



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
ENERGÍA – PROCESOS Y USO EFICIENTE DE ENERGÍA

ANÁLISIS DE UNA PLANTA DE COGENERACIÓN PARA APROVECHAR LOS RESIDUOS
PRODUCIDOS EN EL PROCESAMIENTO DE CAFÉ EN LA FINCA NUEVO MÉXICO

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
MORALES JIMÉNEZ JUAN MANUEL

TUTOR PRINCIPAL
DR. GABRIEL LEÓN DE LOS SANTOS
FACULTAD DE INGENIERÍA

Ciudad Universitaria, Cd. Mx., noviembre 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. William Vicente y Rodríguez
Secretario: Dr. Sergio Quezada García
1^{er}. Vocal: Dr. Gabriel León De Los Santos
2^{do}. Vocal: Dr. Pablo Álvarez Watkins
3^{er}. Vocal: M. en I. Augusto Sánchez Cifuentes

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Ciudad Universitaria, Ciudad de México.

TUTOR DE TESIS:

Dr. Gabriel León de Los Santos

FIRMA

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ingeniería por permitirme superar académicamente en el programa de posgrado.

Al CONACYT por el apoyo brindado durante mis estudios en el posgrado de la Facultad de Ingeniería.

A mi asesor, el Dr. Gabriel León de los Santos, por compartir sus grandes conocimientos, por su apoyo y confianza a lo largo de mi formación en la Maestría.

A los integrantes del jurado por su tiempo y la aportación de sus valiosos conocimientos.

Al Ing. Ricardo Baumann, dueño de la Finca Nuevo México, por todo el apoyo brindado y por otorgarme la oportunidad de visitar su finca para la recopilación de datos.

Con especial dedicatoria para mis padres, Juan y María, sabiendo que no existe forma de agradecer por todo el sacrificio que hicieron por mí, por los consejos y valores para hacer de mí una mejor persona cada día, pero sobre todo, por el gran cariño que me han brindado.

A mis familiares, amigos y personas cercanas, quienes fueron parte fundamental en mi vida, por apoyarme, por creer en mí y por ser un motor para seguir adelante.

Contenido

Indicé de Tablas.....	3
Indicé de Figuras.....	3
Objetivos.....	6
Objetivo general	6
Objetivos particulares.....	7
Introducción.....	7
Capítulo 1. Antecedentes	12
Introducción.....	12
1.1. Problemática.....	12
1.2. Energías renovables.....	13
1.2.1. Energía Solar Térmica.....	15
1.2.2. Energía solar Fotovoltaica.....	15
1.2.3. Energía Eólica	16
1.2.4. Hidroeléctrica	17
1.2.5. Energía Mareomotriz	18
1.2.6. Energía Geotérmica	18
1.2.7. Biomasa	19
1.3. Sistemas y tecnologías de aprovechamiento de biomasa.....	20
1.3.1. Sistemas de aprovechamiento de biomasa	21
1.3.2. Tecnologías de aprovechamiento de biomasa.....	22
1.4. Cogeneración	28
1.4.1. Aplicaciones de la Cogeneración	31
1.4.2. Tipos de plantas de cogeneración	32
1.5. Combustibles.....	37
1.6. Aspectos generales del cultivo y procesamiento de café.....	37
1.6.1. Requerimientos energéticos en este sector	41
1.6.2. Tipo de maquinaria industrial usada en sus procesos.....	42
1.6.3. Aprovechamiento de biomasa en la producción del café.....	43
1.7. Marco legal.....	44
1.8. Conclusión	49

Capítulo 2. Caracterización de los requerimientos energéticos en el procesamiento de café del caso de estudio	50
Introducción	50
2.1. Producción de café en México	50
2.1.1. Estacionalidad de la producción de café	52
2.2. Zona de la región propuesta	53
2.3. Procesos para la producción de café en el caso de estudio	54
2.4. Tipo de infraestructura industrial usada en sus procesos energéticos	60
2.5. Producción de residuos en el procesamiento de café, caso de estudio	66
2.6. Necesidad de estudiar e implementar la cogeneración para eficientar y mejorar los costos de este sector en el país	72
2.6.1. Necesidad de energía eléctrica y térmica en el procesado de café del caso de estudio	72
2.7. Solución a la problemática y resultados esperados con el estudio	77
2.8. Conclusión	78
Capítulo 3. Propuesta del sistema de cogeneración con gasificación	79
Introducción	79
3.1. Selección de la tecnología de aprovechamiento de residuos y de cogeneración	79
3.2. Diseño conceptual de operación de la planta	81
3.3. Modelado y simulación del sistema	83
3.4. Conclusión	91
Capítulo 4. Analisis económico y financiero	92
Introducción	92
4.1. Escenarios de operación y supuestos	93
4.2. Supuestos técnicos	94
4.3. Supuestos económicos	96
4.4. Costos de inversión y de operación y mantenimiento	97
4.5. Ingresos	99
4.6. Evaluación económica y financiera	101
4.6.1. Indicadores de rentabilidad de Escenario 1	102
4.6.2. Indicadores de rentabilidad de Escenario 2	104
4.8. Analisis de sensibilidad	104
4.8.1 Analisis de sensibilidad para el Escenario 1	105

4.8.2 Analisis de sensibilidad para el Escenario 2	105
4.9. Conclusión	106
Conclusiones Generales	107
Anexos	109
Referencias	125

Indicé de Tablas

Tabla 1. Equipos utilizados en la Finca Nuevo México.	65
Tabla 2. Porcentaje en peso del fruto fresco y toneladas al año de cada subproducto de la cosecha de café en la Finca Nuevo México.	68
Tabla 3. Porcentaje en peso de los subproductos de café de la Finca Nuevo México y otras fuentes de información.	68
Tabla 4. Toneladas de cada subproducto en la temporada 1 y temporada 2	70
Tabla 5. Parámetros de operación y desempeño recuperados de los modelos en el software Thermoflex 28.	90
Tabla 6. Parámetros de desempeño de planta CHP con gasificación y micro hidroeléctrica.	95
Tabla 7. Supuestos económicos y financieros utilizados para la evaluación	97
Tabla 8. Precio de PMLs y fracción de horas por horario en cada escenario	101
Tabla 9. Supuesto de Financiamiento.....	102
Tabla 10. Indicadores de rentabilidad de la evaluación económica y financiera para el Escenario 1.....	103
Tabla 11. Indicadores de rentabilidad de la evaluación económica y financiera para el Escenario 2.....	104

Indicé de Figuras

Figura 1. Origen y uso de las fuentes de energías renovables.	13
Figura 2. Capacidad global de energías renovables de 2007 a 2017	14
Figura 3. Gasificador de lecho fijo de flujo ascendente.....	26
Figura 4. Gasificador de lecho fijo de flujo descendente o invertido.....	26
Figura 5. Gasificador de lecho fluidizado burbujeante.	27
Figura 6. Gasificador de lecho fluidizado circulante.	28
Figura 7. Gasificador de flujo de arrastre.	28
Figura 8. Sistema convencional generación de energía contra un sistema de cogeneración.....	29

Figura 9 Tiempos de un ciclo Otto: a) Admisión, b) Compresión, c) Expansión, d) Escape	34
Figura 10. Proceso de Producción del Café.	38
Figura 11. Subprocesos en el beneficio húmedo del Café.	39
Figura 12. Subprocesos en el beneficio seco del café.	40
Figura 13. Subproceso de industrialización del grano de café.	41
Figura 14. Producción de café cereza en México, de 2004/05 a 2015/16 en millones de toneladas.	51
Figura 15. Producción de café en México, de 2004/05 a 2016/17 (Millones de sacos de 60 kg de café oro).	52
Figura 16. Estacionalidad de la producción de café cereza para el periodo 2001 a 2015. 53	
Figura 17. Procesos de producción de café en la Finca Nuevo México, sin incluir secado en patios.	54
Figura 18. Cosecha de café.	55
Figura 19. Diagrama de flujo de la etapa de siembra, cosecha y beneficio húmedo en la Finca Nuevo México.	57
Figura 20. Secado en patios en la Finca Nuevo México.	58
Figura 21. Diagrama de flujo de la etapa de secado de café de buena calidad en la Finca Nuevo México.	58
Figura 22. Diagrama de flujo de la etapa de beneficio seco en la Finca Nuevo México. ...	59
Figura 23. Recibidor de café.	60
Figura 24. Despulpadoras de café.	60
Figura 25. Tornillo helicoidal encargado de transportar la pulpa hacia la bodega de almacenamiento.	61
Figura 26. Criba rotativa posterior de las maquinas despulpadoras.	62
Figura 27. Tanques de fermentado.	62
Figura 28. Máquina de lavado.	63
Figura 29. Centrifugadora.	63
Figura 30. Tuberías que transportan el aire caliente a la salida de la caldera.	64
Figura 31. Tambor rotativo para secado de café.	64
Figura 32. Estimaciones base para elaborar el balance de masa en el procesado de café	67
Figura 33. Bodega donde se almacena la pulpa en la Finca Nuevo México.	69
Figura 34. Muestra de cascabillo utilizado para el secado mecánico.	69
Figura 35. Toneladas promedio de cosecha de café y de biomasa de residuos de café... 71	
Figura 36. Demanda eléctrica en la Finca Nuevo México para el día 29 de enero de 2019.	73
Figura 37 Área propuesta para la instalación de la planta de cogeneración con gasificador.	78
Figura 38. Sistema de Cogeneración con motor de combustión interna.	81
Figura 39. Diagrama de bloques que describe la estructura de operación del sistema de cogeneración con gasificador para la T1 (con residuos de café) en conjunción con la micro central hidroeléctrica.	84

Figura 40. Diagrama de bloques que describe la estructura de operación del sistema de cogeneración con gasificador para la T2 (con residuos de café) en conjunción con la micro central hidroeléctrica.	87
Figura 41. Diagrama de bloques que describe la estructura de operación del sistema de cogeneración con gasificador para la T2 (con residuos forestales) en conjunción con la micro central hidroeléctrica.	88
Figura 42. Diagrama de bloques que describe la estructura de operación del sistema de cogeneración con gasificador para la T3 (con residuos forestales) en conjunción con la micro central hidroeléctrica.	90
Figura 43. Esquema de operación de la finca actual sustentable sin proyecto.	92
Figura 44. Esquema de operación de la finca actual sustentable con proyecto.	93
Figura 45. Esquema de operación de finca convencional	93

SIGLAS Y ABREVIATURAS

°C: Grado Celsius.

AE: Anualidad Equivalente.

B/C: Relación Beneficio – Costo.

CELS: Certificados de Energías Limpias.

CENACE: Centro Nacional de Control de Energía.

CFE: Comisión Federal de Electricidad.

CHP: Combined Heat and Power.

COPAR: Costos y parámetros de referencia para la formulación de proyectos de inversión en el sector eléctrico.

CRE: Comisión Reguladora de Energía.

DAFP: Decremento anual del factor de planta.

FP: Factor de planta.

GEI: Gases Efecto Invernadero.

kJ: Mil Joules (kiloJoule).

kW: Mil Watts (kiloWatt).

kWe: Mil Watts eléctricos.

kWh: Mil Watts – hora (kiloWatt-hora).

LHV: Low Heating Value.
MEM: Mercado Eléctrico Mayorista.
MW: Un millón de Watts (MegaWatt).
MWe: Megawatt eléctrico.
MWh: Un millón de Watts-hora (MegaWatt-hora).
O&M: Operación y mantenimiento
PML: Precio Marginal Local.
PR simple: Período de Recuperación Simple.
SENER: Secretaría de Energía.
TIR: Tasa Interna de Retorno.
TIRM: Tasa Interna de Retorno Modificada.
TREMA: Tasa de Rendimiento Mínima Aceptable.
T1: Temporada 1.
T2: Temporada 2.
T3: Temporada 3.
USD: Dólar Americano.
VP: Valor Presente.
VPN: Valor Presente Neto.

Objetivos

Objetivo general

Proponer y analizar un sistema de cogeneración para el aprovechamiento de los residuos agrícolas del procesamiento de café en base a gasificación, en una finca cafetalera del estado de Chiapas. Desde la perspectiva técnica, tecnológica, económica y ambiental, enmarcados en las oportunidades que ofrece el nuevo mercado eléctrico mexicano para la generación limpia. Con la característica de que el sistema de cogeneración debe competir con un sistema energético sustentable ya existente y en operación en la finca.

Objetivos particulares

1. Realizar un análisis de los antecedentes para el estudio de las energías renovables, cogeneración y su marco legal, y también antecedentes del cultivo y procesamiento de café.
2. Caracterizar los requerimientos energéticos e infraestructura industrial en el procesamiento de café de una finca en específico en el estado de Chiapas, así como también la producción de residuos que se utilizaran como biomasa.
3. Proponer una planta de cogeneración con implementación de gasificación, con ayuda de un software especializado, aprovechando los residuos del procesamiento de café.
4. Obtener el análisis técnico económico de dicha planta y concluir, con base en lo anterior, si la propuesta de la planta de cogeneración y el gasificador son atractivos económica, financieramente, ambiental y socialmente; al competir contra los servicios energéticos y costos de operación existentes en la finca que ya hace uso por incineración en una caldera de los residuos agrícolas del procesamiento del café, y de la explotación parcial de una micro central hidroeléctrica que abastece del fluido eléctrico a la finca.

Introducción

Desde sus inicios, el ser humano ha buscado la manera de mejorar su estilo de vida y satisfacer sus necesidades tomando de la naturaleza todo aquello que le sea útil. Este fenómeno ha provocado algunos inconvenientes, gracias a la sobre explotación de los recursos naturales y al crecimiento progresivo de la población. La generación de energía es fundamental para el bienestar humano y el desarrollo de las naciones, pero la sociedad está atravesando por una serie de problemas respecto a este tema, entre estos problemas se tienen: el progresivo aumento en la demanda energética mundial, costos frecuentemente elevados de combustibles convencionales y por último el deterioro del medio ambiente producto de la masiva generación de gases de efecto invernadero y la inconsciente explotación de los recursos naturales.

