campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala como fuente de energía renovable.

Específicos

1. Calcular el potencial energético y cantidad de residuo orgánico localizado dentro del campus central, para generar electricidad como un recurso renovable de tipo biomasa y calcular su impacto dentro de la matriz energética del campus universitario y de Guatemala.
2. Identificar los beneficios ambientales y sociales que aportaría al campus central la implementación de una planta termoeléctrica y un bosque energético que la sustente continuamente.
3. Determinar la viabilidad financiera para la USAC de un proyecto de generación de energía eléctrica a partir de residuos orgánicos.
4. Detallar los beneficios y herramientas didácticas que puede aportar un proyecto de este tipo para los estudiantes de las carreras de Ingeniería Mecánica, Eléctrica y Mecánica Eléctrica, y otras carreras afines.

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

En el presente documento de investigación es plantea la propuesta de una fuente de energía renovable con base en el aprovechamiento del residuo orgánico del campus central de la USAC. Para ello fue necesaria la recopilación de datos dentro del campus universitario, así como el análisis de las variables a considerar para la elaboración correcta de la propuesta.

Datos

Fue necesario tener acceso a la información que pudo brindar la USAC referente a su campus central, principalmente las especies de la flora existente dentro del mismo, así como las áreas potenciales que hay para la siembra de un bosque energético y para la instalación de la planta termoeléctrica y sus componentes. Cabe mencionar los siguientes datos a recopilados:

- Límites y colindancias
- Flora
- Edafología
- Espacios abiertos
- Espacios de interés natural
- Infraestructura eléctrica
- Estructura administrativa de las unidades académicas
- Matriz energética

Variables

Para la propuesta y el diseño de la planta termoeléctrica fue necesario conocer y analizar las variables que intervienen en el proceso de transformación de la energía de la biomasa. Cabe mencionar como principales los siguientes:

- Cantidad de biomasa producida
- Área disponible para la plantación de un bosque energético
- Poder calorífico de la biomasa producida
- Capacidades de la caldera
- Especificaciones de la turbina
- Especificaciones del generador eléctrico
- Capacidades del centro de transformación
- Sistemas de protección
- Componentes de maniobra

Tipo de estudio

El presente diseño de investigación se compone de dos etapas. La primera tiene como enfoque principal una investigación documental y descriptiva. Se recopiló los datos para conocer la variedad, la cantidad y el poder calorífico del residuo orgánico, las áreas potenciales para un bosque energético, así como la demanda energética del campus central. En la segunda etapa se realizaron los cálculos para proponer un proyecto de energía renovable y sustentable. Luego de conocer el poder calorífico de la biomasa y el área potencial para un bosque energético, se pudo realizar el dimensionamiento y diseño de la planta termoeléctrica piloto, así como realizar el análisis técnico-financiero del mismo.

Técnicas de análisis de información

Para la selección y dimensionamiento del equipo se utilizaron herramientas para la resolución de ecuaciones lineales y cuadráticas. Esto fue para el análisis del proceso de transformación de la energía de la biomasa en calor, de calor a energía mecánica y de energía mecánica a energía eléctrica; teniendo como base el poder calorífico de la biomasa. También fue necesario para el diseño de la instalación mecánica y eléctrica de la planta termoeléctrica. Con la obtención de estos resultados se pudo proceder al modelado de la planta piloto.

Con base en el área disponible y su viabilidad para la plantación de un bosque energético se realizaron los cálculos para conocer el potencial energético que este puede aportar para una producción continua de energía eléctrica. Con un análisis estadístico se pudo plantear las tendencias con relación al consumo energético del campus central y el aporte que esta propuesta brinda a la matriz energética de la universidad, visualizando la viabilidad financiera del proyecto con base en la reducción de la factura eléctrica del campus universitario, el costo/beneficio, el VAN, la TIR y el plazo de recuperación.

INTRODUCCIÓN

La presente investigación se orientó en la línea de investigación *Gestión y Uso Eficiente de la Energía* de la Maestría en Energía y Ambiente. Esta línea se acopla idealmente con la búsqueda de la reducción de la demanda y el uso más eficiente de la energía, específicamente para el caso del campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala, (USAC), enfocándose principalmente en la Facultad de Ingeniería. Esta unidad académica presenta la mayor demanda energética y el edificio con mayor consumo energético es el T-3. El único distribuidor que brinda el servicio de energía eléctrica para el campus central es la Empresa Eléctrica de Guatemala, S.A. (EEGSA).

La instalación de una planta termoeléctrica en el campus central de la USAC permitirá el aprovechamiento y transformación de la energía presente en la biomasa. También ayudará a reducir el consumo energético del campus y la emisión de gases de efecto invernadero al ambiente durante la quema a cielo abierto de los residuos orgánicos, dándoles un propósito útil y responsable con el ambiente. Adicional se propone la implementación de un bosque energético que sustente de forma continua la producción de energía de la planta manteniendo balance CO_2 neutro, tema que se amplía en el capítulo 2.

Con este proyecto se espera aportar una herramienta didáctica para las distintas unidades académicas de la USAC, específicamente para la Facultad de Ingeniería y las escuelas de Ingeniería Mecánica e Ingeniería Mecánica Eléctrica. El enfoque de estas dos escuelas, en resumen, es la generación de potencia, siendo una solución para el desaprovechamiento energético que existe de la

biomasa de la broza y de los residuos orgánicos de la producción agrícola del CEDA, al reducir la tarifa de energía eléctrica emitida por el distribuidor. Y reduciendo las emisiones de CO_2 , tanto de forma directa, por la quema a cielo abierto, como indirecta, debido al consumo de energía de la red del Sistema Nacional Interconectado.

Por otra parte, en el campus central existe una vasta variedad de áreas verdes, las cuales producen residuo orgánico por su ciclo natural, más conocido como “broza”. Además, en el CEDA se puede ver también la producción de residuo orgánico derivado de la producción agrícola. Estos residuos actualmente no poseen un fin específico y son desaprovechados, utilizados como un relleno orgánico o incluso quemados a cielo abierto, siendo la última una práctica que no es amigable con el ambiente y tampoco es sostenible.

En el capítulo I se pone en contexto la situación actual del *campus* central, la situación de quema a cielo abierto de la broza, demanda energética, edificios con mayor consumo energético, intensidad energética per cápita, emisiones asociadas al consumo de la energía y los lineamientos de la política energética universitaria y su propuesta.

Para el capítulo 2 se presenta toda la base técnica de bioenergía para el estudio realizado, plantas térmicas, eficiencia energética, poder calorífico, tipos de biomasa, conversión de la biomasa en energía, balance CO_2 neutro, ventajas del uso sostenible de la biomasa, ciclo Rankine y sus etapas, fluido ideal, ciclo Rankine con fluido orgánico (ORC), Generador Distribuido Renovable (GDR) y su norma técnica.

Seguido en el capítulo III se presenta el marco metodológico utilizado, datos, variables, tipo de estudio y técnicas de análisis de la información. Se

presentan los resultados en el Capítulo IV detallando la cantidad y calidad energética de la materia orgánica, propuesta de un bosque energético y capacidad bioenergética del campus central.

Se finaliza en el capítulo V con la discusión de resultados, dimensionamiento y selección de componentes, ubicación propuesta para el centro de almacenaje y procesamiento de biomasa para la generación eléctrica, secado, astillado y almacenamiento de la biomasa, aporte energético, emisiones al ambiente antes y después, y análisis técnico-financiero.

1. CONTEXTO DEL CAMPUS CENTRAL

1.1. Estudios previos

Los países centroamericanos poseen economías con orientación tipo agrícola, por lo tanto, el uso eficiente de la biomasa es una alternativa para reducción de costos en materia energética. Esto, como parte de una solución ambiental para la reducción del uso de combustibles fósiles. Las granjas o bosques energéticos podrían aportar de manera positiva a los requerimientos energéticos mundiales, así como ser una ayuda para las comunidades rurales con el uso eficiente de los residuos de la biomasa.

En esta aplicación se puede ver como ejemplo en los ingenios azucareros de Guatemala el uso de madera desfibrada de eucalipto como una propuesta alternativa para producir energía a bajo costo ver figura 1. Esta biomasa mantiene una planta de vapor en condiciones óptimas de operación para la producción de energía eléctrica, con una combustión estable y continua. Esto brinda una fuente de alimentación para la época que no es de zafra, por lo mismo, los puestos operativos en época de no zafra se mantienen en funciones, lo cual es un beneficio para la empresa, pues reduce costos de contratación y capacitación, así como un beneficio para las personas, manteniendo sus puestos de trabajo. Se puede notar la rentabilidad, ya que el *chip* de madera de eucalipto es más económico que el búnker, lo que lleva a reducir costos y aumentar las ganancias. (De León, 2010)

Figura 1. **Alimentación de ingenio azucarero con *chip* de eucalipto**



Fuente: [Fotografía de Richard Rotter]. (Ingenio La Unión. 2005). Antigua Guatemala, Guatemala.

En la fábrica Olmeca S.A. se presentó un estudio de factibilidad para convertir calderas piro tubulares que funcionaban con bunker C, para que funcionaran con biomasa. La biomasa que se propone utilizar en el caso mencionado es la fibra de palma, la cual es residuo del proceso de producción de la empresa. Estas calderas se encontraban en desuso y se propuso modificar el hogar para el uso de este biocombustible, ver figura 2. Se plantea que no es rentable ni es amigable con el ambiente el uso de bunker C, pero sí se requiere una fuerte inversión para este proyecto, por ello es necesario realizar este estudio. En conclusión, en este proyecto, se presentó una comparativa de costos de la generación con bunker C y con biomasa, siendo totalmente rentable el uso de la biomasa.

Además, la combustión de la fibra de palma no es dañina para el ambiente. En lo financiero se puede ver que se plantearon siete propuestas, con períodos de retorno de entre dos y seis meses, incluyendo un posible ahorro mensual que puede ascender hasta los Q 230,000. Y un beneficio ambiental con la reducción de hasta 10,71 ton de CO_2 . (Orozco, 2012).

Figura 2. **Modificación del hogar para la quema de biomasa**



Fuente: [Fotografía de José Orozco]. (Beneficio El Rosario. 2012). Ciudad de Guatemala, Guatemala.

En Térmica AFAP S.A. en Villacañas, Toledo, España se presenta el estudio de cinco años de una planta que utiliza residuos de industrias forestales como combustible de tipo biomasa, con una potencia eléctrica de 7.8 MW. El enfoque es encontrar problemas y sus causas en esta planta, de tal manera que se aportan soluciones adecuadas para los mismos, de forma que futuras plantas mejoren sus diseños y sean más eficientes. Entre estos problemas se puede ver la hibridación, que es el uso de diferentes tipos de biomasa en una misma caldera, lo cual le da una mayor flexibilidad, ya que se puede obtener mayor cantidad de biomasa para su combustión, además de los aditivos que se le pueden agregar a esta biomasa para mejorar su eficiencia y reducir el deterioro de los componentes de la caldera, ver tabla I. (Míguez, 2013)

Tabla I. **Análisis de biomosas utilizadas durante las primeras pruebas de hibridación**

Unidades en %b.s.	SERRIN	ASTILLAS	PINO
Cenizas	1.21	1.10	9.51
Volátiles	79.17	80.04	74.82
Carbono	49.25	49.34	45.50
Hidrógeno	5.79	5.96	5.45
Nitrógeno	3.06	1.37	2.07
Azufre	No det	No det	0.68
Fluoruros	No det	No det	No det
Cloruros	0.027	0.028	0.026
Sulfatos	0.131	0.098	1.59
P.C.S. kcal/kg	4758	4724	4307
P.C.I. kcal/kg	4457	4415	4025

Fuente: Míguez (2013). *La eficiencia energética en el uso de la Biomasa para la generación de energía eléctrica: Optimización energética y exergética.*

Da el ejemplo la institución universitaria de Valladolid al estimular el ahorro y uso eficiente colectivo de la energía, con un *Plan de sostenibilidad energética* en su campus universitario (PDSE). Este plan implementó una red de calor de distrito que utiliza biomasa, brinda agua sanitaria caliente y calefacción a 31 edificios, siendo este el proyecto más importante de España, ver figura 3. Esto es posible con una planta de generación térmica a base de biomasa, con una potencia de 14MW que consume 7886t/año de astilla de madera, ofrece un ahorro económico del 30 %, además de la reducción de emisiones de dióxido de carbono. (Cano, 2014)

Figura 3. **Vista aérea de central térmica**



Fuente: [Fotografía de Cristina Cano]. (Universidad de Valladolid. 2014). Valladolid, Castilla y León, España.

1.2. Quema a cielo abierto de biomasa y sus efectos en el campus central

Dentro del campus central de la USAC se produce residuo orgánico, tanto por el ciclo natural de las plantas que se pueden ver en las vastas áreas verdes, como también por la producción agrícola del CEDA. Este residuo muchas veces se quema para su eliminación rápida o se utiliza como relleno orgánico del mismo, en distintos puntos del campus universitario. La quema de la broza continúa siendo la manera más económica y simple de disponer de este residuo orgánico. La quema a cielo abierto, en el sector agrícola, tiene el objetivo de desbloquear nutrientes para la próxima cosecha, eliminar posibles plagas en las granjas de cultivo, además de despejar de forma fácil y rápida estas áreas.

De forma aproximada se calcula que este tipo de práctica emite al ambiente el 40 % del dióxido de carbono (CO_2), 32 % del monóxido de carbono

(CO), 20 % de partículas de materia suspendidas (PM) y 50 % de los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) a nivel mundial. Esta práctica es muy común pero no es un método amigable ni sostenible para el ambiente. (CCA, 2014) Estas prácticas presentan problemas adicionales como:

- Exposición directa de la población universitaria y población aledaña al área donde se realizan, lo cual puede generar problemas de tipo respiratorio en los pobladores.
- Contribuye al cambio climático, debido a la emisión de gases de efecto invernadero (GEI).
- La combustión no es idónea, por lo cual se puede tener presencia adicional en el ambiente de contaminantes de vida corta, como el carbono negro.
- La visibilidad se ve afectada.

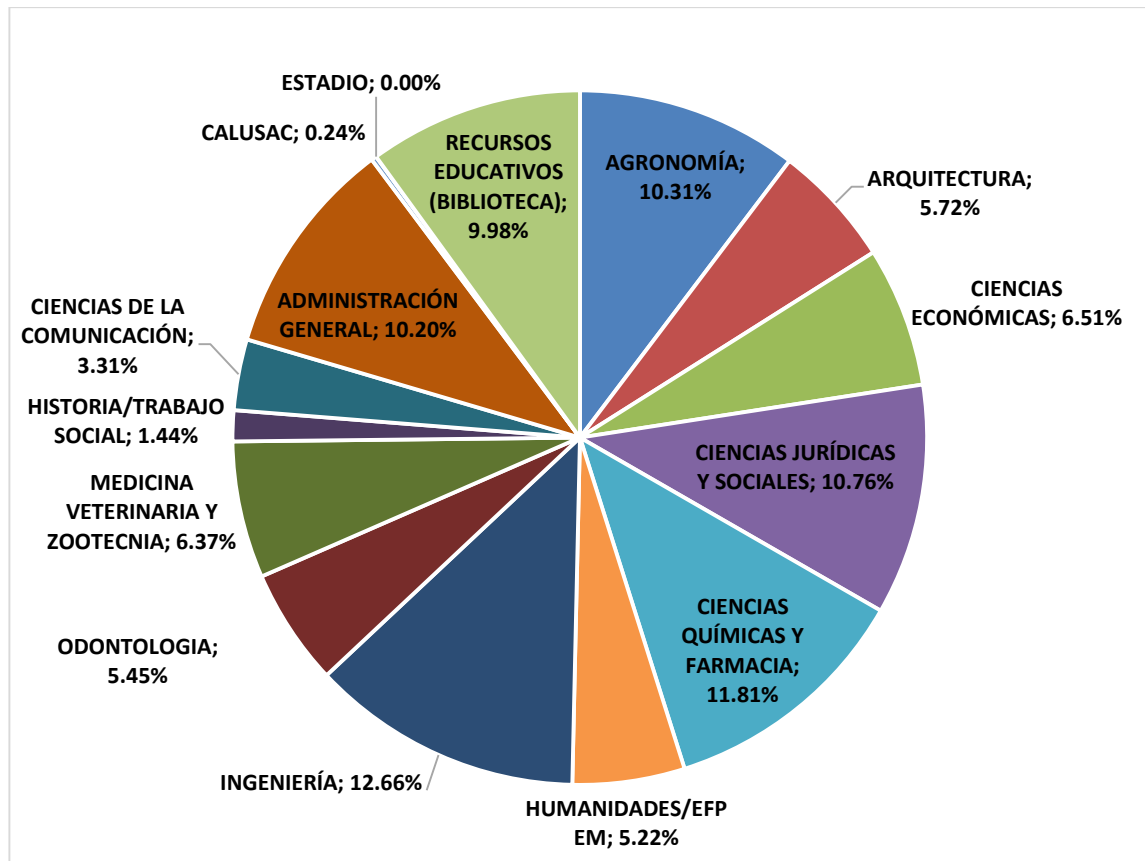
Un factor adicional es que la Facultad de Ingeniería es la unidad académica con mayor demanda de energía eléctrica dentro del *campus* central, presentando al edificio T-3 como el edificio con mayor consumo energético. La única fuente de alimentación es la conexión de energía eléctrica con EEGSA.

1.3. Demanda energética en el campus central

Con base en la revisión energética realizada en el campus central de la USAC, para la realización de un Sistema de Gestión Energética de la misma, se obtuvo la matriz energética. Esta matriz presenta a la Facultad de Ingeniería como la unidad académica con mayor demanda de energía, siendo del 12.66 % del consumo energético global del campus universitario, seguido por la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia con el 11.81 %. Dentro de las propuestas de este estudio se favorece el uso de energías renovables para la producción de

energía dentro del campus central, para satisfacer la demanda interna del mismo. (López, 2015)

Figura 4. **Distribución de consumo energético del campus central**

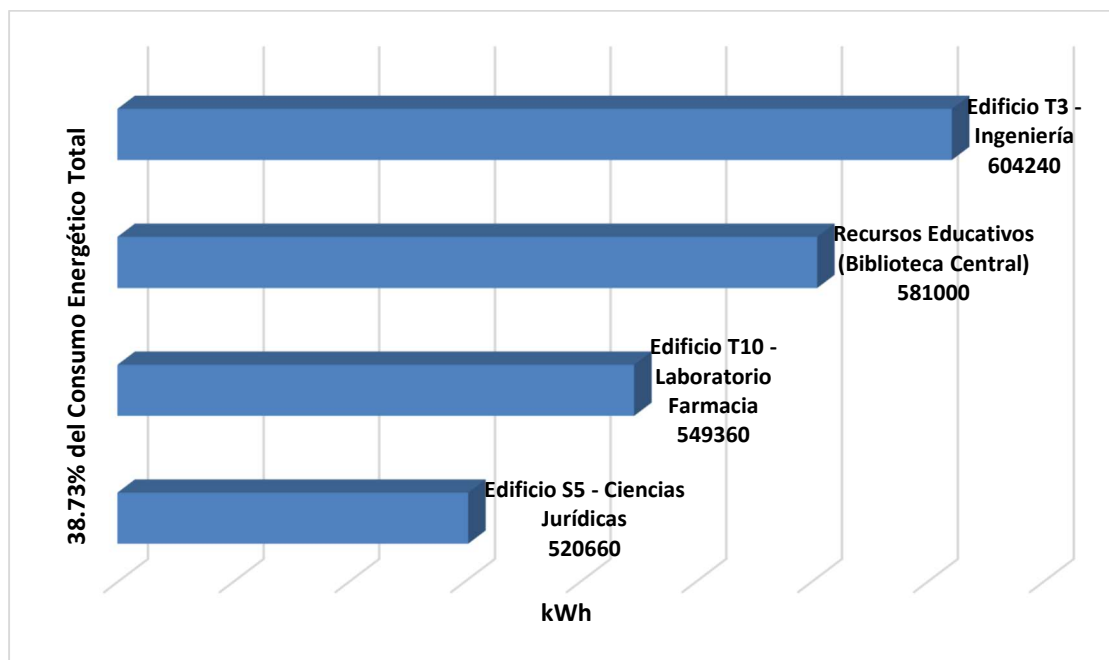


Fuente: López (2015). *Sistema de Gestión de la Energía, mediante la metodología ISO 50001:2011, para la ciudad universitaria, zona 12, Universidad de San Carlos de Guatemala.*

1.3.1. Edificios con mayor consumo energético

El edificio T-3 de Ingeniería presenta un 10,38 % del consumo energético global del campus universitario, seguido del edificio de Recursos Educativos, conocido como Biblioteca Central, con el 9.98 %, y el edificio T-10 de Ciencias Químicas y Farmacia con el 9.43 %. (López, 2015)

Figura 5. Edificios con mayor consumo energético anual



Fuente: López (2015). *Sistema de Gestión de la Energía, mediante la metodología ISO 50001:2011, para la ciudad universitaria, zona 12, Universidad de San Carlos de Guatemala.*

Tabla II. Edificios con mayor consumo energético anual

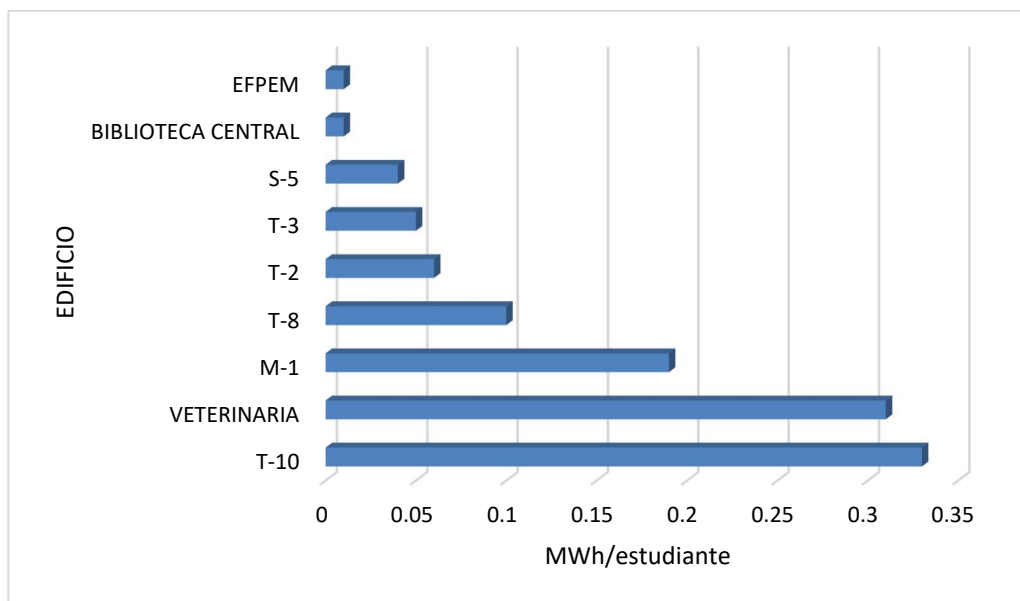
			AÑO 2010	AÑO 2011	AÑO 2012	AÑO 2013	
UNIDAD	EDIFICIO	Contador	Consumo kWh	Consumo kWh	Consumo kWh	Consumo kWh	% Consumo
ACADÉMICA							
INGENIERÍA	T-3	H-13393	438,760	572,880	550,760	604,240	10.38
RECURSOS EDUCATIVOS	BIBLIOTECA CENTRAL	T-00411	493,080	590,520	558,600	581,000	9.98
CIENCIAS QUÍMICAS Y FARMACIA	T-10	K-22867	542,360	564,900	545,720	549,360	9.43
CIENCIAS JURÍDICAS	S-5	J-38995	438,620	510,860	477,680	520,660	8.94

Fuente: López (2015). *Sistema de Gestión de la Energía, mediante la metodología ISO 50001:2011, para la ciudad universitaria, zona 12, Universidad de San Carlos de Guatemala.*

1.3.2. Intensidad energética per cápita

Otro valor importante que va ligado al consumo energético por facultad y por edificio, es el valor de la demanda asociada por persona en su respectiva unidad académica. Siendo además el edificio T-10 de Ciencias Químicas y Farmacia el edificio con mayor Intensidad energética per cápita con 0.33 MWh/estudiante, seguido por los edificios de Veterinaria con 0.31 MWh/estudiante, y el edificio M1 de la facultad de Odontología con 0.19 MWh/estudiante. (López, 2015)

Figura 6. Intensidad energética per cápita



Fuente: López (2015). *Sistema de Gestión de la Energía, mediante la metodología ISO 50001:2011, para la ciudad universitaria, zona 12, Universidad de San Carlos de Guatemala.*

Tabla III. **Intensidad energética per cápita**

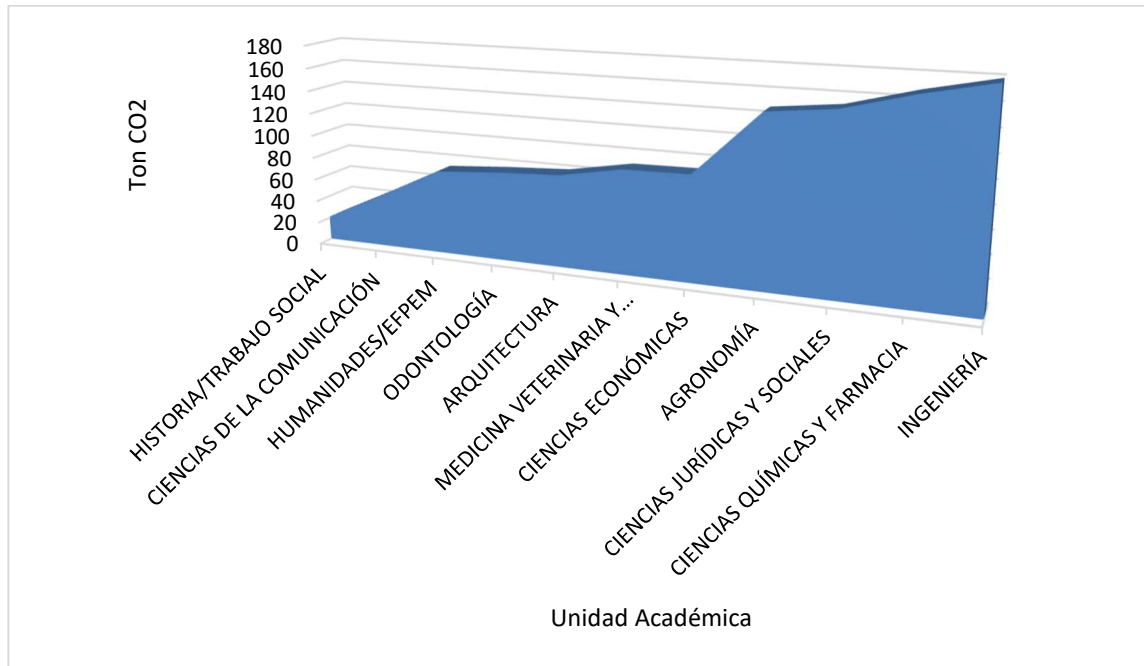
EDIFICIO	Contador	Consumo kWh 2013	Consumo MWh 2013	Población Estudiantil 2013	Intensidad per Cápita
T-10	K-22867	549,360	549.36	1,667	0.33
VETERINARIA	K-64055	300,987	300.99	967	0.31
M-1	J-39247	222,960	222.96	1,164	0.19
T-8	T-00174	155,120	155.12	1,492	0.10
T-2	K-22910	187,120	187.12	3,029	0.06
T-3	H-13393	604,240	604.24	11,544	0.05
S-5	J-38995	520,660	520.66	12,506	0.04
BIBLIOTECA CENTRAL	T-00411	581,000	581.00	87,969	0.01
EFPEM	P-02055	174,800	174.80	29,559	0.01