Tomar conciencia sobre estos temas y proponer alternativas es vital para asegurar la vida futura de todos los seres vivos de este planeta. Es por ello por lo que se busca generar energía con fuentes renovables, las cuales son obtenidas de la naturaleza de manera sostenible. Dentro de las fuentes renovables, la generación de energía a través de biomasa es fundamental en todo el mundo y especialmente aplicable en las actividades del campo.

La agricultura es y ha sido indispensable para la alimentación del ser humano, y en la actualidad se cultiva en todo el mundo cereales, frutas, legumbres, verduras y hortalizas. La gran cantidad de cultivo provoca de igual manera una gran cantidad de residuos orgánicos, que pueden ser utilizados como biomasa para generar energía. Para este estudio se busca hacer algo similar, pero específicamente con la caficultura.

El cultivo de café es una fuente muy importante de ingresos y trabajo para los campesinos en varios estados de México, entre los principales estados que se cultiva café se encuentran: como primer lugar a Chiapas seguido de Veracruz y Puebla. Tan solo en México, para el periodo de 2015-2016, la producción de café verde fue de 2.5 millones de sacos de 60 kg [1]. Estos datos proporcionan un breve panorama de la gran cantidad de café que se produce en México, y en consecuencia se debe tomar conciencia de la enorme cantidad de residuos que se obtienen en la producción de café, estos residuos suelen ser: la pulpa, el mucilago y el cascabillo [2]. Los subproductos que se obtienen en el procesamiento del café son un foco muy grande de contaminación y se deben buscar alternativas para aprovechar eficientemente esta biomasa orgánica.

El caso de estudio en este trabajo es sobre una finca cafetalera ubicada en el estado de Chiapas, llamada Finca Nuevo México. Esta finca tiene una producción considerable de café y requiere de energía eléctrica para los procesos de producción de café, también requiere energía térmica para el secado de los granos del café. Actualmente esta finca cuenta y es abastecida de energía eléctrica vía una micro hidroeléctrica de 84 kWe, la cual no opera con su factor de planta máximo.

La meta principal de este estudio consiste en aprovechar los residuos obtenidos en el procesamiento del café, para producir gas de síntesis con ayuda de un gasificador, este combustible será usado en una planta de cogeneración, así mismo se buscará encontrar y analizar la mejor forma de evaluar e integrar la generación eléctrica de la planta de cogeneración con la generación eléctrica de la micro central hidroeléctrica existente en la finca de acuerdo a los esquemas de comercialización de energía que ofrece el nuevo mercado eléctrico mexicano para las energías limpias.

Cabe recordar que la finca por sí misma hace un uso eficiente de la energía y preserva el recurso energético al generar su energía eléctrica vía una micro central hidroeléctrica y utilizar residuos del proceso del café (cascabillo) para incinerarlos y calentar el aire, en una caldera tubos de humo, para el secado de café. *De esta forma el proyecto de cogeneración propuesto afronta un doble reto, es decir hacer que la cogeneración tenga cabida en el proceso de la finca y que resulte atractiva y viable al competir con un sistema energético ya en operación que es sustentable y con uso de energía renovable.*

Sin duda, si el proceso en esta finca fuese convencional, es decir, si la finca comprara la energía eléctrica en la red y usara un combustible convencional para

calentar el aire en el secado de café, la propuesta de cogeneración tendría muchas más ventajas, más posibilidades y niveles de rentabilidad al ofrecer más ahorros e ingresos económicos, de aquí el doble reto e interés académico y comercial de la propuesta para estudiar el tipo y nivel de viabilidad que se pueda lograr con el proyecto para usar otra tecnología y hacer un uso más eficiente de la biomasa que genera la finca y de los residuos forestales dentro de la finca y sus alrededores.

La implementación del sistema de cogeneración en base a gasificación tiene como objetivo no solo aprovechar los residuos de otra forma diferente a la incineración, sino también evaluando los máximos beneficios económicos mediante esquemas de comercialización de la energía eléctrica excedente, los CELs, y las emisiones evitadas.

¿Por qué es importante el tema?

Se debe crear conciencia en minimizar las emisiones contaminantes y buscar alternativas más limpias para la generación de energía. Pero al mismo tiempo buscar las tecnologías más rentables. Esto con el fin de beneficiar a una finca en particular y a la sociedad en general, porque el estudio es replicable en todas las demás fincas cafetaleras del país.

¿Qué problema va a resolver?

En los países productores de café, los residuos y sub-productos del café constituyen una fuente de grave contaminación y problemas ambientales. Por ese motivo, desde mediados del siglo pasado se ha tratado de inventar métodos para utilizarlos como materia prima para la producción de bebidas, vinagre, biogás, gas de síntesis, cafeína, pectina, enzimas pécticos, proteína, y abono. Para este trabajo se busca producir gas de síntesis con los residuos de la producción de café, y la mejor manera de usar el este combustible, es haciendo funcionar un motor para generar electricidad, y todo el calor residual de grado más bajo, proveniente de la refrigeración y el escape, puede todavía usarse para secar café y algún otro proceso [2].

De acuerdo a las necesidades de control de estos residuos y al abastecimiento de electricidad y energía térmica que requiere este sector, es como la cogeneración y el aprovechamiento de la biomasa pueden ayudar a que la finca tenga mejores manejos de su producción y costos. Por otra parte, como beneficio adicional, también se busca ayudar a la problemática del cambio climático.

Se busca abastecer de energía eléctrica y térmica a una finca chiapaneca de una manera más eficiente y sustentable, también suministrar energía eléctrica a la red nacional, aprovechando los recursos energéticos generados dentro de la finca, es decir, hacer un uso más sustentable de los recursos vía las energías renovables y la eficiencia energética de lo que ya lo hace la finca.

Porque al generar energía térmica y eléctrica de manera eficiente y lo más limpia posible, con una planta de cogeneración con un gasificador, además se fomenta el cuidado del medio ambiente, obteniendo un beneficio social, económico y ambiental.

Metodología

Primero se busca obtener los antecedentes relacionados con las energías renovables (enfaticando en la biomasa), la cogeneración y su marco legal. Es necesario también obtener un panorama relacionado con el procesamiento de café, así como el consumo energético y tipo de infraestructura utilizado en sus procesos.

Posteriormente se realizará un análisis para adquirir un panorama sobre la producción de café en México, así como la estacionalidad de producción de café. La zona de la región propuesta es la siguiente etapa para poder enfocarse en una finca en específico. Una vez se tenga la finca de estudio, entonces se obtendrán y analizarán los procesos para la producción de café, el tipo de infraestructura industrial utilizada, la producción de residuos y los requerimientos energéticos de esta finca en específico. Con esta información se propone una solución a la problemática y los resultados esperados.

Una vez que se han caracterizado los requerimientos energéticos del procesamiento del café y la cantidad de residuos que se pueden utilizar como biomasa, de la finca de estudio, entonces se va a diseñar y modelar un sistema de cogeneración con un gasificador, utilizando un software especializado. Posteriormente se pretende describir dicho sistema propuesto para esta finca.

Por último, se realizará una evaluación económica para saber qué tan factible es la propuesta.

Estructura de la tesis

La estructura de la tesis consiste de 4 capítulos y la conclusión general, los cuales se describen a continuación:

Capítulo 1. Antecedentes. En este capítulo se presenta una investigación resumida sobre energías renovables (principalmente energía de la biomasa), cogeneración y su marco legal, así como también del aprovechamiento de biomasa en la producción de café. Además, se incluye una descripción acerca del cultivo y procesamiento de café. También se presenta un apartado donde se mencionan los requerimientos energéticos y el tipo de maquinaria utilizada en la producción de café.

Capítulo 2. Caracterización de los requerimientos energéticos en el procesamiento de café del caso de estudio. La segunda parte de la tesis consiste en dar un panorama de la producción y la estacionalidad de café en México, también se presenta la finca en la que se aplicara este proyecto (Finca Nuevo México). En este capítulo, después de haber visitado la Finca Nuevo México y realizar un levantamiento, se presentan los procesos para la producción del café, la infraestructura industrial, la cantidad de los residuos y los requerimientos energéticos de la finca en estudio.

Capítulo 3. Propuesta del sistema de cogeneración con gasificación. En este capítulo, se presenta una reseña sobre las tecnologías de aprovechamiento de residuos orgánicos y de generación de energía eléctrica y térmica. También se presenta la propuesta y el diseño, con ayuda de un software especializado, del modelo de simulación del sistema de cogeneración con gasificación, para abastecer de energía eléctrica y térmica a la finca de estudio, aprovechando los residuos obtenidos por el procesado de café. Este modelo tiene cuatro configuraciones, que dependen, entre otros factores, de la cosecha de café. Debido a que a lo largo del año existen temporadas con una escasa y nula cantidad de cosecha, se propone utilizar como biomasa residuos forestales, de este modo se cuenta con las cuatro configuraciones del sistema de cogeneración con gasificación para tres temporadas a lo largo del año.

Capítulo 4. Evaluación económica y financiera. En este capítulo, se realiza un análisis económico y financiero para determinar si la puesta en marcha de este proyecto es factible. Para este análisis se toman los parámetros de operación obtenidos de las simulaciones, así como supuestos técnicos, económicos y financieros, tales como; costos de inversión, costos de operación y mantenimiento, ingresos como la venta del excedente de energía eléctrica y los CELs, entre otros. Obteniendo así los principales indicadores de evaluación de proyectos.

Conclusión general. Con base en las simulaciones obtenidas y los resultados económicos y financieros, se cuenta con las herramientas necesarias para determinar la factibilidad del proyecto. De este modo, se presentan los factores que muestran los factores y sus valores para que el proyecto sea atractivo a la inversión e implementación; en adición a ello, se presentan las ventajas medioambientales que se obtienen con la operación del proyecto.

Capítulo 1. Antecedentes

Introducción

El cambio climático es un grave problema en la actualidad y para las generaciones futuras, y las energías renovables son fuentes de energía limpias, inagotables y progresivamente competitivas, que se pueden utilizar para atacar este problema. De este modo, se busca aprovechar y promover las energías renovables con este estudio, específicamente de la energía de la biomasa con la implementación de un gasificador. El gas de síntesis producido por un gasificador puede emplearse como combustible en un motor o una turbina de gas, para generar energía eléctrica y térmica, teniendo así un sistema de cogeneración. Este sistema puede aplicarse en diversos sectores industriales, tales como la agroindustria, y en este caso en particular en la cafetalera, donde se genera biomasa y se requiere de energía eléctrica y térmica para los procesos de producción de café.

La manera en la que está estructurado este capítulo inicia con un panorama general de energías renovables, enfatizando en la biomasa, posteriormente se presenta un resumen referente a sistemas y tecnologías de aprovechamiento de biomasa (acentuando en gasificadores). Más adelante se presenta una investigación sobre cogeneración y sus aplicaciones. Siguiendo con un análisis sobre el cultivo y procesamiento de café, así como los principales tipos de infraestructura industrial, energía requerida y el aprovechamiento de residuos en una finca cafetalera. Por último, se presenta el marco legal que comprende a los sistemas de cogeneración y energías renovables. Al desarrollar estos temas se espera obtener como resultado el panorama necesario para abordar los siguientes capítulos y adquirir los fundamentos para la implementación del sistema propuesto en este estudio.

1.1. Problemática

Los residuos a causa de la producción de café provocan un foco muy grande de contaminación y daños al medio ambiente. En este trabajo se busca producir syngas con un gasificador, utilizando residuos en la producción de café, y posteriormente utilizar este combustible para hacer funcionar un motor de combustión interna en un sistema de cogeneración y suministrar energía eléctrica y térmica a una finca en específico [3]. Tomando en consideración las necesidades de control de estos residuos y el consumo de energía eléctrica y energía térmica que requiere este sector, es como la cogeneración y el aprovechamiento de la biomasa pueden ayudar a que la finca obtenga estos requerimientos energéticos teniendo mejores manejos sustentables de producción y reducción de costos. Por otra parte, como beneficio adicional, también se busca ayudar a la problemática del cambio climático.

1.2. Energías renovables

Las energías renovables se producen de forma continua y son inagotables a escala humana; se renuevan continuamente, en comparación de los combustibles fósiles, de los que existen unas determinadas cantidades, agotables en un plazo más o menos determinado. Las principales formas de energías renovables son: la biomasa, hidráulica, eólica, solar, geotérmica y las energías marinas. Las energías renovables son producto, de forma directa o indirecta, de la energía del Sol; sin considerar la energía geotérmica y la de las mareas [4].

Las fuentes de energía renovables provienen de tres eventos conocidos que ocurren en nuestro sistema Solar. Las energías renovables son producto de la energía del Sol (tal como se mencionó anteriormente), del interior de la Tierra (energía geotérmica), y de la atracción gravitacional entre los planetas (energía de las mareas). La Figura 1 muestra el origen y utilización de las distintas fuentes renovables de energía [2].

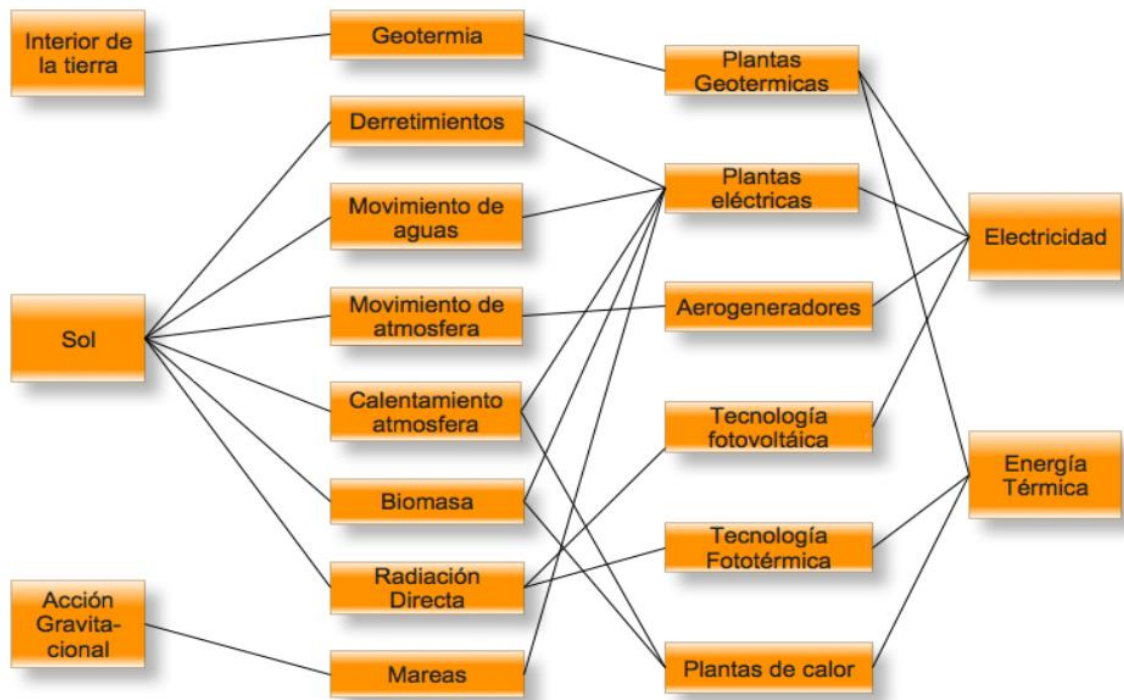


Figura 1. Origen y uso de las fuentes de energías renovables.

Fuente: Extraída de [2].

Según los estudios realizados por [5], la Situación Global de las Energías Renovables del último informe de REN21 (Red de políticas de energía renovable para el siglo XXI) se añadieron 178 GW de energía renovable a nivel mundial en el año 2017.

Para ese año, la nueva capacidad solar fotovoltaica (también llamada PVs) alcanzó niveles récord: se sumaron sistemas PV Solar del 29% con respecto a 2016, llegando a 98 GW. Se añadió al sistema de electricidad más capacidad de generación de energía solar fotovoltaica que las adiciones de capacidad neta de carbón, gas natural y la energía nuclear combinado. La energía eólica también aumento la captación de las energías renovables con 52 GW añadido a nivel mundial. En la Figura 2 se presenta la capacidad global de energías renovables desde 2007 a 2017 [5].

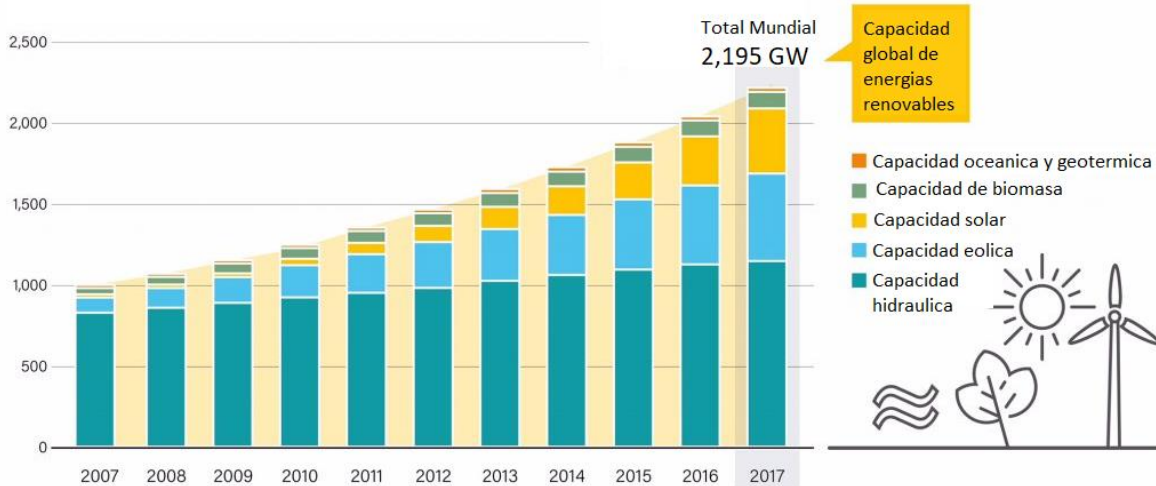


Figura 2. Capacidad global de energías renovables de 2007 a 2017

Fuente: Extraído de [5].

La nueva capacidad de energía renovable aumento su inversión en más del doble que la de la red con combustible fósil y de capacidad de energía nuclear combinado, y considerando los subsidios grandes y permanentes para la generación de combustibles fósiles. Más de dos tercios de las inversiones en generación de energía estaban constituidas por las energías renovables en 2017, gracias a su ascendente competitividad de costos, además se espera que la proporción de energías renovables en el sector eléctrico siga creciendo [5].

La transición a las energías renovables está en marcha, pero progresa más lentamente de lo posible o deseable. Un compromiso mencionado en el marco del acuerdo, sobre el clima, de París 2015 para limitar el aumento de la temperatura mundial por debajo de 2 grados centígrados por encima de los niveles preindustriales, hace que la naturaleza del desafío sea mucho más clara [5]. De este modo se busca salvaguardar el planeta.

Con relación a México, los objetivos establecidos por el gobierno en materia de energías limpias y su grado de cumplimiento, la energía generada en el país proveniente de fuentes limpias debe ser el 35% para 2024 y el 50% para 2050. Al término del primer semestre de 2017, México generó más del 20% de su energía

eléctrica con fuentes limpias, de las cuales cerca del 16% correspondía a fuentes renovables. Junto con los mecanismos de la Reforma Energética para impulsar las energías renovables, estos ambiciosos objetivos hacen pensar que el portafolio de proyectos de generación de energías renovables aumentará considerablemente en los próximos años [6]. Existen algunas maneras para que el gobierno apoye estos proyectos entre los que destacan; las subastas de electricidad de largo y medio plazos, así como el mercado de Certificados de Energías Limpias (CELs). Los CELs estarán basados en la obligación de grandes consumidores de tener un nivel mínimo de consumo procedente de energías limpias, desde el 5%, en 2018, hasta el 13.9% en 2022 [6].

1.2.1. Energía Solar Térmica

La energía solar térmica se puede utilizar principalmente para calentar fluidos, generalmente agua. Los distintos sistemas se clasifican de la siguiente forma (dependiendo de la temperatura final) [7]:

1. Baja Temperatura: Son los sistemas más utilizados para uso doméstico debido a que la temperatura del agua no rebasa los 90°C, un ejemplo es el agua caliente sanitaria (ACS) para viviendas, deportivos, calentamiento de agua de piscinas, etc.
2. Media Temperatura: Son sistemas que se encuentran en un rango de temperatura de 80°C a 250°C, por ejemplo, en aplicaciones para procesos industriales.
3. Alta temperatura: Son sistemas para aplicaciones que requieren una temperatura superior a los 250°C, un ejemplo es la generación de vapor para producir energía eléctrica.

Existen empresas importantes en México que fabrican equipos de energía solar térmica de baja temperatura. Desde 1940 iniciaron las primeras empresas en Guadalajara, varias empresas tienen reconocimiento internacional y algunas se han desarrollado a lo largo de los años [7].

Para que los colectores solares que se usan para agua caliente a baja temperatura duren por lo menos 10 o 15 años y sean redituables, requieren de un buen fabricante, diseño e instalación [7].

1.2.2. Energía solar Fotovoltaica

La energía solar eléctrica también llamada energía fotovoltaica, que es como comúnmente se le conoce, es una energía limpia y renovable, de fácil instalación y

mantenimiento. Los sistemas fotovoltaicos, están basados en las propiedades de los materiales semiconductores que transforman la energía que irradia el sol en energía eléctrica, sin la utilización de reacciones químicas, ciclos termodinámicos, o procesos mecánicos que requieran partes móviles [7].

La celda fotovoltaica es un elemento semiconductor en donde se realiza el proceso de transformación de energía solar en energía eléctrica. Los fotones de la luz solar transmiten su energía a los electrones del semiconductor, cuando la luz del sol incide sobre una celda fotovoltaica, para que así puedan circular dentro del sólido. La tecnología fotovoltaica consigue que parte de estos electrones salgan del material semiconductor generándose así una corriente eléctrica capaz de circular por un circuito externo [7].

Para el aprovechamiento de la energía solar generada existen dos maneras [7].

- En instalaciones aisladas de la red eléctrica: se almacena la energía generada en baterías para así disponer de su uso cuando sea necesario.
- En instalaciones conectadas a la red eléctrica convencional: toda la energía generada se transmite a la red eléctrica convencional para su distribución donde sea demandada.

Se estima que en un futuro la energía fotovoltaica llegará a ser más económica que la energía convencional, pero en México ya se debería tener avances y para esto hay que contribuir al cambio, ya que cuando se llegue a esta situación, nuestro país se encontrará como con el petróleo, donde no se tiene la tecnología suficiente para generar nuestro propio combustible y por lo tanto se debe comprar en el extranjero a tarifas más elevadas, continuando así con la dependencia energética. Por lo anterior, es necesario generar las políticas energéticas a nivel nacional y las leyes que nos conduzcan y obliguen como nación a ir en esa meta. No sólo que orienten, sino que fomenten el uso y producción de las fuentes de energía renovables, en beneficio de la economía del país, pero sobre todo para el cuidado del medio ambiente y en beneficio de las generaciones futuras [7].

1.2.3. Energía Eólica

Una forma de energía solar es el viento, esto es a causa del calentamiento disparado de la superficie terrestre, aquellas regiones ubicadas cerca del ecuador recibirán más energía solar que aquellas que se encuentren en los polos. Por lo tanto, el gradiente de temperaturas ocasiona que las masas de aire se muevan de regiones calientes a regiones frías. Las fuerzas que actúan sobre la superficie terrestre dan lugar a parámetros del viento como son la velocidad, la dirección y frecuencia. Los cambios de temperatura están relacionados con dichas fuerzas, así como también la fuerza que ejerce la gravedad de la tierra, las fuerzas generadas por efectos topográficos como la fricción y la fuerza de Coriolis debido a la rotación de la tierra.

La forma del perfil vertical del viento está determinada por el tipo de terreno sobre el cual el viento pasa. La topografía también influye en la variación de la velocidad con respecto a la altitud, por ejemplo, a mayor altura los efectos de la superficie no se notan, pero cerca del suelo la fricción influye más sobre el perfil del viento [8].

Un aerogenerador es aquel dispositivo que transforma la velocidad del viento en electricidad. Para el funcionamiento adecuado de un aerogenerador se deben considerar todos los puntos mencionados anteriormente. El aumento en la demanda de energías renovables ha provocado que se estudien más los posibles lugares con potencial eólico en nuestro país. Hoy en día el lugar con mayor potencial eólico en nuestro país es el estado de Oaxaca, con un potencial mucho mayor a cualquier otra región en la República Mexicana. Aunque también existen otros lugares como la Península de Yucatán, que tienen un potencial considerablemente elevado [8].

1.2.4. Hidroeléctrica

La hidroelectricidad es una de las fuentes de energía renovable más atractivas, debido a que es una energía con grandes beneficios para el mundo en la actualidad. Las Naciones Unidas definen a una fuente de energía renovable como aquella que se puede reponer en un corto período de tiempo. En consecuencia, la Hidroelectricidad cae dentro de este concepto debido a que aprovecha la energía del agua corriente de los ríos para producir electricidad y la devuelve a su cauce original [9].

Los inicios en el aprovechamiento de la hidroelectricidad fueron con pequeñas centrales, y su desarrollo desde la mitad del siglo pasado se enfocó a la puesta en operación de grandes centrales. En este contexto, México no fue la excepción, y en los últimos 30 años anteriores a 1998 se habían construido 11 centrales de entre 33 y 750 MW de capacidad efectiva y una más que es el Proyecto Hidroeléctrico La Yesca, contra una sola central menor a los 30 MW de capacidad efectiva (Central Hidroeléctrica Colina con 3 MW) [9].

Con la creciente problemática del encarecimiento de las fuentes petrolíferas, desde los años setenta del siglo pasado, los productores miran a los pequeños proyectos hidroeléctricos como una alternativa para afrontar este problema y cubrir la demanda creciente de las poblaciones más alejadas de las grandes ciudades. Por otra parte, los efectos del cambio climático a nivel global se hacen cada vez más evidentes, señalando a los gases de efecto invernadero como el principal problema del aceleramiento de este proceso, dichos gases son producidos por las actividades humanas al consumir grandes cantidades de hidrocarburos, por lo que las pequeñas centrales hidroeléctricas, las cuales son energías renovables, se presentan como una opción para enfrentar estos dos graves problemas, y con ello también, contribuir a la diversificación de generación de energía en México [9].

1.2.5. Energía Mareomotriz

La energía mareomotriz ha sido utilizada por siglos por el ser humano. En la antigüedad, en algunos lugares de Europa, se utilizaban los molinos de mareas para aprovechar este recurso para moler el trigo y hacer harina. Dichos molinos eran bastante sofisticados, muchas veces incluían una pequeña represa, y hasta la casa del molinero a cargo. A pesar de esto fue en el año 1967 que se construyó la primera central mareomotriz utilizable para abastecer a un sistema interconectado, esta central es La Rance, en la región francesa de Bretaña [10].

Existen principalmente dos formas de producir energía con las mareas en la actualidad. La primera de ellas consiste en embalsar un fiordo, en el cual el movimiento de las mareas provoca una diferencia de altura, y así genera energía potencial, además este sistema funciona igual que una central hidroeléctrica de embalse. La segunda forma de producción es aprovechar la energía cinética de las mareas, es decir, aprovechar las corrientes marinas, esta forma de producción se hace mediante una hélice que funcione para flujos en ambas direcciones [10].