Fuente: López (2015). *Sistema de Gestión de la Energía, mediante la metodología ISO 50001:2011, para la ciudad universitaria, zona 12, Universidad de San Carlos de Guatemala.*

1.3.3. Emisiones asociadas al consumo de energía

Esto es un indicador ambiental que relaciona las emisiones de CO_2 con la demanda de energía eléctrica producida a base de combustibles fósiles, donde cabe notar que la Facultad de Ingeniería, debido a su alta demanda energética, genera un equivalente total de 139 toneladas de CO_2 para el año 2013. Seguido por la facultad de Ciencias Químicas y Farmacia con 130 toneladas CO_2 de y la facultad de Ciencias Jurídicas y Sociales con 118 toneladas de CO_2 . (López, 2015).

Figura 7. **Emisiones por unidad académica**



Fuente: López (2015). *Sistema de Gestión de la Energía, mediante la metodología ISO 50001:2011, para la ciudad universitaria, zona 12, Universidad de San Carlos de Guatemala.*

Tabla IV. **Emisiones por unidad académica**

Emisiones (Ton CO2)					
Unidad Académica	2011	2012	2013	2014	2015
AGRONOMÍA	110	108	113	127	147
ARQUITECTURA	61	60	63	71	81
CIENCIAS ECONÓMICAS	69	68	72	80	92
CIENCIAS JURÍDICAS Y SOCIALES	114	113	118	133	153
CIENCIAS QUÍMICAS Y FARMACIA	126	124	130	146	168
HUMANIDADES/EPPEM	56	55	57	64	74
INGENIERÍA	135	133	139	156	180
ODONTOLOGÍA	58	57	60	67	78
MEDICINA VETERINARIA Y ZOOTECHNIA	68	67	70	79	91
HISTORIA/TRABAJO SOCIAL	15	15	16	18	21
CIENCIAS DE LA COMUNICACIÓN	35	35	36	41	47

Fuente: López (2015). *Sistema de Gestión de la Energía, mediante la metodología ISO 50001:2011, para la ciudad universitaria, zona 12, Universidad de San Carlos de Guatemala.*

1.4. Lineamientos de la política energética universitaria

El alcance de los lineamientos de la política energética universitaria, planteada por López en el año 2015, es impulsar la implementación y mejora del Sistema de Gestión de la Energía, y del desempeño desde la perspectiva energética de la USAC. Y es deber del Consejo Superior Universitario como máxima autoridad de la Universidad promover esta política para garantizar el establecimiento del Sistema de Gestión de la Energía y su monitoreo continuo, buscando siempre el uso eficiente de la energía de las instalaciones universitarias. (López, 2015)

1.4.1. Propuesta de la Política Energética por López 2015

La USAC debe concientizarse de la importancia del uso eficiente de la energía, impulsando como política universitaria interna la búsqueda de una reducción del consumo y demanda energética.

Con la finalidad de ser una comunidad educativa proactiva y de ejemplo para otras universidades en materia de desarrollo sostenible, la USAC deberá apostar por la implementación de un Sistema de Gestión Energética en sus instalaciones, con el fin de mejorar de forma continua la gestión de los recursos energéticos y reducir las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), a nivel de propuesta López (2015) sugiere los siguientes compromisos:

- Adquirir el compromiso de hacer uso eficiente de la energía en los edificios del *campus* universitario, mediante el SGEN y la mejora continua del desempeño energético.
- Fomentar el uso eficiente de la energía y el ahorro energético, mediante el empleo de medidas de eficiencia energética en las instalaciones.

- Establecer tecnologías para reducir el consumo energético, sin comprometer la calidad lumínica de los sistemas de iluminación y alumbrado público.
- Mejorar los hábitos de consumo de energía en cuanto al ahorro de esta, entre los trabajadores y estudiantes que empleen las instalaciones.
- Promover el uso de tecnologías de energías renovables para la producción de energía y el autoconsumo.
- Apoyar la compra de productos y tecnologías eficientes en el uso de la energía, con el fin de mejorar el rendimiento energético de los sistemas.
- En general, cuidar mediante las acciones anteriormente mencionadas el ambiente y contribuir a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en armonía con las políticas nacionales e internacionales existentes.
- Adquirir el compromiso de cumplir con los requisitos legales y otros requisitos relacionados con la gestión y uso eficiente de la energía.

2. BIOENERGÍA

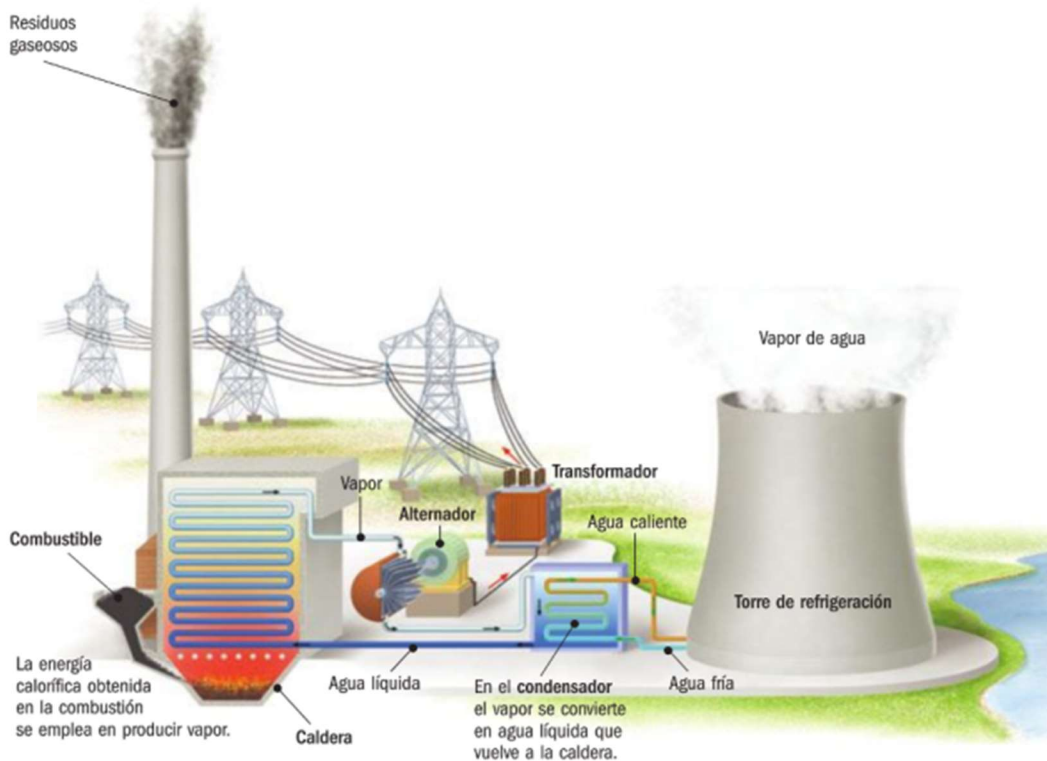
Se entiende como bioenergía a toda aquella fuente de energía renovable basada en el aprovechamiento de la materia orgánica e industrial derivada de algún proceso mecánico o biológico. Por lo regular se adquiere de las sustancias que componen a los seres vivos, sus restos y residuos.

2.1. Plantas térmicas

El principio de funcionamiento de una central térmica se basa en el intercambio de energía calórica en energía mecánica y luego en energía eléctrica. Es aprovechar la energía química de los combustibles derivados del petróleo como el búnker, diésel, gas natural, y otros como carbón mineral, residuos vegetales, entre otros, para producir electricidad. Los 3 elementos esenciales de una central térmica son:

- La caldera, elemento que produce vapor a partir de la energía química obtenida al efectuarse la combustión o quemado de combustible.
- La turbina, elemento que produce la energía mecánica.
- El alternador (generador), elemento que produce la energía eléctrica

Figura 8. **Central térmica convencional**



Fuente: Gobierno de Canarias (2014). *Central Termoeléctrica (Esquemas)* Consultado el 15 de mayo 2016. Recuperado de <https://www3.gobiernodecanarias.org/medusa/ecoblog/fsancac/2014/11/03/central-termoelectrica-esquemas/#comments>

El funcionamiento de todas las centrales térmicas o termoeléctricas es semejante, se incluye una representación visual en la figura 8. El combustible se almacena en depósitos adyacentes, desde donde se suministra a la central, pasando por la caldera. Una vez en la caldera, los quemadores provocan la combustión del carbón, *fueloil*, gas, búnker, entre otros, generando energía calorífica. Esta se convierte, a su vez, en vapor a alta temperatura. El agua circula por una extensa red formada por miles de tubos que tapizan las paredes de la caldera. Este vapor entra a gran presión en la turbina central, la cual produce la energía mecánica que es utilizada por el generador para producir la electricidad.

2.2. Eficiencia energética

El uso eficiente de la energía es reducir la cantidad de energía eléctrica y de combustibles que se utilizan, pero conservando la calidad y el acceso a bienes y servicios. Usualmente, dicha reducción en el consumo de energía se asocia a un cambio tecnológico, ya sea por la creación de nuevas tecnologías que incrementen el rendimiento de los artefactos, o por nuevos diseños de máquinas y espacios habitables, los que pueden disminuir la pérdida de energía por calor. No obstante, no siempre es así, ya que la reducción en el consumo de energía puede estar vinculada a una mejor gestión o cambios en los hábitos y actitudes.

Ahorrar energía, en cambio, puede significar reducir o dejar de realizar determinadas actividades, para evitar el consumo de energía. Por ejemplo, el ahorro energético se genera cuando se apaga la luz para reducir el consumo de energía. Si, en cambio, se reemplaza la lámpara incandescente por una eficiente, se está tomando una medida de eficiencia energética, que proporcionará una disminución en el consumo de energía, sin perjuicio del desarrollo de las actividades.

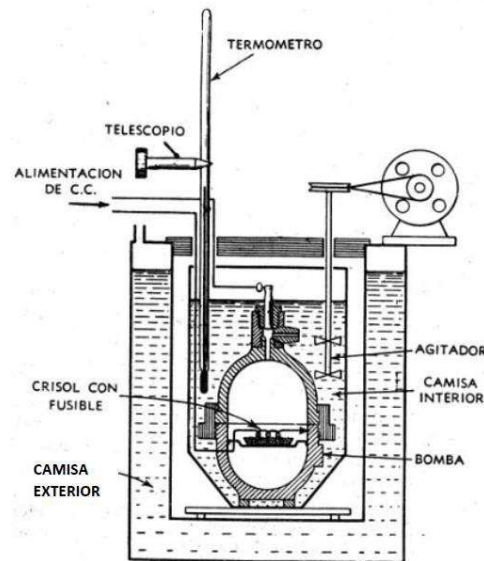
Tampoco se debe confundir la Eficiencia Energética (EE) con la Energía Renovable (ER). Esta última corresponde a la energía que se obtiene de fuentes naturales virtualmente inagotables, tales como el sol o el viento. En resumen, la ER es un tipo de fuente de energía, mientras que la EE es un análisis de todo el sistema que podrá presentar, como medidas de reducción de consumo de energía, el uso de ER. Es fundamental fomentar la eficiencia energética, debido a que es la forma más económica, segura y limpia de utilizar la energía

2.3. Poder calorífico

Se define como poder calorífico de un combustible a la cantidad de calor que se obtiene de la oxidación completa, a presión atmosférica, de los componentes de la unidad de masa (o volumen) de dicho combustible. El equipo utilizado para este tipo de ensayos es una bomba calorimétrica no adiabática como la presentada en la figura 9. Habitualmente se expresa en las siguientes unidades:

- Combustibles sólidos: kWh/kg
- Combustibles líquidos: kWh/kg o kWh/l
- Combustibles gaseosos: kWh/kg o kWh/Nm³

Figura 9. **Bomba calorimétrica no adiabática de Emerson**



Fuente: Seymour (1962). *El laboratorio del ingeniero mecánico*.