1.2.6. Energía Geotérmica

Los sistemas geotérmicos se pueden definir como agua convectiva en la corteza superior de la tierra la cual, en un espacio confinado, transfiere energía térmica desde una fuente de calor hasta una abertura de calor, usualmente la superficie libre. Un sistema geotérmico está constituido por tres elementos principales que son: una fuente de calor, un reservorio y un fluido, este último es el medio que transfiere la energía térmica. Las fuentes de calor pueden ser de gradientes de alta temperatura (con temperaturas mayor a 600°C) y con profundidades superficiales, hasta temperaturas relativamente bajas. El reservorio es un volumen de rocas calientes permeables mediante el cual el fluido que lo circunda extrae la energía térmica. Frecuentemente el reservorio se encuentra rodeado de una capa impermeable y está conectado a un área de recarga superficial a través de la cual el agua puede reemplazar los fluidos que se escapan del reservorio. El agua mencionada generalmente contiene sustancias químicas disueltas y gases tales como CO₂, H₂S, etc. El desarrollo de los proyectos destinados a la energía geotérmica se puede dividir en las cuatro fases siguientes: [11]

- 1) Exploración
- 2) Exploración profunda (perforaciones)
- 3) Implementación de la planta
- 4) Monitoreo tanto de las reservas como de la operación de la planta

Para establecer las características termodinámicas y la medida de la productividad del pozo en términos del flujo de masa y de la entalpía se debe considerar como está compuesto el pozo por dentro. Esto permite que los ingenieros calculen el tamaño del pozo, cuanta es su reserva y que capacidad tiene de mantener la producción durante la vida útil del proyecto. Los resultados obtenidos de esta exploración profunda y las características del fluido geotérmico determinan el tipo de planta a escoger, estos dos tipos de planta son: para generación eléctrica cuando se produce fluido de alta entalpía o para calentamiento cuando se produce fluido con alta y baja entalpía [11].

Conocer el tamaño del recurso presente es indispensable para determinar el plan de perforación a ejecutar, a la vez que el diseño de la planta, las tuberías y el sistema de reinyección de agua. Las reservas geotérmicas son más dinámicas que las reservas de hidrocarburos; por consiguiente, se desarrolla un continuo monitoreo y evaluación del comportamiento del recurso tanto en la exploración como en la implementación con el fin de asegurar que el recurso es adecuado para entregar la energía que se le demandará [11].

1.2.7. Biomasa

Cualquier materia orgánica de origen reciente que se haya derivado de animales y vegetales como resultado del proceso de conversión fotosintético se le denomina biomasa. La energía contenida en la biomasa se deriva del material vegetal y animal, madera de bosques, residuos de procesos agrícolas, forestales, de la basura humana y de animales [12].

La cantidad de energía almacenada en la biomasa de materia vegetal proviene originalmente de la energía solar a través del proceso de la fotosíntesis. En los procesos de conversión como la combustión, la biomasa libera su energía almacenada en forma de calor, y el carbón se oxida nuevamente a dióxido de carbono para restituir al que fue absorbido durante el crecimiento de la planta [12].

La biomasa se puede clasificar en tres grandes grupos que son [13]:

- 1) Natural: generada en la naturaleza sin la intervención del ser humano.
- 2) Residual: compuesta por residuos sólidos (biomasa seca) o vertidos biodegradables (biomasa húmeda).
- 3) Producida: constituida por los llamados cultivos energéticos, realizados con la única finalidad de producir biomasa transformable en combustible.

En esencia, el uso de la biomasa para generar energía es la función inversa de la fotosíntesis, este proceso de captación de la energía solar y su acumulación en las plantas y árboles como energía química es un proceso conocido. Por otro lado, los carbohidratos, entre los que se encuentra la celulosa, constituyen los productos

químicos primarios en el proceso de bioconversión de la energía solar y al formarse, cada átomo gramo de carbono (14 g) absorbe 112 kcal de energía del sol, la cual es precisamente la que después se recupera, en parte con la combustión de la celulosa o de los combustibles obtenidos a partir de ella (tales como gas, alcohol, etc.) [12].

En la naturaleza se puede observar que, en última instancia, toda la biomasa se descompone en sus moléculas elementales acompañada por la liberación de energía térmica. En consecuencia, la liberación de energía en la conversión de la biomasa en energía útil imita procesos naturales, pero en una tasa más rápida. De este modo se puede considerar que la energía obtenida de la biomasa es una forma de energía renovable. Además, al utilizar esta energía se recicla el carbón y no se añade dióxido de carbono al medio ambiente, en comparación con los combustibles fósiles [12].

La biomasa se diferencia de todas las demás fuentes renovables de energía debido a que almacena energía solar de manera eficiente. Además, es la única fuente renovable de carbón que es procesada convenientemente para generar combustibles sólidos, líquidos y gaseosos [12].

Algunas de las desventajas de la biomasa es que tiene una densidad a granel baja, es decir, que se necesitan grandes volúmenes de materia para obtener la misma cantidad de energía que la extracción de los combustibles fósiles no renovables, esto provoca que su transporte y su administración sean difíciles y costosos, adquiriendo así limitaciones en comparación de combustibles fósiles. Otra desventaja relevante es la inversión inicial que, en una planta con el uso de biomasa, llega a ser muy elevada. Está demostrado que en países que tienen abundantes bosques (como India) los digestores para granjas pequeñas no llegan a tener éxito debido a que los granjeros no tienen dinero suficiente para cubrir la inversión inicial del equipo [12].

En el apartado 1.3 se enfatiza sobre la energía de la biomasa, en particular de los sistemas y tecnologías de aprovechamiento de biomasa, ya que éste es uno de los temas centrales de este estudio.

1.3. Sistemas y tecnologías de aprovechamiento de biomasa

La biomasa puede aprovecharse para generar energía térmica, eléctrica y mecánica. Para obtener alguna de estas energías se utilizan diversos métodos, que a grandes rasgos pueden dividirse en dos grupos: en termoquímicos y bioquímicos. Entre los primeros destacan la combustión y la gasificación y entre los bioquímicos destaca la digestión anaeróbica, esto debido a su amplio uso comercial.

La utilización de un método u otro depende de: las características del combustible, de la demanda y de la naturaleza de su aplicación [13].

1.3.1. Sistemas de aprovechamiento de biomasa

Sistemas basados en la combustión

Este sistema tiene como objetivo quemar la biomasa a temperaturas elevadas (temperaturas entre 600 y 1,300°C) y en presencia de grandes cantidades de aire. Para llevar a cabo la combustión de la biomasa, se pueden usar diferentes tecnologías, tales como las calderas de parrilla, las cámaras torsionales o los combustores en lecho fluido, con rendimientos de hasta un 95% [13].

Sistemas basados en la gasificación

En equipos basados en gasificación el recurso se descompone térmicamente y, gracias a la acción del calor, se produce un gas combustible, cuyas aplicaciones son similares al gas natural y demás combustibles gaseosos convencionales. La gasificación se lleva a cabo a través de tecnologías como: el gasificador de corrientes paralelas, el gasificador en contracorriente o el de lecho fluido. La ventaja de estos equipos recae en los casos extremos, debido a que, a potencias reducidas o muy elevadas, el rendimiento es mayor que en los sistemas de combustión. En este estudio se propone la implementación de este tipo de sistemas [13].

Digestión anaeróbica

En el proceso de la digestión anaeróbica se consigue la degradación de la materia orgánica (biomasa) en ausencia de oxígeno, gracias a la actividad de microorganismos específicos, que la transforman en un gas de alto contenido energético (biogás) y en otros productos que ocasionalmente son denominados “fangos”, y que contienen componentes minerales y compuestos de difícil degradación. El biogás, el cual está compuesto principalmente por metano y anhídrido carbónico, puede utilizarse para producir energía eléctrica o térmica, o generar ambas energías mediante los sistemas de cogeneración, dichos sistemas son muy eficientes en comparación de los sistemas convencionales. Para producir el biogás, existen diferentes tecnologías. La implantación de una u otra dependerá, entre otros factores, de las características de la biomasa que va a ser tratado [13].

Producción de biocarburantes

La generación de biocarburantes merece un tratamiento exclusivo por su importancia. Su producción depende del tipo de motor al que se va a destinar. De ese modo para vehículos con motor diésel, se obtienen de cultivos o especies vegetales oleaginosas como el girasol o la colza, mientras que para motores de encendido provocado provienen de cultivos de vegetales ricos en azúcares, como

la remolacha o el trigo, entre otros. Una ventaja es la tecnología, ya que el desarrollo es muy completo y no existen impedimentos para su producción, por otro lado, se tiene como única desventaja el coste de obtención, superior al de los carburantes derivados del petróleo [13].

Algunos de los principales métodos son los mencionados anteriormente, y el desarrollo en la mejora de estas tecnologías va en constante aumento, pues como ha podido verse la utilización de biomasa es una alternativa eficiente y rentable, que además permite aprovechar recursos que de otra forma no serían más que residuos, los cuales representan contaminación para el medio ambiente [13].

1.3.2. Tecnologías de aprovechamiento de biomasa

Los biocombustibles son los productos intermedios que se obtienen en las cadenas energéticas de la biomasa y que se obtienen de las materias primas que componen la biomasa (para este trabajo son los residuos en el procesamiento de café) mediante su tratamiento por procesos físicos y/o químicos y/o biológicos. Respecto a los biocombustibles sólidos y gaseosos, éstos se utilizan generalmente para la generación de calor y electricidad, mientras que los biocombustibles liquidados usualmente tienen aplicaciones en el sector transporte [14]. En este apartado se presentan tres opciones para poder aprovechar los residuos orgánicos generados por la producción de café en la Finca Nuevo México, que son: incineración directa, biodigestor y gasificador. En el capítulo 3 se seleccionará la mejor tecnología para este estudio, mencionando sus ventajas.

La biomasa tal y como se obtiene en sus lugares de producción, generalmente no cuenta con las características adecuadas de tamaño, humedad, forma, etc., que son requeridas por la tecnología de conversión. Para resolver este problema se suelen utilizar procesos previos para acondicionar la biomasa. Los principales procesos físicos que afectan la conversión energética de la biomasa están relacionados con la preparación de biocombustibles sólidos, para procesos termoquímicos tales como la combustión o incineración [14].

Combustión directa

La combustión es un proceso que consiste en oxidar hasta dióxido de carbono (CO_2) y agua a la biomasa directamente o sus biocombustibles derivados. El proceso se realiza a altas temperaturas, donde se utiliza aire como agente oxidante e involucra una etapa instantánea inicial de pirólisis y otra gasificación de la biomasa previas a la de combustión [14].

Para el aprovechamiento industrial de la combustión directa ha sido necesario recurrir a instalaciones basadas en la generación de vapor a alta temperatura y presión, para producción de energía térmica y eléctrica. Estas tecnologías se distinguen en general, de menor a mayor eficiencia, a continuación [15]:

- Caldera de lecho fijo o parrilla: El combustible (en este caso la biomasa), anteriormente reducida granulométricamente en centímetros, se introduce sobre unas placas vibrantes o parrillas inclinadas, en las que se quema la biomasa mientras se desplaza hacia un colector de cenizas en el extremo opuesto a la inyección [15].
- Caldera de lecho fluido: El combustible se reduce granulométrica (en milímetros típicamente) y se mantiene en suspensión junto con partículas de arena (lecho). Algunas veces se añade al lecho un ciclón y el flujo es circulante, solo las partículas de ceniza son arrastradas por el aire usado en la combustión [15].
- Calderas de combustible pulverizado o lecho arrastrado: El combustible es reducido granulométricamente a tamaños menores a un milímetro, y es introducido en la caldera a través de quemadores junto al aire de combustión. Las partículas son quemadas a lo largo de la caldera, y salen junto con los gases hacia las etapas de filtrado y limpieza [15].

Biodigestor

El biodigestor es un tanque cerrado con un determinado tamaño, material y forma (puede ser cilíndrica, rectangular, esférica o semiesférica) dependiendo de los requerimientos del usuario y de las facilidades que se tengan para su construcción, en el cual se almacena basura orgánica mezclada con agua que al descomponerse en ausencia de aire generan biogás. Definido por el diseño de la planta en función de las variables del proceso, ambientales y de utilización del sistema [16].

El biogás es una mezcla gaseosa producida por la descomposición de la materia orgánica en condiciones anaeróbicas. Su composición típica en una alta proporción corresponde al metano (CH_4), un gas combustible que permite la utilización de este producto con fines energéticos [16].

Los elementos que componen un biodigestor son [17]:

1. Tanque de digestión: Este define la denominación del biodigestor. Está compuesto por una cámara de fermentación y una cúpula. En la cámara de fermentación anaeróbica el material a descomponer permanece un tiempo determinado, llamado tiempo de retención, en el cual ocurre la degradación y liberación del biogás. Su geometría es cilíndrica y su capacidad está dada por el volumen de material a degradar. Respecto a la cúpula su función es almacenar el gas en los momentos que no existe consumo, debido a que la producción de

gas es ininterrumpida a lo largo de todo el día. La capacidad de almacenaje de la cúpula depende del volumen de la cámara de fermentación.

2. Laguna de compensación: En ella se acumula el material ya fermentado (digerido), donde puede recogerse. La capacidad de la laguna depende del volumen del biodigestor y puede tener diferentes formas (cuadrada, circular, rectangular) y construirse encima de la cúpula o al lado del tanque de fermentación.
3. Registro de carga: Puede tener variadas formas y su tamaño está en función del diseño del digestor. En este se introduce el material a fermentar, mezclándose con agua en las proporciones adecuadas y homogeneizándose.
4. Conducto de carga: Comunica al registro de carga con el tanque de fermentación.

Las plantas de biogás se pueden clasificar en tres tipos:

- Plantas de globo: Este tipo de plantas tiene en la parte superior un digestor de bolsa en el cual se almacena el gas, la entrada y la salida se encuentran en la misma superficie de la bolsa. Sus ventajas son bajo costo, fácil transportación, poca sofisticación de construcción, altas temperaturas de digestión, fácil limpieza, mantenimiento y vaciado [15].
- Plantas de domo fijo: Las plantas de domo fijo consisten en un recipiente fijo e inmóvil para gas, que se coloca en la parte superior del digestor. Cuando comienza la producción de gas, la mezcla se desplaza hacia el tanque de compensación. La presión del gas aumenta, el aumento de volumen del gas almacenado y con la diferencia de altura entre el nivel de la mezcla en el digestor y el nivel de la mezcla en el tanque de compensación [15].
- Plantas de tambor flotante (tipo Hindú): Las plantas de tambor flotante consisten en un digestor subterráneo y un recipiente móvil para gas. El recipiente para gas flota, ya sea directamente sobre la mezcla de fermentación o en una chaqueta de agua. El gas se recolecta en el tambor de gas, que se levanta o baja, de acuerdo con la cantidad de gas almacenado [15].

Gasificador

La gasificación es un proceso que consiste en someter un alimento (como la biomasa) a altas temperaturas (800-1800°C) y a alta presión de hasta 100 bares, en presencia de un agente gasificante que normalmente es vapor de agua, oxígeno, aire o una mezcla de estos. El alimento es convertido en un gas crudo, el cual después es enfriado y purificado. Con frecuencia el gas puro es definido como un gas que contiene hidrógeno, monóxido de carbono y metano [18].

Las tres etapas fundamentales en el proceso de gasificación son [19]:

1. Secado/volatilización: En esta etapa el combustible que alimenta al gasificador es sometido a un aumento de temperatura, en el cual ocurre una evaporación física de la humedad contenida en el combustible, de este modo se libera agua a temperaturas de hasta 200°C. Cuanto más se va aumentando la temperatura, más se van desvolatilizando los compuestos de bajo peso molecular.
2. Pirólisis: Esta es la primera etapa en donde se degrada el combustible (que puede ser biomasa o carbón). Cuando se somete a un ambiente en ausencia de oxígeno, la estructura molecular del combustible se descompone generando gases de síntesis, char (residuo sólido carbonoso) y compuestos orgánicos condensables (alquitranes o tarses). Esta etapa es influenciada por el tamaño de partícula del lecho y su naturaleza, y se da a temperaturas de entre 150 a 700°C.
3. Gasificación: Las reacciones endotérmicas y las reacciones exotérmicas se dan en esta etapa, producidas por la combustión del material orgánico, incluyendo las reacciones de oxidación y las reacciones de reducción para producir las mezclas de gases de interés, compuestas principalmente por monóxido de carbono e hidrógeno y se da en temperaturas de 800 a 1100°C.

Para el proceso de gasificación los agentes gasificantes frecuentemente utilizados son las mezclas de vapor y oxígeno o vapor y aire. También se puede usar el hidrógeno a presión, cuando éste es utilizado se conoce como hidrogasificación, en donde el gas obtenido de este proceso posee un alto poder calorífico. Dependiendo de los agentes gasificantes utilizados y la presión a la que se opera, los gases obtenidos poseen diversos usos y diferente poder calorífico [19].

El reactor se clasifica dependiendo del lecho utilizado, en el proceso de gasificación, los más destacados son de lecho fijo, lecho fluidizado y de flujo de arrastre [19].

Gasificador de lecho fijo: Estos se dividen en gasificadores de lecho fijo de flujo ascendente y gasificadores de lecho fijo de flujo descendente o invertido [19].

Gasificadores de lecho fijo de flujo ascendente o de flujo directo ("Updraft"): la alimentación del agente gasificante se encuentra en la parte inferior del equipo y los gases producidos se liberan por la parte de arriba. En la parte inferior del reactor se encuentra la zona de oxidación, en esta zona ocurren las reacciones de combustión y un poco más arriba se encuentra la región donde se realizan las reacciones de reducción. En la parte superior del equipo se encuentra la alimentación del combustible y la región de secado y pirólisis debido a los efectos de transferencia de calor tanto por convección forzada como radiación, los alquitranes y los productos generados a través del proceso son arrastrados por la corriente de gas, mientras que las cenizas son retenidas en la parte inferior del gasificador como se muestra en la Figura 3 [19].

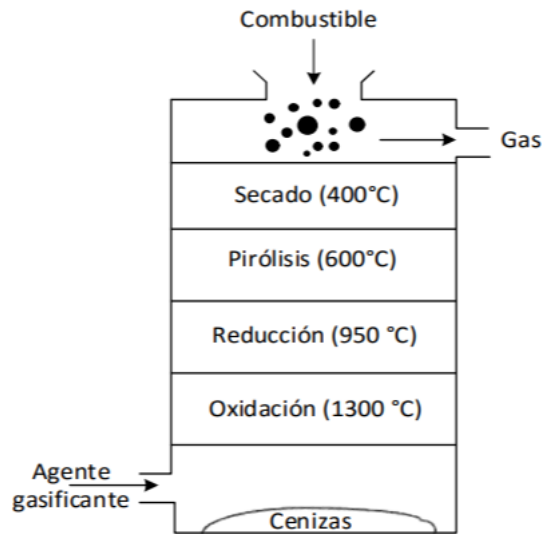


Figura 3. Gasificador de lecho fijo de flujo ascendente

Fuente: Extraído de [19].

Gasificadores de lecho fijo de flujo descendente o invertido (“Downdraft”): para estos reactores el agente gasificante se ingresa sobre la región de oxidación, el gas producido se evacua por la parte inferior del equipo y el combustible es alimentado por la parte superior. Tanto el combustible, como los gases producidos se desplazan en la misma dirección evitando la conducción de alquitrán con la corriente de gas tal como se muestra en la Figura 4. Los alquitranes, así como los productos generados en el proceso pasan a través de la zona donde se encuentra el lecho incandescente de carbón, transformándose en gases permanentes como dióxido de carbono, monóxido de carbono, metano e hidrógeno [19].

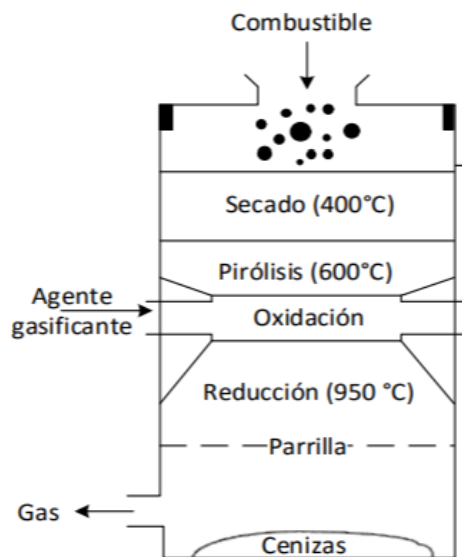


Figura 4. Gasificador de lecho fijo de flujo descendente o invertido.

Fuente: Extraído de [19].

Gasificador de lecho fluidizado: Los más importantes son los de lecho fluidizado burbujeante y lecho fluidizado circulante [19].

Gasificadores de lecho fluidizado burbujeante: en estos gasificadores las partículas sólidas se mantienen mezcladas en suspensión y en una especie de emulsión debido al efecto de fluidización. En éste, se llevan a cabo los diferentes procesos de secado, pirólisis, entre otros, directamente en el lecho, lo cual significa que las partículas son sometidas a estos procesos en cualquier punto del mismo, saliendo finalmente las cenizas por el gas emergente y el resto de cenizas se acumulan en el fondo del lecho, tal como se muestra en la Figura 5. Este tipo de lecho se caracteriza principalmente por la alta velocidad de reacción y excelente mezcla de materia prima, haciendo que los perfiles de temperatura y conversión sean uniformes permitiendo controlar más fácilmente las condiciones de operación del proceso [19].

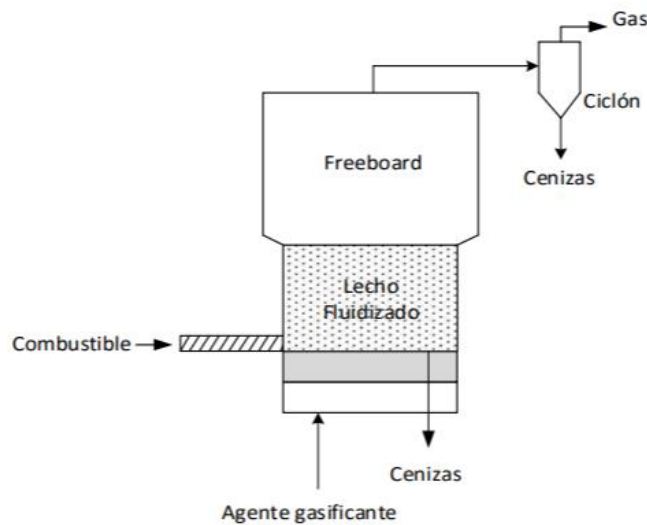


Figura 5. Gasificador de lecho fluidizado burbujeante.

Fuente: Extraído de [19].

Gasificadores de lecho fluidizado circulante: en estos gasificadores el lecho se encuentra en condiciones de fluidización rápida, los sólidos son arrastrados y recirculados, tal como se muestra en la Figura 6. En estas condiciones el contacto de gas-sólido, la uniformidad en la temperatura y conversión es mayor que en otros regímenes de fluidización, como el burbujeante. Además, la tendencia de las partículas para aglomerarse es mucho menor, sin embargo, la complejidad del equipo es más grande, provocando un mayor desgaste debido a las altas velocidades de los sólidos dentro del reactor [19].

Gasificador de flujo de arrastre: en estos gasificadores el sólido finamente pulverizado se introduce en el reactor donde una corriente gaseosa lo arrastra, produciéndose la gasificación casi instantánea, la temperatura en la reacción es alta, evitando de este modo impurezas en el gas. En la Figura 7 se presenta un esquema del gasificador de flujo de arrastre [19].

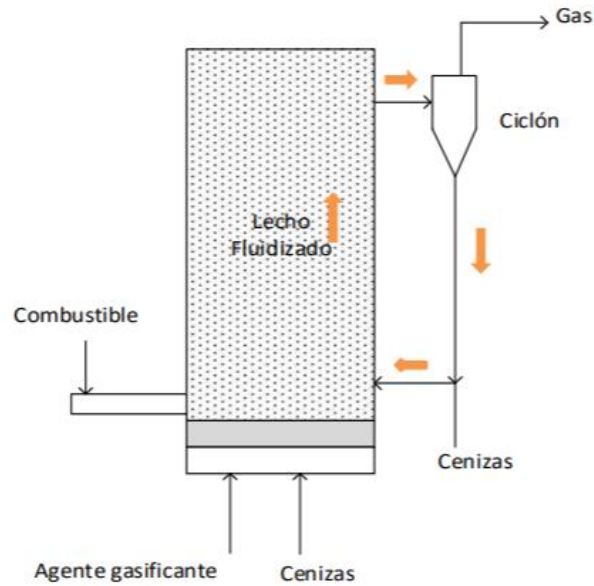


Figura 6. Gasificador de lecho fluidizado circulante.

Fuente: Extraído de [19].

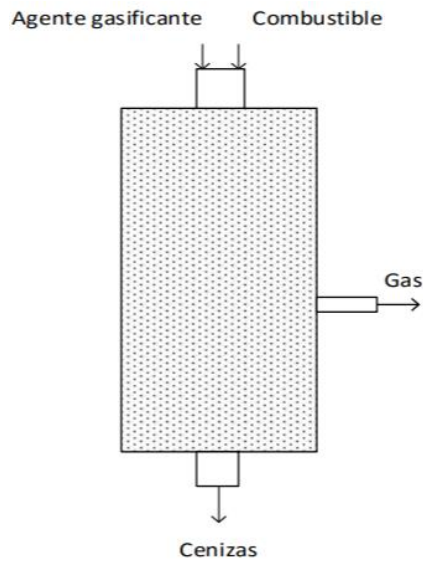


Figura 7. Gasificador de flujo de arrastre.

Fuente: Extraído de [19].

1.4. Cogeneración

Generalmente los usuarios satisfacen sus necesidades energéticas comprando la electricidad y los combustibles a las correspondientes compañías suministradoras, esta manera de abastecer dicha necesidad, que regularmente es cómoda para el usuario, suele conllevar unos costes elevados, y desde el punto de vista de uso

racional de la energía bastante ineficiente. Por su parte, la cogeneración es un sistema alternativo, de alta eficiencia energética, y además permite reducir de forma importante la factura energética de ciertos consumidores, sin alterar su demanda energética [20]. Las mejoras y los avances tecnológicos para la cogeneración se siguen investigando en la actualidad, incluso 132 años después de la puesta en servicio de la primera central de cogeneración, Pearl St Station, de 130 kW, en la isla de Manhattan [21].

La cogeneración puede definirse como la producción simultánea de energía mecánica, la cual es transformada en electricidad, y energía térmica útil. De igual forma, se puede definir a la poligeneración como la producción simultánea y conjunta de tipos adicionales de energía útil, tales como: frío (trigeneración para climatización y agua fría de proceso), aire comprimido, otros tipos de energía mecánica, vapor y/o agua caliente a diferentes temperaturas, por mencionar algunos [20]. En la Figura 8 se muestra un sistema convencional de generación de energía contra un sistema de cogeneración.