En la combustión, por la oxidación del hidrógeno, se forma agua; además, los combustibles pueden tener un cierto grado de humedad en su composición; dependiendo del estado en que aparezca el agua en los humos, se distinguen dos tipos de poderes caloríficos:

2.3.1. Poder calorífico inferior (PCI)

Es el calor que puede obtenerse en la combustión completa de la unidad de combustible, si en los productos de la combustión el agua está en forma de vapor. Una parte del calor generado en las oxidaciones se utiliza para evaporar el agua y por ello ese calor no se aprovecha.

2.3.2. Poder calorífico superior (PCS)

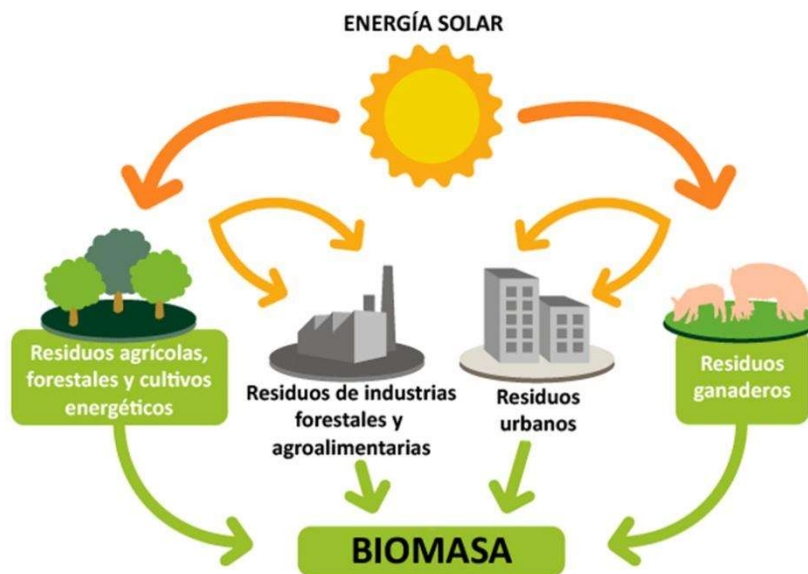
Es el calor generado cuando en los productos de la combustión el agua aparece en forma líquida; es decir, que se aprovecha todo el calor de oxidación de los componentes del combustible. Con las temperaturas de humos habituales el agua se evacua con los mismos en fase vapor, por lo que el poder calorífico más comúnmente utilizado es el inferior.

2.4. Biomasa

La palabra biomasa describe los materiales provenientes de seres vivos animales o vegetales. Es decir, toda la materia orgánica (materia viva) procedente del reino animal y vegetal, obtenida de manera natural o procedente de las transformaciones artificiales. Toda esta materia se convierte en energía si le aplicamos procesamientos químicos.

La energía de la biomasa proviene en última instancia del sol. Los vegetales absorben y almacenan una parte de la energía solar que llega a la tierra y a los animales en forma de alimento y energía. Cuando la materia orgánica almacena la energía solar, también crea subproductos que no sirven para los animales ni para fabricar alimentos, pero sí para hacer energía de ellos, ver figura 10. La biomasa era la fuente energética más importante para la humanidad hasta el inicio de la revolución industrial, pero su uso fue disminuyendo al ser sustituido por el uso masivo de combustibles fósiles.

Figura 10. **Fuentes de biomasa**



Fuente: Barriga (2014). *Introducción al estudio de fuentes renovables de energía*.

2.4.1. Tipos de biomasa

La biomasa se puede clasificar en tres grandes grupos:

- Biomasa natural: es la que se produce en la naturaleza sin la intervención humana.

- Biomasa residual: son los residuos orgánicos que provienen de las actividades de las personas (residuos sólidos urbanos, RSU, por ejemplo).
- Biomasa producida: son los cultivos energéticos, es decir, campos de cultivo donde se produce un tipo de especie con la única finalidad de su aprovechamiento energético.

2.4.2. Conversión de la biomasa en energía

Existen diferentes formas para transformar la biomasa en energía que se pueda aprovechar, pero hay dos de ellas que hoy en día se utilizan más:

2.4.2.1. Métodos termoquímicos

Es la manera de utilizar el calor para transformar la biomasa. Los materiales que funcionan mejor son los de menor humedad (madera, paja, cáscaras, entre otros). Se utilizan para:

- Combustión: existe cuando se quema la biomasa con mucho aire (20-40 % superior al teórico) a una temperatura entre 600 y 1300 °C. Es el modo más básico para recuperar la energía de la biomasa, de donde salen gases calientes para producir calor y poderla utilizar en casa, en la industria y para producir electricidad.
- Pirolisis: se trata de descomponer la biomasa utilizando el calor (a unos 500 °C) sin oxígeno. A través de este proceso se obtienen gases formados por hidrógeno, óxidos de carbono e hidrocarburos, líquidos hidrocarbonatos y residuos sólidos carbonosos. Este proceso se utilizaba hace años para hacer carbón vegetal.
- Gasificación: existen cuando se hace combustión y se producen diferentes elementos químicos: monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono

(CO_2), hidrógeno (H) y metano (CH_4), en cantidades diferentes. La temperatura de la gasificación puede estar entre 700 y 1500 °C y el oxígeno entre un 10 y un 50 %. Según se utilice aire u oxígeno, se crean dos procedimientos de gasificación distintos. Por un lado, el gasógeno o “gas pobre”, y por otro el gas de síntesis. La importancia de este es que puede transformar en combustibles líquidos (metanol y gasolinas). Por eso se están haciendo grandes esfuerzos que tienden a mejorar el proceso de gasificación con oxígeno.

- Co-combustión: consiste en la utilización de la biomasa como combustible de ayuda mientras se realiza la combustión de carbón en las calderas. Con este proceso se reduce el consumo de carbón y se reducen las emisiones de CO_2 .

2.4.3. Balance CO_2 neutro

En la combustión de la biomasa se considera que las emisiones tienen el balance neutro de CO_2 . Realmente sí se produce CO_2 como resultado de la combustión de la biomasa, pero esto se considera así porque se plantea que la combustión de biomasa no contribuye al aumento del efecto invernadero, porque el CO_2 que se libera forma parte de la atmósfera actual. Es el CO_2 que absorben y liberan continuamente las plantas y árboles para su crecimiento, y no es el CO_2 capturado en el subsuelo a lo largo de miles de años y liberado en un breve espacio de tiempo como ocurre con los combustibles fósiles, ver figura 11. (IMARTEC, 2014)

Figura 11. **Ciclo de la biomasa**



Fuente: ASEMFO (2013). *¿Qué entendemos por biomasa?* Consultado el 16 de mayo 2016.

Recuperado de

<http://www.geoscopio.com/escaparate/verpagina.cgi?idpagina=20637741&refcompra=>

2.4.4. Ventajas del uso sostenible de la biomasa

El uso sostenible de la biomasa como fuente energética presenta ventajas ambientales de primer orden:

- Disminución de las emisiones de azufre
- Disminución de las emisiones de partículas
- Emisiones reducidas de contaminantes como CO, HC y NOX
- Menos emisiones de CO_2 , desacelerando el efecto invernadero
- Reducción de los peligros derivados del escape de gases tóxicos y combustibles.
- Reducción de riesgos de incendios forestales (si se plantea respetando los equilibrios naturales).

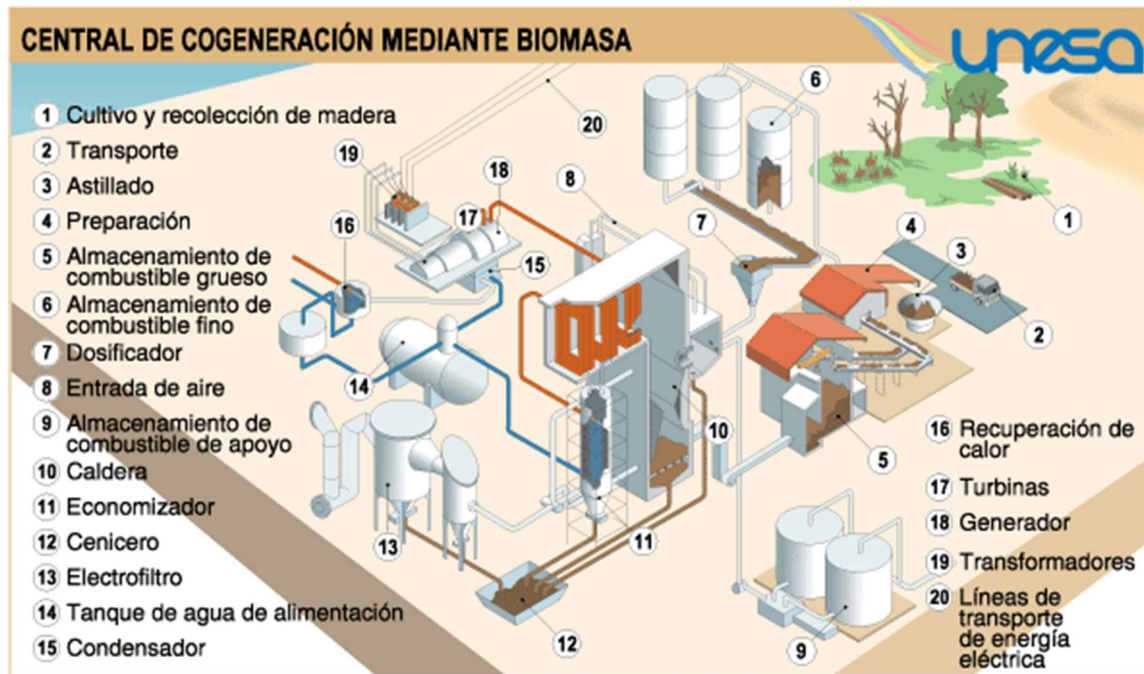
- Aprovechamiento de residuos agrícolas (olivos, árboles frutales, entre otros) o forestales.
- Posibilidad de utilización de tierras abandonadas o desertizadas con cultivos energéticos.
- Mayor independencia de las fluctuaciones de los precios de los combustibles provenientes del exterior (no son combustibles importados).
- Mejora socioeconómica de las áreas rurales.

2.5. Plantas termoeléctricas de biomasa

Una central de biomasa es una instalación que permite el aprovechamiento de la biomasa para la producción de electricidad. Tiene un ciclo térmico similar al de las centrales térmicas convencionales: la energía calorífica que se produce en un determinado foco es transformada en energía mecánica rotatoria mediante una turbina y, posteriormente, en energía eléctrica a través de un generador.

La diferencia está en que el combustible principal utilizado para producir la energía calorífica en el caso de las centrales de biomasa lo constituyen principalmente los residuos forestales, los cultivos de plantas energéticas o los residuos agrícolas. Hay diversas tecnologías en el funcionamiento de estas plantas. A continuación, y como referencia en la figura 12, se describe el esquema de funcionamiento de una central-tipo de biomasa:

Figura 12. Central de cogeneración mediante biomasa



Fuente: UNESA (2014). *Central de cogeneración mediante biomasa*. Consultado el 25 de mayo 2016. Recuperado de <http://www.unesa.es/biblioteca/>

En primer lugar, el combustible principal de la instalación, residuos forestales, agrícolas o cultivos de plantas energéticas (1), es transportado y almacenado en la central. En esta puede ser sometido a un tratamiento de astillado (2) para reducir su tamaño, si ello fuera necesario. A continuación, pasa a un edificio de preparación del combustible (3), en donde generalmente se clasifica en función de su tamaño, fino y grueso, para después ser llevado a los correspondientes almacenes (4, 5 y 6).

El combustible, una vez preparado, se lleva a la caldera (7) para su combustión, y el calor producido hace que el agua que circula por las tuberías de la caldera se convierta en vapor de agua. Generalmente la caldera tiene una parrilla donde se quema el combustible grueso. El combustible fino se mezcla

con el combustible de apoyo (generalmente un derivado del petróleo) procedente de su almacén (6), para ser quemado de la forma más eficiente posible.

El agua que circula por el interior de la caldera proviene del tanque de alimentación (10). Antes de entrar allí, el agua ha pasado generalmente por un economizador, donde es precalentada mediante el intercambio de calor con los gases de combustión que salen de la propia caldera. Estos gases de combustión son sometidos a un proceso de recirculación por la caldera para reducir la cantidad de inquemados, y así aprovechar al máximo el poder energético y reducir las emisiones atmosféricas. Asimismo, los gases de combustión son limpiados por los equipos de depuración (9), antes de ser vertidos a la atmósfera a través de una chimenea. Las partículas retenidas, junto con las cenizas de la combustión, son conducidas al cenicero (8) para ser transportadas posteriormente a un vertedero.

Al igual que se hace en otras centrales térmicas convencionales, el vapor generado en la caldera se expande en la turbina de vapor (12) que mueve el generador eléctrico (13), donde se produce la energía eléctrica que, una vez elevada su tensión en los transformadores (14), se vierte a la red general mediante las líneas de transporte (15) correspondientes. Después, el vapor de agua proveniente de la turbina es transformado en líquido en el condensador (11), y de ahí es enviado nuevamente al tanque de alimentación (10), cerrándose así el circuito principal del agua en la central.