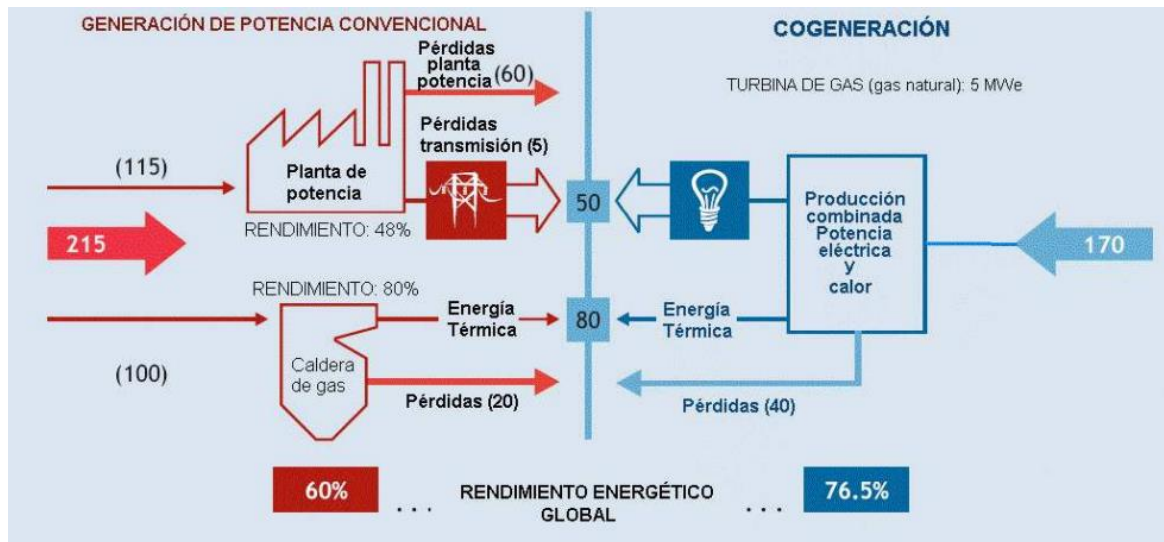


Figura 8. Sistema convencional generación de energía contra un sistema de cogeneración.

Fuente: Extraído de [20].

La producción simultánea se refiere a que puede ser utilizada simultáneamente, es decir, que implica que la planta generadora esté lo más cerca posible del lugar de consumo, de manera contraria se tiene al sistema convencional de producción de electricidad en donde la generación de energía se realiza en centrales termoeléctricas independientes, donde también se desprende calor, pero en esas centrales termoeléctricas no se aprovecha ese calor sino más bien es disipado al ambiente y teniendo así pérdidas energéticas [20].

Las leyes de la termodinámica obligan a la evacuación de una cierta cantidad de calor en todo proceso térmico de producción de electricidad, ya que todo el calor

absorbido no puede transformarse en trabajo. El principal objetivo de la cogeneración es que no se pierda esta gran cantidad de energía. Este aprovechamiento simultáneo de energía eléctrica y térmica, que provoca un rendimiento global más elevado, es lo que la distingue de la autogeneración, en la cual no hay aprovechamiento térmico como efecto útil secundario [20].

Las principales características de la cogeneración son: 1) Se aprovechan varios tipos de energía, y en consecuencia se tiene un potencial de rendimiento mayor que una central convencional. 2) Se produce la energía lo más cerca posible del lugar donde se consume, y en consecuencia se tienen menores pérdidas por transporte, y además se aumenta la autonomía de las fábricas [20]. 3) Es una energía limpia. 4) Fomenta la competitividad y atiende demandas reales. 4) Aumenta la seguridad de suministro y contribuye a reducir la dependencia energética [21].

El usuario que produce su propia energía con un sistema de cogeneración sigue demandando la misma cantidad de energía (calor y electricidad) que en la situación sin un sistema de cogeneración, cuando compraba la electricidad a la compañía eléctrica y el combustible a la compañía suministradora. La ventaja en este aspecto es el ahorro económico, ya que se obtiene la misma cantidad de energía a menor coste. La puesta en marcha de un sistema de cogeneración requiere una inversión que ha de amortizarse en un plazo de tiempo razonable [20].

Las principales ventajas de la cogeneración son las siguientes:

- Ahorro de energía primaria: Se consume menos combustible con un sistema de cogeneración, en comparación con un sistema convencional.
- Se tiene un ahorro económico a causa del punto anterior.
- Ayuda con el cuidado del medio ambiente, reduciéndose las emisiones al disminuir el consumo de energía primaria teniendo así un desarrollo sostenible.
- Disminuyen las pérdidas por transporte y distribución de energía eléctrica.
- Disminuye la dependencia energética.
- Incrementa la posibilidad de industrializar zonas alejadas de las redes de distribución eléctrica.

Siempre se suele comenzar por el elemento primario, que puede ser, el motor, la turbina de gas o de vapor, cuando se escribe o se habla de cogeneración y sus aplicaciones, ya sea de una instalación concreta o en general. En contraparte, cuando se estudia, cuando se gesta el proyecto, cuando se analizan las diferentes posibilidades, ha de hacerse al revés, es decir, se empieza con las necesidades de calor del proceso, tanto en cantidades como en el tipo (nivel de temperatura, fluido calo-portador, etc.) para a partir de ahí, determinar el tipo de máquinas y su tamaño, que pueden producir esa energía térmica necesaria. De este modo se proponen diferentes sistemas de cogeneración para esa energía térmica requerida, y cada sistema produce diferentes cantidades de electricidad y con diferente rendimiento y

que, por tanto, tendrán diferente rentabilidad económica. Y finalmente escoger el más conveniente [20].

Es importante dejar en claro que el análisis de las necesidades de proceso no se debe restringir a la situación actual, sino que hay que investigar y proponer mejores sistemas de cogeneración, más eficientes y más rentables, impulsando así la investigación y el progreso de estos sistemas. Es importante mencionar que, en el actual marco legislativo, el diseño de la planta se orienta a atender la demanda de calor, esto debido a que es posible vender al proveedor de energía eléctrica la totalidad del excedente eléctrico producido, pudiendo llegar al 100% de dicha producción, de esta manera es evidente que la base de la cogeneración es el aprovechamiento de calor [20]. La energía producida, por el sistema de cogeneración, es consumida en primer lugar por la propia planta y el excedente es enviado a la red [21].

El principio de una central termoeléctrica tradicional es transformar la energía química contenida en un combustible fósil en energía eléctrica. El funcionamiento de estos sistemas se basa en la quema de un combustible fósil (carbón, fuel óleo, gasóleo, gas natural) para producir energía térmica, que es convertida en energía mecánica, que mediante un alternador se transforma en energía eléctrica de alta calidad. La energía térmica se transformaba en mecánica mediante un ciclo de vapor o mediante una turbina de gas (estas últimas plantas son llamadas de punta o de picos, por su facilidad para dar suministrar energía con rapidez en los momentos de mayor demanda). La proporción de energía química convertida en energía eléctrica es baja ya que tienen poca capacidad para desarrollar un trabajo útil, esto debido a que se pierde mucha energía en estos sistemas [20].

Pero en la mayoría de los procesos industriales, comerciales o de servicios requieren calor a una temperatura relativamente baja, de esta forma los sistemas de cogeneración son especialmente usados para estos sectores: así mismo, estos procesos pueden simultanear la producción de electricidad y el aprovechamiento del calor residual. Como este concepto de aprovechamiento energético es el que realizan las plantas de cogeneración, estos sistemas pueden llegar a un rendimiento global que oscilan entre el 75% y el 90% de la energía química contenida en el combustible [20]. Las experiencias habidas en estos sistemas deben servir para orientar los procedimientos de medida y control para la puesta en marcha de proyectos futuros de cogeneración. [21].

1.4.1. Aplicaciones de la Cogeneración

En los sectores donde se requiere energía térmica y eléctrica es donde se presenta la mayor rentabilidad para la cogeneración, ya que ésta es una forma muy eficiente de generación de energía. Una ventaja causada por la implementación de la

cogeneración es que existe una mejor fiabilidad de suministro eléctrico. Un requerimiento para implementar un sistema de cogeneración puede ser la demanda de calor o frío. El tipo de calor demandado conducirá a un tipo determinado de motor primario y de instalación. El tipo de combustible que se utilizará para un sistema de cogeneración es un factor de gran importancia para determinar el tipo de instalación de la planta. Los consumos térmicos en alta temperatura favorecen la implementación de las turbinas de gas, y los de agua a alta temperatura a los motores alternativos. En este sentido, se debe hacer primero una revisión de los consumos finales, para determinar si realmente es preciso la temperatura utilizada, tanto si se trata de gases calientes como vapor. De cualquier modo, si existe demanda térmica, se puede instalar cogeneración y sólo el tipo de planta y su optimización es la que estará establecida por el tipo y tamaño de consumo. Frecuentemente cuanto más eficiente sea un sistema, éste deberá ser más caro que una instalación convencional, el tiempo de funcionamiento de la planta es un factor importante que influye en su rentabilidad. Es decir, las industrias candidatas para instalar plantas de cogeneración son aquellas con gran consumo térmico y muchas horas de funcionamiento [20].

El sector que utiliza en mayor medida a los sistemas de cogeneración es el sector industrial, debido a su gran demanda de energía eléctrica y térmica. No obstante, el sector terciario o de servicios también hace uso de sistemas de cogeneración, pues tiene necesidades térmicas importantes, en la mayoría de los casos para climatización. En este caso la utilización de equipos de absorción es un factor importante, debido a que permite un aumento del número de horas de reutilización del calor y una regularidad de la demanda [20]. Entre algunas de las instalaciones en las que se podrían implementar un sistema de cogeneración se tienen las siguientes: [20]

- Hospitales
- Fábricas de alimentos
- Colegios y universidades
- Sector residencial
- Sector farmacéutico
- Hoteles
- Piscinas climatizadas
- Aeropuertos
- Refinería azucarera
- Centros comerciales

1.4.2. Tipos de plantas de cogeneración

Una planta de cogeneración básicamente cuenta con los siguientes sistemas básicos [20]:

- Un propulsor
- Un generador de electricidad
- Un sistema de recuperación de calor
- Un sistema de control
- Sistemas de refrigeración, como torres o aerocondensadores
- Sistemas auxiliares (bombas, compresores, etc.)

Se considera al propulsor como el componente más importante de una planta de cogeneración, debido a que convierte la energía contenida en el combustible en energía mecánica y térmica. Los dispositivos de conversión más comúnmente utilizados son las turbinas de vapor, las turbinas de gas y los motores alternativos de combustión interna [20]. Algunos tipos de plantas de cogeneración se muestran a continuación.

A) Cogeneración con motores de gas

El motor de combustión interna emplea la expansión de gases calientes para empujar un pistón dentro de un cilindro, convirtiendo el movimiento lineal del pistón en el movimiento giratorio de un cigüeñal para generar energía. Los motores de combustión interna recíprocos se pueden clasificar por el tipo de combustión: encendido por chispa (ciclo Otto) o encendido por compresión (ciclo Diesel) [22].

En el motor encendido por chispa se puede utilizar como combustible gasolina, gas natural comprimido (GNC), gas licuado del petróleo (GLP), syngas, etc. Dadas sus características propias, los motores de ciclo Diesel deben ser transformados a ciclo Otto cuando se requiere que el motor funcione con gas natural [23]. El motor encendido por chispa se basa en el ciclo Otto y utiliza una bujía para encender una mezcla de aire y combustible inyectada en la parte superior de un cilindro, la mezcla de combustible no se calienta lo suficiente como para quemarse sin una chispa, lo que la diferencia del ciclo Diesel. A medida que el combustible se inyecta en el cilindro, se quema inmediatamente con el aire comprimido caliente y los gases de combustión en expansión empujan el pistón hasta la parte inferior del cilindro. A continuación, se presenta una explicación más detallada del ciclo Otto [22].

En el motor de cuatro tiempos de encendido por chispa (ciclo Otto) se introduce al cilindro, durante el proceso de admisión, una proporción determinada de aire y combustible, tal como se aprecia en el esquema de la Figura 9 (a). Es en esta carrera (de admisión) donde el pistón se desplaza desde su Punto Muerto Superior (PMS) hasta su Punto Muerto Inferior (PMI), mientras la válvula de admisión permanece abierta. Después del proceso de llenado, se encuentra la carrera de compresión, donde la mezcla de aire y combustible es comprimido como se muestra

en el Figura 9 (b), desplazándose el pistón desde su PMI hasta su PMS, en esta carrera permanecen cerradas las válvulas de admisión y de escape. Terminando esta carrera se realiza la combustión de la mezcla aire-combustible, mediante la acción de una bujía, de este modo se incrementa la presión y la temperatura de la mezcla y como consecuencia el pistón es lanzado de su PMS hasta el PMI, como se observa en la Figura 9 (c). Durante esta carrera de expansión las válvulas de admisión y escape permanecen cerradas. La válvula de escape es abierta cuando el pistón llega a su PMI, iniciándose así el proceso o carrera de escape en que los productos de combustión son descargados del cilindro hacia la atmósfera, tal como se aprecia en la Figura 9 (d). De esta manera el cigüeñal gira 720 grados o dos vueltas para completar los cuatro tiempos o carreras; de admisión, compresión, expansión y escape [24].

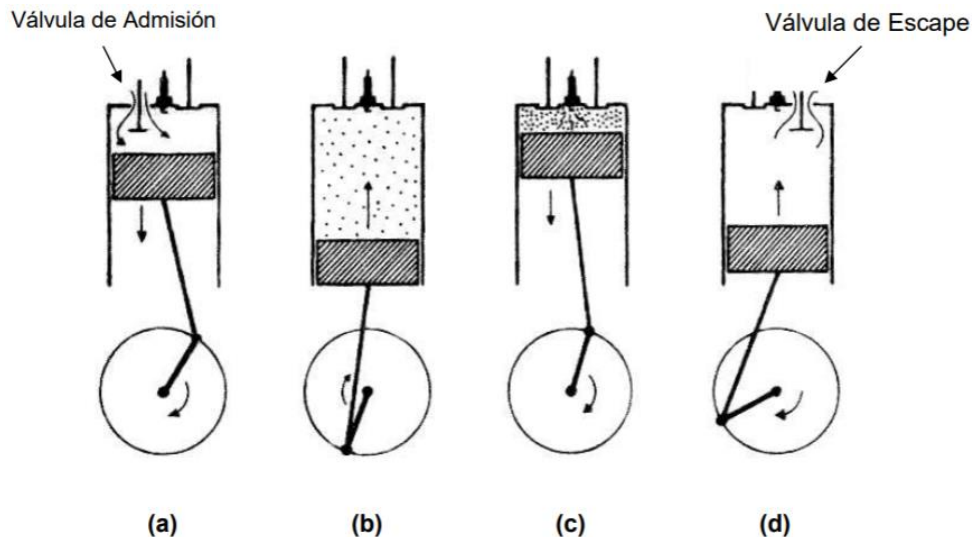


Figura 9 Tiempos de un ciclo Otto: a) Admisión, b) Compresión, c) Expansión, d) Escape

Fuente: Extraído de [24].