Desde el punto de vista de cambio climático, se considera que los gases de invernadero emitidos en la producción de electricidad a partir de la biomasa no tienen impacto negativo, ya que el CO_2 producido en la combustión es aproximadamente el mismo que la cantidad fijada por la masa vegetal durante su crecimiento. En cualquier caso, en la hipótesis de no utilizarse la biomasa en una

central, el CO_2 volvería a la atmósfera a través del proceso natural de descomposición de la materia orgánica. (UNESA, 2014)

2.6. Ciclo Rankine

El ciclo de Rankine es un ciclo termodinámico que tiene como objetivo la conversión de calor en trabajo, constituyendo lo que se denomina un ciclo de potencia. Como cualquier otro ciclo de potencia, su eficiencia está acotada por la eficiencia termodinámica de un ciclo de Carnot que opera entre los mismos focos térmicos, surge como una mejora del ciclo Carnot al tener una mejor relación de trabajo. Debe su nombre a su desarrollador, el ingeniero y físico escocés William John Macquorn Rankine. (Pons, 2008)

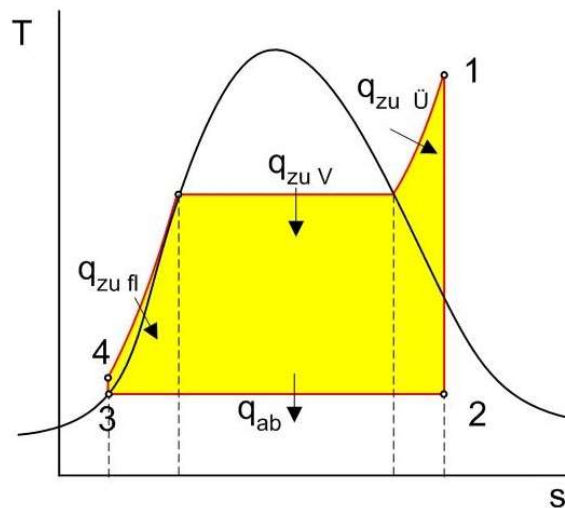
El ciclo Rankine es un ciclo de potencia representativo del proceso termodinámico que tiene lugar en una central térmica de vapor. Utiliza un fluido de trabajo que alternativamente evapora y condensa, típicamente agua. Mediante la quema de un combustible, el vapor de agua es producido en una caldera a alta presión para luego ser llevado a una turbina donde se expande para generar trabajo mecánico en su eje, usualmente este eje se encuentra unido al de un generador eléctrico, es el que generará la electricidad en la central térmica. El vapor de baja presión que sale de la turbina se introduce en un condensador, equipo donde el vapor se condensa y cambia al estado líquido. Posteriormente, una bomba se encarga de aumentar la presión del fluido en fase líquida para volver a introducirlo nuevamente en la caldera, cerrando de esta manera el ciclo.

Existen algunas mejoras al ciclo descrito que permiten mejorar su eficiencia, como por ejemplo sobrecalentamiento del vapor a la entrada de la turbina, recalentamiento entre etapas de turbina o regeneración del agua de alimentación a caldera.

2.6.1. Etapas del ciclo

El diagrama temperatura y entropía (T-s) de un ciclo Rankine ideal está formado por cuatro etapas: dos isoentrópicos y dos isobáricos. La bomba y la turbina son los equipos que operan según procesos isoentrópicos, adiabáticos e internamente reversibles. La caldera y el condensador operan sin pérdidas de carga y por tanto sin caídas de presión. Los estados principales del ciclo quedan definidos por los números del 1 al 4 en el diagrama T-s de la figura 13:

Figura 13. **Diagrama T-s del ciclo Rankine**



1. Vapor sobrecalentado
2. Mezcla bifásica de título elevado o vapor húmedo
3. Líquido saturado
4. Líquido subenfriado

Fuente: Sperlich (2002). *Übungsaufgaben zur Thermodynamik mit MathCAD*.

Los procesos que tenemos son los siguientes para el ciclo ideal:

- Proceso 1-2: expansión isentrópica del fluido de trabajo en la turbina desde la presión de la caldera hasta la presión del condensador. Se realiza en una turbina de vapor y se genera potencia en el eje de la misma.
- Proceso 2-3: transmisión de calor a presión constante desde el fluido de trabajo hacia el circuito de refrigeración, de forma que el fluido de trabajo alcanza el estado de líquido saturado. Se realiza en un intercambiador de calor, idealmente sin pérdidas de carga.
- Proceso 3-4: compresión isentrópica del fluido de trabajo en fase líquida mediante una bomba, lo cual implica un consumo de potencia. Se aumenta la presión del fluido de trabajo hasta el valor de presión en caldera.
- Proceso 4-1: transmisión de calor hacia el fluido de trabajo a presión constante en la caldera. En un primer tramo del proceso el fluido de trabajo se calienta hasta la temperatura de saturación, luego tiene lugar el cambio de fase líquido-vapor y finalmente se obtiene vapor sobrecalentado. Este vapor sobrecalentado de alta presión es el utilizado por la turbina para generar la potencia del ciclo.

En un ciclo más realista que el ciclo Rankine ideal descrito, los procesos en la bomba y en la turbina no serían isentrópicos y el condensador y la caldera presentarían pérdidas de carga. Todo ello generaría una reducción del rendimiento térmico del ciclo. El rendimiento isentrópico de la turbina, que representa el grado de alejamiento de una turbina respecto al proceso ideal isentrópico, jugaría un papel principal en las desviaciones al ciclo ideal y en la reducción del rendimiento. El rendimiento isentrópico de la bomba y las pérdidas de carga en el condensador y la caldera tendrían una influencia mucho menor sobre la reducción de rendimiento del ciclo.

2.6.2. Fluido ideal

Las principales características que debe tener un fluido para que pueda ser utilizado eficientemente en un ciclo de Rankine, son:

- Alta valor del calor latente de vaporización a la temperatura a que ocurre la vaporización.
- Bajo valor de la capacidad calorífica del líquido.
- Temperatura crítica superior a la temperatura de funcionamiento más alta.
- No tener un valor demasiado alto de presión de vapor a la máxima temperatura de funcionamiento.
- Tener un valor de presión de vapor superior a la presión atmosférica para las temperaturas inferiores de funcionamiento.
- Bajo valor del volumen específico a las temperaturas inferiores de funcionamiento.
- Estar en estado líquido a la presión atmosférica y a la temperatura ambiente.
- Poca variación de la Entropía con la presión.
- Alto valor de conductividad térmica.
- Ser barato, estable, abundante, no inflamable, no explosivo, no corrosivo y no venenoso.

No existe una sustancia que cumpla todos los requisitos enumerados anteriormente. El agua es el fluido normalmente utilizado en los ciclos de potencia debido a que es barata y abundante, aunque tiene una temperatura crítica baja, una presión crítica alta y una baja presión de vapor a la temperatura de condensación y el líquido tiene una alta capacidad calorífica.

2.6.3. Ciclo Rankine con fluido orgánico (ORC)

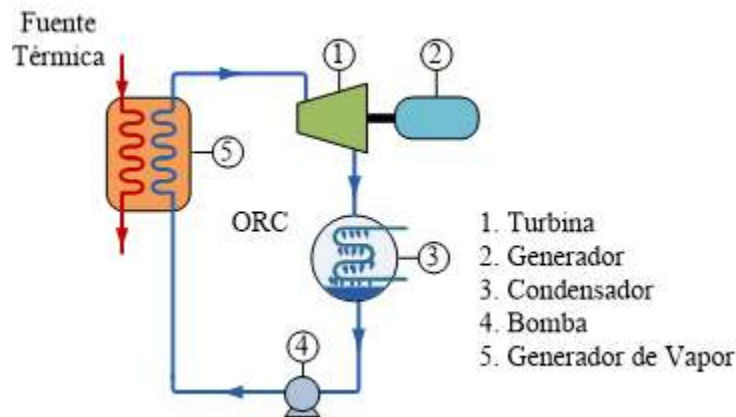
El proceso del ORC es similar al ciclo básico de Rankine, pero en vez de agua utiliza un aceite orgánico o fluido orgánico en una caldera de baja temperatura como fluido intermedio.

La temperatura de operación está entre 70 °C y 300 °C. Debido a las propiedades físicas del fluido orgánico, la expansión del vapor saturado no conduce a la zona de vapor húmedo, sino que queda en la zona de vapor sobrecalentado.

Para incrementar la eficiencia puede utilizarse un regenerador entre la turbina y el condensador para precalentar el aceite orgánico. Además, puede utilizarse un economizador para recuperar el calor de los gases de escape de la caldera. Gracias a las bajas temperaturas, el aceite orgánico puede calentarse directamente en una caldera.

Puesto que no se requiere una caldera de vapor, los costes de inversión y mantenimiento son considerablemente menores que en plantas de vapor. Otra ventaja frente a las turbinas de vapor convencionales es la posibilidad de operar a cargas parciales en un rango entre el 30 % y el 100 % de plena carga. Los ORC son bien conocidos para aplicaciones geotérmicas, pero hay pocas aplicaciones de combustión de biomasa.

Figura 14. **Ciclo Rankine con fluido orgánico**



Fuente: Vásquez (2013). *Uso de ciclos Rankine orgánicos para generación de potencia acoplados a fuentes renovables y calor de desecho*. Consultado el 10 de junio 2016.

Recuperado de <http://latinoamericarenovable.com/?p=4365>

Tradicionalmente al fluido de trabajo se le llama fluido orgánico puesto que suelen ser compuestos químicos con cadenas de hidrocarburos, como por ejemplo el propano o el butano. Dado que la rama de la química que estudia los compuestos del carbono es la química orgánica, y asumiendo que todos los fluidos de trabajo del ORC contienen carbono, se toma la generalización de llamarlos fluidos orgánicos.

Evidentemente el mero hecho de considerarse un fluido seco no garantiza la funcionalidad del fluido en el ciclo en sí. Las características que debería reunir el fluido de trabajo en un ORC son las siguientes:

- Bajo punto de congelación, estabilidad a altas temperaturas
- Baja entalpía de vaporización
- Bajo impacto ambiental: que no sea tóxico, corrosivo o inflamable

2.6.3.1. Ventajas

- El equipo consume CERO combustibles fósiles y genera CERO emisiones adicionales.
- No necesita caja reductora para el generador eléctrico por lo que las pérdidas mecánicas son casi nulas.
- Debido a las propiedades del fluido orgánico, y al ciclo cerrado, no se produce corrosión, y el sistema no pierde fluido de trabajo salvo rotura.
- Gran rendimiento, entre un 95-98 %. (25-30 % eléctrico, resto térmico).
- Poco ruidosos, compactos y con bajo mantenimiento.
- En resumen, aprovechar energía que de otro modo estarías desperdiciando: menos costes en caso de sistemas de producción o mayores beneficios en caso de sistemas de generación de energía.
- Excelente comportamiento a carga parcial
- Capacidad de alternancias de carga rápida
- Tecnología madura y fiable
- No hay peligro de erosión de las gotas en las hojas de la turbina, debido a las propiedades termodinámicas favorables del fluido.
- No se necesita la supervisión constante de la caldera de vapor
- Alto grado de automatización
- Bajos costes de mantenimiento
- La ejecución de las unidades de ORC en las instalaciones de combustión de biomasa existentes es relativamente fácil

2.6.3.2. Desventajas

- Aunque existen sistemas modulares, normalmente cada industria, cada planta de producción de energía, tiene unas características distintas por lo que es posible que el diseño del ORC deba de hacerse “a la medida”.
- Aunque el rendimiento es muy alto, la producción eléctrica es baja por la alta densidad del fluido orgánico, que hace que este sea muy lento y la turbina generadora no pueda girar muy rápido. Este hecho limita en algunos casos la posibilidad de implantación.

2.7. Generador Distribuido Renovable (GDR)

En Guatemala, la generación distribuida se acota a generadores que producen energía utilizando tecnologías de generación con recursos renovables, las cuales se conectan a instalaciones de distribución cuyo aporte de potencia neto es inferior o igual a 5 MW. Se considerarán tecnologías con recursos renovables a aquellas que utilizan la energía solar, eólica, hidráulica, geotérmica, biomasa y otras que el Ministerio de Energía y Minas determine.

2.7.1. Norma Técnica de Generación Distribuida Renovable y Usuarios Autoprodutores con Excedentes de Energía (NTGDR)

La creación de la Norma Técnica de Generación Distribuida Renovable busca mejorar, en teoría, las condiciones para que un inversionista introduzca una central pequeña de generación con recursos renovables en el sistema eléctrico nacional, con el fin de la disminución de los precios de la energía. La norma para el generador distribuido renovable (GDR) fue aprobada por la

Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE), que es el ente regulador del sector eléctrico guatemalteco.

Características principales de la norma:

- Considera las fuentes de energía renovable: biomasa, eólica, geotermia, hidroeléctricas y solar.
- Facilita y aclara el proceso de aprobación del proceso de interconexión y operación de la planta y la comercialización de su energía producida.
- El tamaño de la GDR debe ser menor a 5 MVA.
- Sistemas que están o estarán conectados a las instalaciones de distribución eléctrica de 13.8 y 34.5 kV.
- Las compañías de distribución están obligadas a permitir la conexión de las GDR al sistema eléctrico, después de recibir la aprobación con un estudio de capacidad de la red.
- Los GDR están obligadas a solicitar acceso a la red a las compañías de distribución, y de ser necesario aumentar la capacidad de la red a la que se van a conectar.
- Las GDR pueden participar en licitaciones públicas para suplir la demanda de las compañías de distribución o vender su energía en el mercado *spot* guatemalteco.
- Los generadores distribuidos están exentos de pagos de peaje secundario de transmisión.
- Existe una tabla detallada con el equipo necesario para conectar al sistema eléctrico.

Con base en lo anteriormente mencionado se puede determinar que los GDR tendrán la posibilidad de vender la energía producida al sistema eléctrico nacional de manera más rápida, ya sea en un mercado *spot* o en contratos de

energía. Para entender y definir un poco más esta ley, el proyecto de generación con recursos renovables se puede resumir en que para una producción igual o menor de 5 MVA, su conexión a la red no tendrá mayor trámite ante los entes reguladores, esto por supuesto tiene sus restricciones, debido a que en Guatemala el sistema eléctrico nacional se encuentra en proceso de ampliación y mejora en cuanto a capacidad de transporte de la red. (CNEE, 2014)

Figura 15. **Marco legal del subsector eléctrico en Guatemala**



Fuente: Velásquez (2013). *Generación distribuida caso Guatemala*.

3. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

3.1. Cantidad y calidad energética de la materia orgánica del campus central

La materia orgánica que se tiene como enfoque principal para la generación de bioenergía es todo el desecho orgánico que se ve generado dentro del campus central. Este es un recurso que se ha visto desaprovechado por mucho tiempo y que es variado y vasto de encontrar dentro del campus. Se aproxima su producción diaria a 1 tonelada.

A continuación, se presentan los valores obtenidos de su poder calorífico superior, determinado de muestras mixtas de desecho orgánico recolectado en la quebrada del CEDA, donde se ha dado el uso por distintas áreas de la universidad como un botadero comunal de desechos orgánicos. Fueron tomadas 3 muestras, tomando muestra del estrato inferior, medio y superficial respectivamente. Estos valores fueron determinados en los laboratorios del Ministerio de Energía y Minas (MEM).

Tabla V. Poder calorífico superior de muestras del campus central

Estrato	Poder calorífico superior (MJ/kg)
Inferior	13.27
Medio	12.92
Superficial	12.21
PROMEDIO	12.80

Fuente: elaboración propia.

3.2. Propuesta de un bosque energético dentro del campus central

Como propuesta para una generación continua de energía eléctrica en caso la producción de biomasa natural no sea suficiente, se presenta la implementación de un bosque energético de eucalipto. Esto a manera de tener un mayor impacto dentro de la matriz energética del campus central y de tal manera que se reduzca el consumo de energía eléctrica proveniente del sistema eléctrico nacional.

A continuación, se muestra el área en la que se planea ubicar el bosque energético de la Universidad de San Carlos, terreno que se encuentra en las cercanías de la planta de tratamiento de agua, y en el terreno aldaño a la colonia Villa Sol, los cuales en sumatoria presentan una dimensión de 56,152.29m². Esta área pertenece igual al CEDA como parte de la carrera de Recursos Naturales Renovables (RNR), como parte del área de especies forestales.

Figura 16. **Área propuesta para la plantación del bosque energético**



Fuente: elaboración propia, utilizando *Google Earth*.

La distancia recomendada, según las plantaciones anteriores de bosques energéticos de eucalipto, la especie *Eucalyptusurophylla* debe tener una distancia de 2 metros de frente y 3 metros de costado para cada árbol, siguiendo como base los datos expuestos por Pilonés de Antigua, S.A. De esto se pueden determinar los siguientes parámetros:

- Cada árbol ocupa 6m² por el espacio de distanciamiento.
- Área de la plantación es 56,152.29m² equivalente a 5.62Ha.
- Por lo que en el área se pueden sembrar 9,359 árboles.

3.3. Capacidad bioenergética del campus central

Con base en los datos obtenidos de la materia orgánica que se encuentra dentro del campus central, tenemos que el poder calorífico superior promedio de 12,800 KJ/kg, aplicando un Factor de Reducción de Emisiones Térmicas del 0.43, ya que se procesará esta materia fresca con una humedad del 50 %, presenta un poder calorífico inferior de 5,504 KJ/kg. Tomando la producción de 1 Tm diaria dentro de la Universidad, lo cual equivale a 37.52 gal de búnker diarios, 1.56 gal por hora disponibles para su transformación. Esto da una capacidad de generación de 217,383.70 BTU/h, o 63.69 kWh térmicos.

Para la biomasa:

$$PCI = PCS * FR$$

Tabla VI. Humedad relativa (HR) y factor de reducción (FR)

Humedad Relativa (HR)	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %	60 %
Factor de Reducción (FR)	0.89	0.77	0.60	0.54	0.43	0.32

Fuente: Unión de actores de la biomasa de Andalucía (2014). *La Humedad / PCI*. Consultado el 10 de junio 2016. Recuperado de [http://www.biomasaandalucia.com/biocombustibles/--](http://www.biomasaandalucia.com/biocombustibles/--humedad-p-c-i)

humedad-p-c-i

$$PCS_{biomasa} = 12,800 \text{ kJ/kg}$$

$$FR @ 50 \% = 0.43$$

$$PCI_{biomasa} = 12,800 \text{ kJ/kg} * 0.43$$

$$PCI_{biomasa} = 5,504 \text{ kJ/kg}$$

$$E_{biomasa} = m * PCI_{biomasa}$$

$$E_{biomasa} = 1000 \text{ kg} * 5,504 \text{ kJ/kg}$$

$$E_{biomasa} = 5,504,000 \text{ kJ}$$

Densidad de energía para el bunker:

$$PCI_{bunker} = 40,800 \text{ kJ/kg}$$

$$\rho_{bunker} = 0.95 \text{ kg/L}$$

$$w_{bunker} = PCI_{bunker} * \rho_{bunker}$$

$$w_{bunker} = 40,800 \text{ kJ/kg} * 0.95 \text{ kg/L}$$

$$w_{bunker} = 38,760 \text{ kJ/L} = 146,707 \text{ kJ/gal}$$

Biomasa a bunker equivalente:

$$V = \frac{m}{\rho} = \frac{E/PCI}{w/PCI} = \frac{E}{w}$$

$$V_{biomasa} = \frac{5,504,000 \text{ kJ}}{146,707 \text{ kJ/gal}}$$

$$V_{biomasa} = 37.52 \text{ gal}$$

Capacidad térmica:

$$Q = w * V$$

$$Q = 146,707 \text{ kJ/gal} * \frac{37.52 \text{ gal}}{24 \text{ h}}$$

$$Q = 229,351.94 \text{ kJ/h} = 217,383.70 \text{ BTU/h} = 63.69 \text{ kWh}$$

Para la propuesta del bosque energético, tomando en cuenta una humedad de la biomasa de 50 %, un poder calorífico inferior de la biomasa en peso fresco de 9.780KJ/kg, y una relación de 0.80 de peso fresco sobre volumen por hectárea. Cada hectárea tiene la capacidad de producción de un volumen de biomasa de 156.25m³, equivalente a 125Tm por hectárea, tomando una densidad de 1,667 árboles por hectárea, tomando una distancia de siembra de 2 x 3 metros. Por lo que con la plantación del bosque energético de la USAC se obtiene una masa total de 702.5Tm. Por lo tanto, serían 46,831 gal. Esto dividido en ciclos para el crecimiento y corte con periodicidad de 4 años, se determina que se tienen 11,707 gal al año, 32.08 gal diarios, 1.34 gal por hora disponibles para su transformación. Esto da una capacidad de generación de 186,328.88BTU/h o 54.59 kWh térmicos.

Para el bosque energético:

$$PCI_{bosque} = 9,780 \text{ kJ/kg}$$

$$E_{bosque} = m * PCI_{biomasa}$$

$$E_{bosque} = 702,500 \text{ kg} * 9,780 \text{ kJ/kg}$$

$$E_{bosque} = 6,870,450,000 \text{ kJ}$$

Bosque energético a búnker equivalente:

$$V = \frac{m}{\rho} = \frac{E/PCI}{w/PCI} = \frac{E}{w}$$

$$V_{bosque} = \frac{6,870,450,000 \text{ kJ}}{146,707 \text{ kJ/gal}}$$

$$V_{bosque} = 46,831 \text{ gal}$$

Por hora, en ciclos de 4 años:

$$V_{bosque} = \frac{46,831 \text{ gal}}{4 * 365 * 24}$$

$$V_{bosque} = 1.34 \text{ gal}$$

Capacidad térmica:

$$Q = w * V$$

$$Q = 146,707 \text{ kJ/gal} * 1.34 \text{ gal}$$

$$Q = 196,587.38 \text{ kJ/h} = 186,328.88 \text{ BTU/h} = 54.59 \text{ kWh}$$

Con base en los datos obtenidos se puede determinar que la capacidad bioenergética del campus central es de 403,712.58 BTU/h o 118.28 kWh térmicos.

Tabla VII. **Capacidad energética total**

	BTU/h	kWh térmico
Capacidad térmica Biomasa	217,383.70	63.69
Capacidad térmica Bosque Energético	186,328.88	54.59
Capacidad energética Total	403,712.58	118.28

Fuente: elaboración propia.

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. Dimensionamiento y selección de componentes

Basándose en los datos obtenidos se propone la instalación de una caldera piro tubular de biomasa poli combustible para el consumo de una tonelada aproximadamente de desecho orgánico, por lo menos de 395,000 Btu/h, para una potencia instalada de 115 kW térmicos. Se emplearía un sistema de generación basado en el ciclo de Rankine con Fluido Orgánico, es un sistema modular en la cual el evaporador absorberá la energía calórica que proviene de la caldera. De esta forma el fluido R245fa tendrá su cambio de fase de líquido a vapor e impulsará un turbo expansor de alta velocidad que se encuentra conectado a un generador síncrono trifásico de corriente alterna de 10 kW eléctricos. Incluyendo un centro de transformación utilizando un transformador pad-mounted de 15kVA, para la elevar de tensión de 120/240V a 13.8kV y poder acoplarlo a la red.

4.2. Ubicación propuesta para el centro de almacenaje y procesamiento de biomasa para la generación eléctrica

Buscando un punto cercano para acoplar el sistema a la red eléctrica del campus central, se plantea la ubicación mostrada en la figura 14. Esto con el fin de proponer un punto medio entre la fuente de biomasa por parte del bosque energético y la red eléctrica de media tensión ubicada a lo largo del periférico universitario. En esta ubicación se encontrará el sistema de secado, astillado, almacenamiento de la biomasa y consecuentemente el sistema de generación a base de biomasa poli combustible.

Figura 17. **Área propuesta para el centro de almacenaje y procesamiento de biomasa para la generación eléctrica**



Fuente: elaboración propia, utilizando *Google Earth*.

4.3. Secado, astillado y almacenamiento de la biomasa

Para el astillado y aumento de densidad se propone una máquina de molino de martillo con motor de doble ciclón para biomasa mixta. El almacenamiento y secado se llevará a cabo en las áreas donde se realice el corte del bosque energético según el ciclo propuesto. Debido a las condiciones climáticas de nuestro país, se plantea utilizar un secador solar tipo invernadero con convección natural, como los utilizados para productos agrícolas ya existentes dentro del CEDA. Se puede aumentar la eficiencia del secado utilizando un colector solar a la entrada de aire fresco junto a un ventilador para mejorar la circulación de aire. Esto a manera de reducir la humedad en el material, ya que puede que tenga niveles entre 45 % y 50 % de humedad, lo cual impide una buena combustión y un buen aprovechamiento de la energía de la biomasa; si la biomasa es procesada en estas condiciones, puede conllevar a la

emisión de monóxido de carbono CO y a una reducción en la eficiencia energética del sistema respectivamente. La biomasa ya procesada y en condiciones favorables de humedad, se transportará a las cercanías de la planta de generación, para allí ser almacenada bajo techo y para su posterior inserción al sistema.