Los sistemas de cogeneración con motores de gas son muy eficientes eléctricamente, pero son poco eficientes térmicamente. El sistema de recuperación de calor es diseñado en función de los requisitos de la industria y en general se basan en la producción de vapor a baja presión (hasta 10 bares), aceite térmico y en el aprovechamiento del circuito de alta temperatura del agua de refrigeración del motor, de este modo se busca aprovechar las pérdidas de calor. Con estos sistemas también se puede producir frío por absorción, o bien a través del vapor generado con los gases en máquinas de doble efecto, o utilizando directamente el calor del agua de refrigeración en máquinas de simple efecto. Un dispositivo utilizado para producir frío es el “water chiller” [25].

Este tipo de instalaciones es conveniente para demanda de potencia baja, en la que la generación eléctrica es muy importante en el peso del plan de negocio. Los

motores son la máquina térmica que más rendimiento tiene, pues es capaz de convertir actualmente hasta el 45% de la energía química contenida en el combustible en energía eléctrica, este rendimiento era más bajo en años anteriores, pero gracias a las nuevas tecnologías e investigaciones se espera que este rendimiento aumente en los próximos años [25].

B) Cogeneración con turbina de gas

El funcionamiento en un sistema con turbina de gas es quemar un determinado combustible en un turbogenerador. De este modo, se obtiene energía mecánica que posteriormente es transformada en energía eléctrica gracias a un alternador, por otra parte, se obtiene energía térmica que puede ser mandada a proceso. El rendimiento de estos sistemas es más bajo que los motores, pero la ventaja de estos sistemas es el fácil aprovechamiento de calor, dicho calor se encuentra, casi en su totalidad, en los gases de combustión, estos gases alcanzan una temperatura de 500°C, y con esta cantidad de calor se puede producir vapor en una caldera de recuperación [25].

En el ciclo simple el sistema consta de una turbina de gas y una caldera de recuperación, generándose vapor directamente a la presión demandada en la planta de proceso asociada a la cogeneración. Su aplicación es adecuada cuando los requisitos de vapor son grandes (por ejemplo, más de 10 t/h de vapor), situación que se encuentra fácilmente en numerosas industrias como: alimentación, química, papelería, etc. Son plantas de gran fiabilidad y económicamente rentables cuando están diseñadas para una aplicación determinada, ya que se intenta aprovechar la mayor cantidad de energía, que puede ser perdida, en dicha aplicación [25].

El diseño del sistema de recuperación de calor es fundamental, pues su rentabilidad está directamente ligada al mismo, ya que se obtienen ahorros considerables y a diferencia de las plantas con motores alternativos el precio del calor recuperado es esencial en un ciclo simple de turbina de gas [25].

C) Cogeneración con turbina de vapor

Lo que se busca en estos sistemas es producir la energía mecánica y el calor a proceso gracias a la expansión del vapor a altas temperaturas, el cual proviene de una caldera convencional. En la actualidad la turbina de vapor se ha estado utilizando principalmente en ciclos combinados y en algunos casos en instalaciones que utilizan combustibles residuales, como la biomasa que en este caso son los subproductos residuales que se generan en la planta que se encuentra asociada al sistema de cogeneración [25].

Considerando la presión de salida del vapor de la turbina se pueden clasificar en: turbina de contrapresión donde el vapor sale con una presión superior a la atmosférica y suele estar conectado a un condensador inicial para obtener agua caliente o sobrecalentada de la cual se puede aprovechar su energía térmica, y en las turbinas de condensación el vapor sale a una presión inferior a la atmosférica, en este último diseño se obtiene un mayor aprovechamiento energético debido a la obtención de agua de refrigeración, este diseño es utilizado en turbinas de alta potencia que buscan un alto rendimiento [26]. En ambos casos se puede disponer de salidas intermedias o también llamadas extracciones, haciendo posible la utilización del vapor producido para un determinado proceso a diferentes niveles de presión [25].

D) Cogeneración en ciclo combinado con turbina de gas y vapor

Un ciclo combinado consta de la generación de energía a la co-existencia de dos ciclos termodinámicos en un mismo sistema, uno que tiene como fluido de trabajo vapor de agua y otro cuyo fluido de trabajo es un gas, generalmente gas natural, con el producto de una combustión de dicho gas se puede obtener calor para brindar a proceso [27].

Los gases de escape provenientes de la turbina de gas erróneamente pueden desperdiciarse a la atmósfera cuando no se realiza un aprovechamiento térmico o pueden atravesar la caldera de recuperación para producir vapor de alta presión. Posteriormente este vapor es utilizado en una turbina de vapor para producir energía eléctrica adicional. Después a la salida de la turbina se tendrá vapor a baja presión que puede condensarse para producir agua caliente o sobrecalentada, la cual es utilizada en la industria asociada. Cuando la demanda de energía térmica es mayor que la que se produce con los gases de escape, entonces se requiere un quemador de postcombustión con el que cuenta la caldera, de este modo se consume una cantidad adicional de combustible, pero se obtiene la energía térmica requerida. Esto es posible gracias a que los gases de escape cuentan con la cantidad suficiente de oxígeno, a diferencia de un ciclo combinado con un motor donde ésto no es posible debido a que los gases de escape no cuentan con la cantidad necesaria de oxígeno [25].

El proceso de vapor es esencial para lograr la eficiencia en un ciclo combinado con turbina de gas. La selección de la presión y la temperatura del vapor se realiza con base a las turbinas de gas y vapor seleccionadas, dicha selección se realiza en función de eficiencia y economía gracias a una ingeniería apropiada para obtener procesos adaptados a la demanda energética de la industria asociada a la cogeneración [25].

E) Cogeneración con motor de gas y turbina de vapor

El principio de estos sistemas es producir energía eléctrica con un motor, de donde se generan gases de escape que contienen una alta energía térmica aprovechable, estos gases entran a una caldera de recuperación para producir vapor, dicho vapor es utilizado como fluido de trabajo en una turbina de vapor para generar energía eléctrica o mecánica. Por otro lado, en el sistema de refrigeración de alta temperatura del motor, se recupera energía térmica en intercambiadores y este calor recuperado puede ser utilizado en la industria asociada al sistema de cogeneración. En este sistema el rendimiento eléctrico es alto mientras que el rendimiento térmico disminuye [25].

1.5. Combustibles

Las fuentes de energía primaria utilizadas en cogeneración, en orden de mayor importancia, se pueden dividir en: gas natural, combustibles líquidos (tales como combustóleo, propano, etc.) y otros combustibles como el carbón, el calor residual y la biomasa. Actualmente en muchos países, como México, la cogeneración se realiza con gas natural, debido a la introducción de turbinas y motores de gas cuya tecnología se ha adaptado perfectamente a las necesidades de la cogeneración gracias a las constantes innovaciones y estudios para obtener mejores rendimientos con estos sistemas. Su precio es accesible y hay gran disponibilidad en el mercado, estos dos puntos son de las principales razones por las cuales la utilización del gas natural es tan grande en sistemas de cogeneración. El gas y el combustóleo suponen aproximadamente un 90% del mercado de la cogeneración. [28]. Con base a la página de Energy Information Administration [29] el precio del gas natural para febrero del 2019 fue de 2.69 dólares/MBTU (dólares por millón de Btu), es decir, 0.0025 dólares/MJ.

1.6. Aspectos generales del cultivo y procesamiento de café

La cadena de producción del café consta básicamente de 4 procesos:

- Producción del grano
- Beneficio húmedo del café
- Beneficio seco del café
- Industrialización del producto.

Aunque los procesos pueden variar en diferentes fincas, éstos consisten en transformar el café desde su forma inicial, o café cereza, en café oro o, como

producto final, café tostado que sirva para la preparación de la bebida [2]. La Figura 10 muestra a grandes rasgos estos procesos:

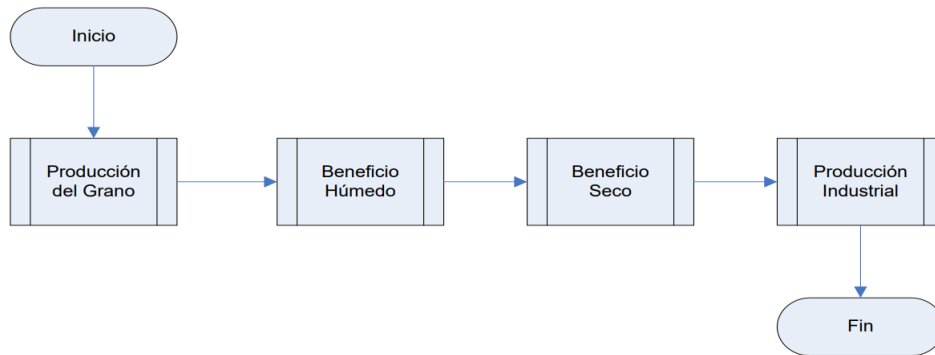


Figura 10. Proceso de Producción del Café.

Fuente: Extraído de [2].

Producción del grano:

Para la correcta atención y manejo del café, es de suma importancia contar con un conocimiento preciso para su cultivo. Estos conocimientos están relacionados con la altitud óptima para el cultivo del café, la precipitación (que es la cantidad y distribución de lluvias), la temperatura promedio anual favorable para el cafeto, la humedad relativa en el cultivo, el viento debido a que éste puede dañar el tejido vegetal, el buen manejo de fertilizantes, entre otros aspectos que ayudan a mejorar la calidad del café [30].

Ésta es la primera etapa del proceso, que comienza con la siembra, después el cuidado del cultivo y por último la recolección del grano. Para garantizar la mejor calidad del producto final, los recolectores cosechan granos que tengan un aspecto amarillo o rojizo [2].

Beneficio húmedo del café

Los procesos después de la cosecha, conocidos como post cosecha, son el beneficio húmedo y el secado, que comienzan a partir de la recolección de las cerezas de café [31]. En la recolección de café se busca eliminar los granos verdes y algunas otras impurezas de la carga como hojas ramas o piedras. Posteriormente se lleva al proceso de despulpe, este proceso consiste en separar la pulpa del grano de café mediante las máquinas despulpadoras, quienes funcionan con base en la presión y la fricción que se ejerce sobre las cerezas por medio de dos superficies, una fija y otra móvil, obteniendo de esta manera el café sin pulpa. En este procedimiento se pueden ocasionar daños al grano tales como: quebrar, morder o pelar los granos; lo que afecta la calidad del café. Es importante considerar que el despulpado se debe realizar el mismo día de la cosecha, máximo de ocho a doce horas después de la misma, ésto es para evitar una indeseada fermentación del grano [2].

Después de separar la pulpa del grano se debe eliminar el mucilago. Para remover el mucilago se debe llevar a cabo un proceso de fermentado que puede ser por fermentación natural o a través de máquinas. Un mal procesamiento en la eliminación del mucílago puede deteriorar la calidad del grano o crear retardos en las etapas siguientes del beneficio, reduciendo la eficiencia del proceso y la calidad del grano. Con relación al proceso mecánico antes mencionado, se debe introducir el café despulpado en una estructura metálica en la que por medio de presión y fricción sobre el grano se desprende el mucílago o baba. El otro proceso de fermentación consiste en retirar el mucilago del grano de manera natural, e inmediatamente después se procede al lavado de los granos usando agua [2].

Lo que se busca al separar rápidamente la pulpa y el mucílago del grano de café (que son los dos residuos generados en el Beneficio Húmedo), y lavarlos, es evitar la aparición posterior de sabores defectuosos [31]. Después de haber retirado el mucilago, el café es depositado en unas tolvas donde se escurre el exceso de agua, a esta etapa se le conoce como oreado y en ella se elimina entre el 15% y el 20% de la humedad del café, este proceso de oreado es especialmente importante en los picos de cosecha pues facilita el secado. Después de ser oreado, el café procede a ser secado con el fin de obtener el café pergamino [2].

El proceso de secado puede ser al sol, en secadores mecánicos o con ambos [31]. El secado mecánico se realiza usando hornos de secado, la mayoría alimentados por carbón y leña, donde se deja reposar el café entre 18 y 36 horas a una temperatura cercana a los 50°C. El secado al sol puede tardar hasta 15 días en retirar entre un 68% y 73% de la humedad restante [2]. En la Figura 11 se presenta el diagrama de flujo de los subprocesos de beneficio húmedo del café.