4.4. Aporte energético

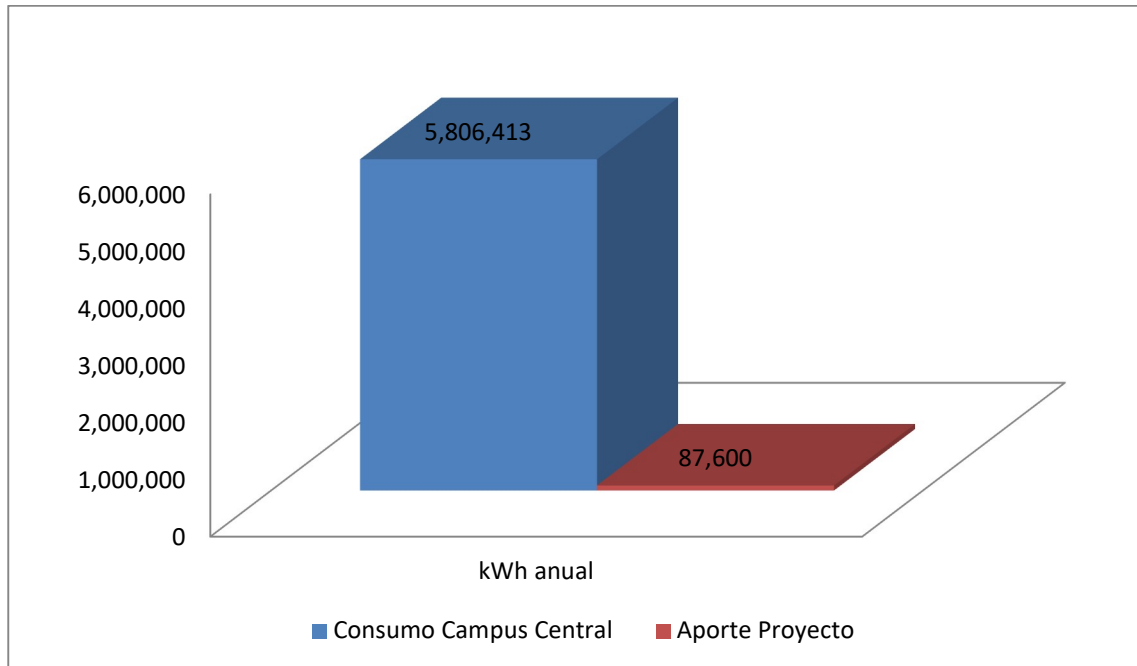
Para el año 2013 se registró un consumo energético anual en el campus central de 5,806,413 kWh, con esta propuesta se puede lograr una producción de 87,600 kWh al año, lo cual supondría un aporte a la matriz energética de la Universidad del 1.5 %. Pudiendo hacer un análisis en base a la matriz energética: esto equivale a sustituir el 14.5 % del consumo eléctrico del edificio T-3 de la facultad de Ingeniería, o sustituir completamente el consumo eléctrico de la Escuela de Historia y Trabajo Social, con un excedente del 0.06 %, por una energía renovable. Esto se lograría tomando en cuenta que es una energía renovable auto sostenible, reduciendo así la factura eléctrica y brindando un ahorro financiero para el campus central, además de las emisiones de gases de efecto invernadero al ambiente.

Tabla VIII. **Producción anual de biomasa, energía eléctrica y reducción de la tarifa**

PRODUCCIÓN ANUAL	
Biomasa	365 Tm
Bosque Energético	175.6 Tm
Energía eléctrica	87,600 kWh
Reducción en la tarifa eléctrica	Q 100,740.00

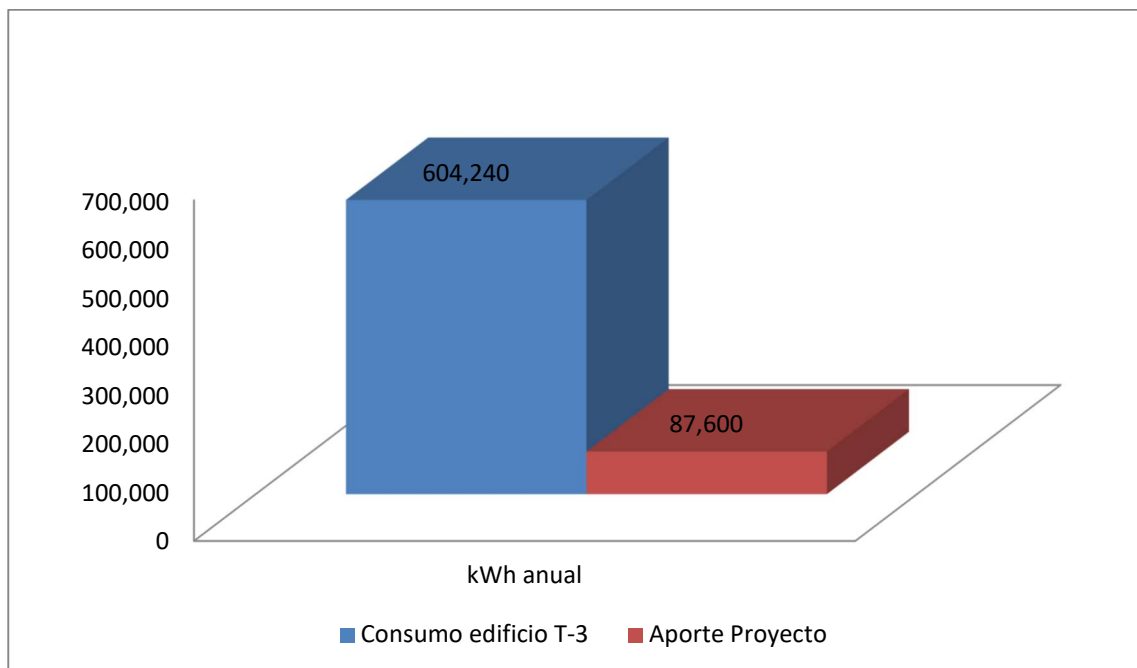
Fuente: elaboración propia.

Figura 18. **Aporte energético del proyecto al campus central**



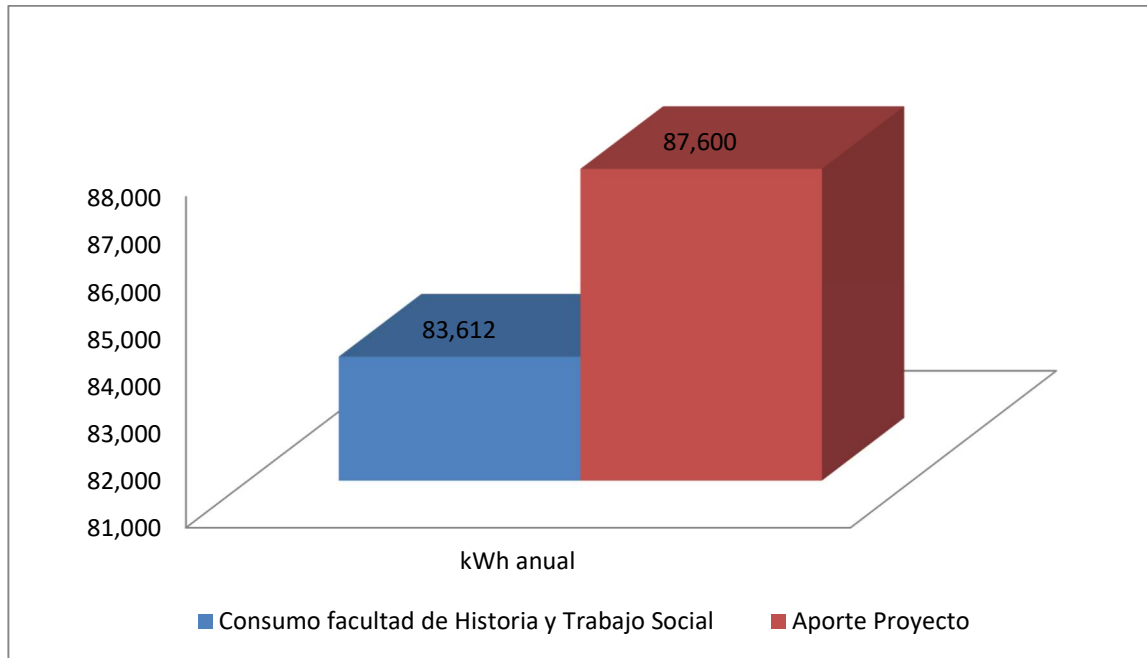
Fuente: elaboración propia.

Figura 19. **Aporte energético del proyecto al edificio T-3**



Fuente: elaboración propia.

Figura 20. **Aporte energético del proyecto a la Escuela de Historia y Trabajo Social**



Fuente: elaboración propia.

4.5. Emisiones al ambiente antes y después

Buscando la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero que se liberan al ambiente, se tiene que la sustitución de este 1.5 % del consumo energético del campus central supone a un valor equivalente de 39.27 toneladas de CO_2 anuales tomando los valores de EPA de 0.4483 kg de CO_2 por kWh, estas son emisiones que ya no verán efecto en nuestro entorno gracias a este proyecto. Adicional a esto se tiene la reducción de las emisiones de la quema de broza a cielo abierto dentro del campus central, este valor es un estimado ya que un valor real y específico no es posible ya que se tienen demasiadas variables y circunstancias para la quema a cielo abierto pero tomando los valores de EPA para biomasa de derivados de la agricultura tenemos que son 118.17 kg de CO_2 por MMBTU, que supone un aproximado de 225.03 Tm de CO_2 que no serán

liberados al ambiente de forma anual. Sumando estos valores tenemos que son 264.3 Tm de CO_2 que la Universidad de San Carlos no emitirá al ambiente, de esta forma dejando de aportar gases de efecto invernadero. (EPA, 2018)

Reducción de emisiones de CO_2 anuales por kWh equivalente:

$$Emisiones\ CO_2 = E_{kWh} * f_{CO_2}$$

$$Emisiones\ CO_2 = 87,600\ kWh * 0.4483\ kg/kWh$$

$$Emisiones\ CO_2 = 39,271\ kg = 39.27\ Tm$$

Reducción de emisiones de CO_2 anuales por eliminación de quema a cielo abierto:

$$Emisiones\ CO_2 = E_{MMBTU} * f_{CO_2}$$

$$Emisiones\ CO_2 = \frac{217,383.70\ BTU/h * 24\ h * 365\ d}{1,000,000} * 118.17\ kg/MMBTU$$

$$Emisiones\ CO_2 = 225,028\ kg = 225.03\ Tm$$

Total, de reducción de emisiones:

$$Emisiones\ CO_2 = 39.27\ Tm + 225.03\ Tm$$

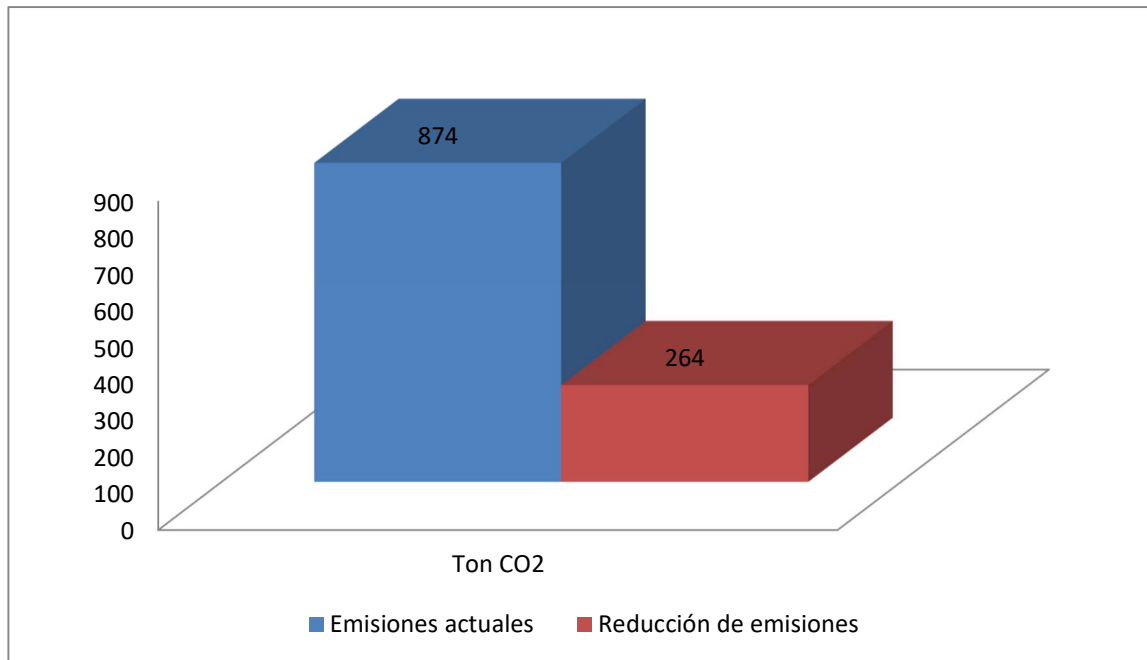
$$Emisiones\ CO_2 = 264.3\ Tm$$

Tabla IX. Reducción total de emisiones de CO_2

Emisiones de CO_2 por kWh equivalente	Emisiones de CO_2 por quema a cielo abierto	Reducción total de emisiones de CO_2
39.27 Tm	225.03 Tm	264.3 Tm

Fuente: elaboración propia.

Figura 21. **Reducción de emisiones de CO_2 del proyecto al campus central**



Fuente: elaboración propia.

4.6. Análisis técnico-financiero

Se presenta el análisis financiero del proyecto, a fin de presentar su impacto y viabilidad en el enfoque del costo de inversión.

4.6.1. Propuesta administrativa

Lineamientos para el enfoque administrativo, principalmente se debe tener una estandarización de los siguientes procesos:

- Recolección de biomasa de las áreas verdes y agrícolas del campus central.

- Siembra y corte periódico de 4 años para el bosque energético de eucalipto, con apertura a siembra de otras especies.
- Molido, secado y almacenamiento de biomasa
- Operación de molino de biomasa
- Mantenimiento de molino de biomasa
 - Mantenimiento predictivo
 - Mantenimiento preventivo
 - Mantenimiento programado
 - Mantenimiento correctivo
- Operación de caldera piro tubular de biomasa poli combustible.
- Mantenimiento de caldera piro tubular de biomasa poli combustible
 - Mantenimiento predictivo
 - Mantenimiento preventivo
 - Mantenimiento programado
 - Mantenimiento correctivo
- Operación de módulo ORC
- Mantenimiento de módulo ORC
 - Mantenimiento predictivo
 - Mantenimiento preventivo
 - Mantenimiento programado
 - Mantenimiento correctivo
- Manual didáctico
 - Docente
 - Estudiante

4.6.2. Equipo requerido

En la siguiente tabla se presenta el equipo necesario para el proyecto propuesto:

Tabla X. **Equipo, infraestructura y servicios**

Equipo, infraestructura y servicios	Inversión (Q)
Caldera de biomasa poli combustible de 100kW	45,000.00
Módulo ORC de 10kW	150,000.00
Molino de martillo con motor de doble ciclón para biomasa mixta	30,000.00
Alimentador continuo de biomasa	30,000.00
Infraestructura para molino.	2,000.00
Instalación de molino	5,000.00
Infraestructura para área de generación	48,250.00
Instalación de caldera	35,000.00
Instalación de módulo ORC	22,500.00
Importación de equipo	80,000.00
Total parcial	447,750.00
IVA 12 %	53,730.00
Imprevistos	100,296.00
TOTAL	601,776.00

Fuente: elaboración propia.

4.6.3. Estudio financiero

Tomando en cuenta el análisis previo del equipo e insumos necesarios para la operación realizaremos el análisis de viabilidad del presente proyecto, esto se debe a la naturaleza como proyecto y propuesta del uso de una energía alternativa para suplir la demanda actual de energía eléctrica dentro del campus central.

Como primer punto tomaremos en cuenta un financiamiento bancario con una tasa atractiva real y actual del 8 % a un plazo de 13 años, y se considera una

inversión inicial del 20 % del valor total del proyecto que equivale a Q. 120,355.20, para lo cual obtenemos lo siguiente.

Tabla XI. **Financiamiento**

Cantidad en préstamo	Q. 481,420.80
Tasa de interés	8 %
Años	13
Total a pagar	Q. 1,311,459.13
Pago anual	Q 100,881.47

Fuente: elaboración propia.

Considerando los gastos de operación y mantenimiento del sistema propuesto se obtiene lo siguiente.

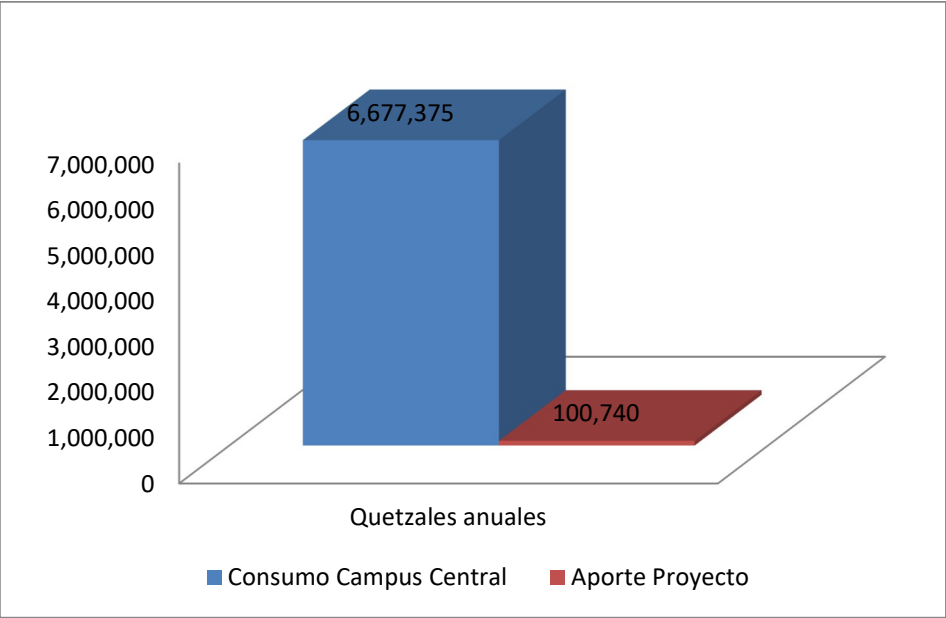
Tabla XII. **Gastos de operación y mantenimiento**

Egresos	Monto
Mano de obra	Q 39,200.00
Transporte de Biomasa	Q 4,800.00
Mantenimiento caldera	Q 400.00
Mantenimiento ORC	Q 3,000.00
TOTAL	Q 47,400.00

Fuente: elaboración propia.

Para los ingresos se contempla un valor para la energía eléctrica con base en la tarifa actual de 0.95 Q/kWh. Lo cual nos aporta un ahorro anual de Q. 100,740.00. Con esto presente podemos presentar el flujo de ingresos, flujo de egresos, flujo de efectivo neto, para los 13 años que se tiene proyectada la inversión, así como su respectivo análisis con base en las herramientas VAN y TIR.

Figura 22. **Aporte económico del proyecto al campus central**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Flujo de caja**

Mes	Flujo de Ingresos (Q)	Flujo de Egresos (Q)	Flujo de Efectivo Neto (Q)
1	100,740.00	148,281.47	-47,541.47
2	100,740.00	148,281.47	-47,541.47
3	100,740.00	148,281.47	-47,541.47
4	100,740.00	148,281.47	-47,541.47
5	100,740.00	148,281.47	-47,541.47
6	100,740.00	148,281.47	-47,541.47
7	100,740.00	148,281.47	-47,541.47
8	100,740.00	148,281.47	-47,541.47
9	100,740.00	148,281.47	-47,541.47
10	100,740.00	148,281.47	-47,541.47
11	100,740.00	148,281.47	-47,541.47
12	100,740.00	148,281.47	-47,541.47
13	100,740.00	148,281.47	-47,541.47
TOTAL	1,309,620.00	1,927,659.13	

Fuente: elaboración propia.

Tasa de rentabilidad = 10 %

VAN = -458,259.21

TIR = N/A

Con base en este análisis se evidencia que, desde el punto de vista financiero, no es un proyecto viable para ser llevado a cabo, pero presenta otros puntos favorables. Entre ellos pueden destacar la posibilidad de negociar con Certificados de Emisiones Reducidas (CER), más conocidos en el medio como “Bonos de Carbono”. Teniendo a disposición 264 CER para este tipo de transacciones anuales.

De igual forma cabe destacar la mejora de la imagen institucional al implementar sistemas de generación a través de energías renovables, lo cual adiciona al puntaje para la clasificación de las mejores universidades nivel nacional y mundial. Ya que brinda una actualización y mejora a la infraestructura del campus central, así como una herramienta didáctica para los estudiantes y docentes de la USAC.

CONCLUSIONES

1. La propuesta de una planta termoeléctrica piloto alimentada con la materia orgánica proveniente del campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala presenta ser viable técnicamente mas no es viable financieramente, a pesar de proponerse un bosque energético dentro de la misma para garantizar una generación de potencia eléctrica de forma continua.
2. El potencial energético de una planta termoeléctrica dentro del *campus* central para generar electricidad a base de un recurso renovable de tipo biomasa es de 87,600 kWh al año, lo cual supondría un aporte a la matriz energética de la Universidad del 1.5 %. Esto es equivalente a reducir el consumo eléctrico del edificio T-3 de la facultad de Ingeniería en un 14.5 %, o sustituir el consumo total y con excedente de la escuela de Historia y Trabajo Social por una energía renovable.
3. El beneficio ambiental se ve principalmente reflejado en la reducción de emisiones de CO_2 al ambiente, siendo estas en total 264.4 Tm, que ya no serán liberados al ambiente de forma anual. Desde el punto de vista social esto se vería reflejado en una reducción en la exposición directa de la población universitaria y aledaña al campus central a estos gases contaminantes, reduciendo el desarrollo de problemas de tipo respiratorio.
4. Este proyecto de generación de energía eléctrica a partir de residuos orgánicos no presenta ser viable financieramente para la USAC, tal como se observa en el análisis financiero, basado en las herramientas VAN y

TIR. Pero un aspecto positivo que cabe mencionar es la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero al ambiente, destacando la posibilidad de negociar con Certificados de Emisiones Reducidas (CER), más conocidos en el medio como “Bonos de Carbono”. Teniendo a disposición 264 CER para este tipo de transacciones anuales.

5. Didácticamente, se puede ver el beneficio para la Escuela de Ingeniería Mecánica como un apoyo a los cursos de termodinámica y plantas de vapor; para la Escuela de Ingeniería Química en el enfoque ambiental de esta propuesta; para la escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica un apoyo para los cursos de Conversión de la Energía Electromecánica, Sistemas de Generación, Máquinas Eléctricas, Preparación y Evaluación de Proyectos, entre otros. También se puede ver un apoyo didáctico para la Facultad de Agronomía, desde el punto de vista de Recursos Renovables y Forestales, Facultad de Ciencias Económicas desde el punto de vista de Evaluación y Ejecución de Proyectos.

RECOMENDACIONES

1. Tener especial cuidado al momento de realizar los cálculos y dimensionamiento del equipo para poder presentar la mejor propuesta técnica, para que esta sea viable y funcional. Ya que como se presenta en este documento, una planta de pequeña o mediana escala para que sea funcional debe utilizar un sistema de generación basado en el Ciclo Rankine con fluido orgánico, de lo contrario no sería posible generar de forma eficiente.
2. Realizar un proceso de secado y astillado, tanto para reducir el porcentaje de humedad en la biomasa y de esta forma lograr una mejor combustión, así como para tener un espacio menor para el almacenamiento de la biomasa. Todo esto en pro de tener un proceso de generación más eficiente tanto desde el enfoque operacional como logístico.
3. Considerar la baja eficiencia de transformación de la energía calórica fuente, hacia el fluido orgánico de este tipo de sistemas ORC, que oscila en eficiencias entre 7 % y 10 %, lo cual se ve reflejado en una baja producción de energía eléctrica.
4. Tomando en cuenta las características climáticas del país, 6 meses en promedio de lluvia al año, es imprescindible almacenar la materia orgánica en un ambiente libre de humedad como el propuesto en este documento, un sistema de secado solar tipo invernadero.

5. Reactivar la estación meteorológica ya existente en el área del CEDA para tener un pronóstico más certero de las condiciones climáticas y con ello programar las fechas más oportunas de siembra y corte para cada ciclo del bosque energético.

REFERENCIAS

1. ASEMFO (2013). *¿Qué entendemos por biomasa?* Madrid, España: Autor. Recuperado de <http://www.geoscopio.com/escaparate/verpagina.cgi?idpagina=20637741&refcompra=>
2. Barriga, A. (2014). *Introducción al estudio de fuentes renovables de energía*. Guayaquil, Ecuador: LATIn
3. Cano, C. (noviembre, 2014). Calefacción de distrito urbana con biomasa de la Universidad de Valladolid: objetivo 20/20/20. *12º Congreso Nacional del Medio Ambiente (CONAMA 2014)*. Congreso llevado a cabo en Madrid, España.
4. CNEE (2014). *Norma Técnica de Generación Distribuida Renovable y Usuarios Autoproductores con Excedentes de Energía (NTGDR)*. Ciudad de Guatemala: Autor.
5. De León, J. S. (2010). *Estudio de factibilidad para producción de energía eléctrica, a partir de biomasa de eucalipto*. (Tesis de licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala.
6. EPA (2020). *Calculadora de equivalencias de gases de efecto invernadero - Cálculos y referencias*. Washington, D.C.: Autor.

7. FAO (1995). *Memoria - Reunión regional sobre generación de electricidad a partir de biomasa 1995*. Santiago de Chile: Autor.
8. Gobierno de Canarias (2014). *Central Termoeléctrica (Esquemas)*. Santa Cruz de Tenerife: Autor.
9. IMARTEC (2014). *¿Es realmente la biomasa neutra en emisiones de carbono?* Lérida, España: Autor. Recuperado de <https://www.imartec.es/es-realmente-la-biomasa-neutra-en-emisiones-de-carbono/>
10. López, M. R. (2015). *Lineamientos de política energética universitaria (propuesta)*. Guatemala: Editorial universitaria.
11. López, M. R. (2016). *Sistema de gestión de la energía, mediante la metodología ISO 50001:2011, para la ciudad universitaria, zona 12, Universidad de San Carlos de Guatemala (2015)* (Tesis de maestría). Universidad de San Carlos de Guatemala, Ciudad de Guatemala.
12. Míguez, C. D. (2013). *La eficiencia energética en el uso de la Biomasa para la generación de energía eléctrica: optimización energética y exergética* (Tesis de doctorado). Universidad Complutense de Madrid, Madrid.
13. Orozco, J. M. (2012). *Estudio de factibilidad para la generación de energía eléctrica en Olmeca S.A.* (Tesis de licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.

14. Ponciano, J.A. *et al.*, (2015). *Perfil energético de Guatemala: Introducción al sector eléctrico*. Guatemala: Cara Parens.
15. Seymour, J. (1962). *El laboratorio del ingeniero mecánico*. Buenos Aires, Argentina: HASA
16. Sperlich, V. (2002). *Übungsaufgaben zur Thermodynamik mit MathCAD*. München, Alemania: Fachbuchverlag Leipzig.
17. UNESA (2014). *Central de cogeneración mediante biomasa*. Madrid, España: Autor. Recuperado de <http://www.unesa.es/biblioteca/>
18. Unión de actores de la biomasa de Andalucía (2014). *La Humedad / PCI*. Andalucía, España. Recuperado de <http://www.biomasaandalucia.com/biocombustibles/--humedad-p-c-i>
19. Velásquez, S. (2013). *Generación distribuida caso Guatemala*. Ciudad de Guatemala, Guatemala: CNEE.