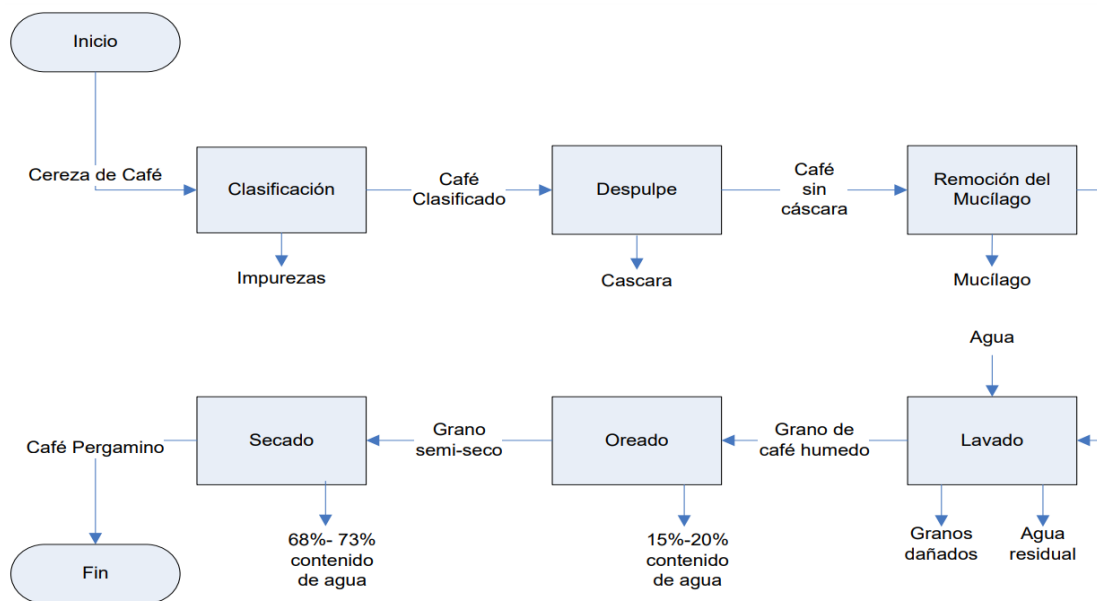


Figura 11. Subprocesos en el beneficio húmedo del Café.

Fuente: Extraído de [2].

Beneficio seco

Una vez que se han realizado los procesos de beneficio húmedo, incluyendo el secado, el café se somete a un nuevo proceso conocido como trilla del café [31]. En este proceso el café es transportado a las trilladoras, donde es clasificado de acuerdo a su tamaño, peso, color y apariencia física, posteriormente es trillado para la obtención del “café oro”, producto que pasa al proceso de industrialización. El principal residuo obtenido de la trilla de café es la pajilla, cascarilla o cisco [2].

En la Figura 12 se presenta el diagrama de flujo de los subprocesos del beneficio seco del café.

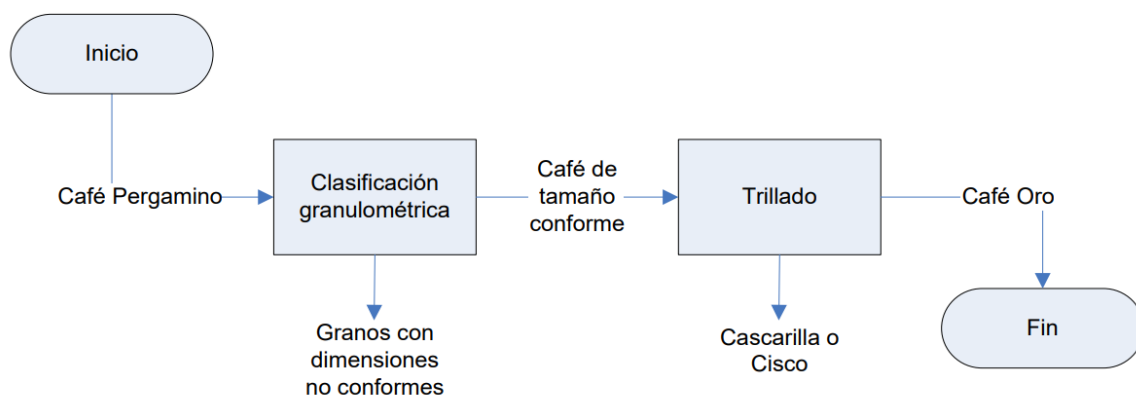


Figura 12. Subprocesos en el beneficio seco del café.

Fuente: Extraído de [2].

Industrialización del grano

En el proceso de industrialización se transforma el café oro en café molido, listo para la preparación de la bebida. El primer paso es la torrefacción del grano, o también conocido como tostado, proceso en el cual el café pierde la humedad restante del grano, así como algunos aceites volátiles que se encuentran al interior del grano. Este proceso se realiza frecuentemente en tostadores industriales donde se aumenta la temperatura progresivamente desde los 100°C hasta los 230°C. En este proceso el café también sufre transformaciones físicas cambiando su color de amarillo oro, a marrón oscuro, y posteriormente el café se pasa a unas planchas de enfriamiento donde se espera a que llegue a temperatura ambiente antes de ser almacenado en silos. Después de este proceso el café puede ser directamente empacado o pasar a un proceso de molienda [2].

En la Figura 13 se muestran los subprocesos de industrialización del grano de café que suele utilizarse en la industria cafetalera.

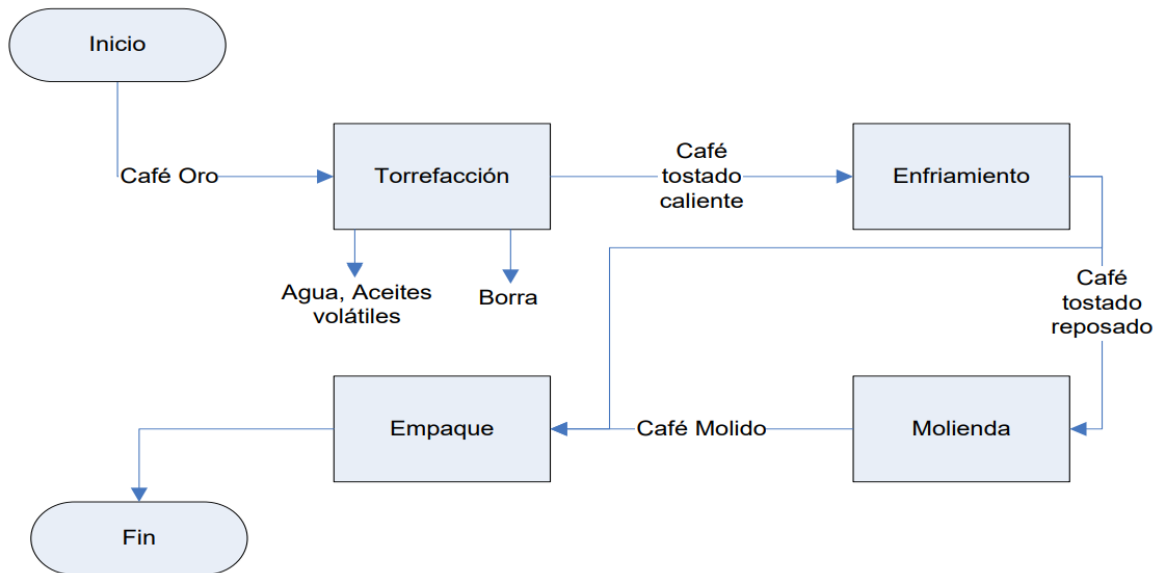


Figura 13. Subproceso de industrialización del grano de café.

Fuente: Extraído de [2].

1.6.1. Requerimientos energéticos en este sector

La energía eléctrica es utilizada en las fincas cafetaleras para el procesamiento de los granos de café. La cual es utilizada para la maquinaria en las diversas etapas del procesamiento del café, así como para alumbrado, entre otros servicios para la finca y los trabajadores. El consumo de energía eléctrica depende de la producción de la finca y sus procesos.

Por otra parte, la segunda energía necesaria en el procesamiento del café es la energía térmica. A los granos de café se les debe disminuir su contenido de humedad desde aproximadamente 53%, base húmeda, hasta un rango entre el 10% y el 12%, para que pueda ser almacenado en las condiciones normales de la zona cafetera, sin que se presente el deterioro por hongos y bacterias, en razón a que en esos porcentajes de humedad se reducen la actividad del agua y los procesos metabólicos por períodos de tiempo prolongados. La temperatura máxima a la que pueden someterse los granos de café, sin experimentar daños irreversibles en la estructura interna, es de 50°C mediante secadores mecánicos [32].

Otro proceso en el que se necesita energía térmica es en el tostado, la temperatura de tostado oscilará entre los 150C° y los 225C°, pero nunca sobrepasará los 250C°, cabe mencionar que no en todas las fincas cafetaleras, se realiza este último proceso [33].

1.6.2. Tipo de maquinaria industrial usada en sus procesos

La producción de café es un trabajo artesanal y en muchos lugares se hace igual que hace un siglo. Pero la tecnología avanza y aunque lamentablemente no está al alcance de todos, es posible realizar este trabajo más sencillo y sin perder calidad, pero también ahorrando tiempo y dinero [34]. Algunas de las maquinarias más importantes utilizadas en la producción de café son:

Despedregadoras: Se usa para separar piedras y otros objetos ajenos al café, considerados como contaminantes que pueden afectar los procesos de producción y la calidad del café. Usualmente tiene un manejo simple y consumo mínimo de energía [34].

Criba rotativa: Este equipo cumple dos objetivos que son separar el café por densidad y por tamaño. Debe operar entre 15 a 18 revoluciones por minuto. Anteriormente eran construidas con metal y hierro, lo que provocaba el daño por corrosión causado por la miel del café. En la actualidad estos equipos se están construyendo totalmente de plástico, como polietileno de alta densidad, para evitar la corrosión [30].

Separadoras gravimétricas: Como su nombre indica sirve para separar granos de café de acuerdo a su peso por gravedad (los granos de menor y mayor calidad). También separa los defectos de forma rápida y mejorar la calidad del producto. Frecuentemente tienen un manejo simple, consumo mínimo de energía, mínimo ruido y control de distribución de fluido de aire [34].

Seleccionadora por tamaño: Sirve para la selección de granos por tamaño. Este tipo de máquinas usualmente también se pueden usar con frijoles, cacao, maíz, trigo, arroz, etc. Su manejo es simple, consumo mínimo de energía y sin ruido [34].

Máquinas de beneficio húmedo compacto: Estas máquinas frecuentemente son compactas y sirven para despulpar, seleccionar y lavar los granos de café [34].

Despulpadoras: Despulpas y seleccionan los granos de café. Estas máquinas no lesionan granos si se regulan adecuadamente, tampoco se pierden granos en las cáscaras. Algunas máquinas se regulan de acuerdo al tamaño del grano y tienen poco consumo de agua. Las hay de varios canales, lo que permite procesar más masa [34].

Separadora de café: Estas máquinas permiten separar los granos verdes o secos de las cerezas maduras. Es de fácil regulación, no lesiona granos (mordidos), no pierde granos y usa agua reciclada [34].

Lavadoras de café: Limpia el grano de toda impureza luego del despulpado. Se recupera el 2% de peso, con este tipo de máquina se obtiene un ahorro en consumo de agua [34].

Oreadora secadora de café: Si no se tiene espacio para secar el café de modo tradicional, que es el secado al sol, se puede optar por estas máquinas que tiene diferentes capacidades. Secan y olean los granos sin necesidad de manipularlo, de manera uniforme. Las nuevas máquinas de este tipo consumen poca energía y son de fácil instalación [34].

Piladora-Pulidora: Pela y pule los granos de café secos. Estas máquinas son rápidas en el proceso, de fácil regulación, no lesionan granos y no pierde granos [34].

Tostaderos industriales: Estas máquinas sólo son utilizadas en las fincas donde se produce café tostado. Cumplen frecuentemente tres pasos para lograr el tueste perfecto. Limpieza que es la fase donde se eliminan restos de ramas, hojas, piedras o cualquier elemento extraño. Tostado que es la fase donde se introducen los granos en un bombo perforado a través del cual reciben aire caliente mientras el recipiente gira hasta que todos los granos están tostados por igual, la temperatura oscilará entre los 150C° y los 225C°, pero nunca sobrepasará los 250C°. Mezcla o ligasta que es la fase donde nacen las mezclas o 'blends', en este momento se seleccionan distintos granos, incluso procedentes de distintos grados de tostado [33].

1.6.3. Aprovechamiento de biomasa en la producción del café

Es un hecho que, en los países productores de café, los residuos y sub-productos del café constituyen una fuente de grave contaminación y problemas ambientales. Por ese motivo, desde mediados del siglo pasado se ha tratado de inventar métodos para utilizarlos como materia prima en la producción de piensos, bebidas, vinagre, biogás, cafeína, pectina, enzimas pécticos, proteína, y abono. El uso de la pulpa de café fresca o procesada, el cual es un residuo en el procesamiento del café, ha sido tema de muchos estudios en los que, en general, se llega a la conclusión de que los residuos y sub-productos del café pueden usarse de varias maneras, algunas de ellas se mencionan a continuación [3].

La pulpa: es un material de desecho que procede del procesamiento del café. La pulpa del café puede reemplazar hasta un 20% de los concentrados comerciales en la alimentación del ganado lechero, además este residuo no provoca efectos perjudiciales y con un ahorro del 30% [3].

Biogás procedente del agua residual del café: una fuente potencial para la producción de biogás es el agua drenada del extracto de la cereza del café. El extracto de la cereza que ha sido recogida y depositada varias horas en un saco o que se ha dejado suelta y puesta a secar será un hervidero de microorganismos de todo género que funcionan en los pegajosos jugos de fruta que se liberan. La adecuada fermentación y otros procedimientos reducen el pH, y el proceso ulterior de neutralización da lugar a que surja espuma CO₂ (principalmente sales de acetato

y un aumento del pH de 3.8 a 6.1), formada de tal manera que hará que salgan a la superficie más sólidos, los principales sólidos que salen a la superficie son taninos y polifenólicos de color oscuro. La evolución del CO₂ llegado hasta este punto provoca que sea posible la producción posterior de un biogás de metano, el cual es altamente enriquecido y que tiene únicamente la mitad del nivel habitual de CO₂ inerte. Hacer funcionar con él biogás obtenido un motor para generar electricidad, es la mejor manera de usar el biogás que se produce y todo el calor residual de grado más bajo proveniente de la refrigeración y el escape puede todavía usarse para secar café, además de que el proceso de secado de café es indispensable en su procesamiento [3].

Cáscara o cascabillo de café como combustible: La cáscara del café está compuesto de pura lignocelulosa y no tiene ningún valor como fertilizante. En la mayoría de las fincas cafetaleras se utiliza habitualmente como biomasa en hornos toscos para secar el café pergamino. Si la mayor parte del pergamino se seca parcialmente al sol por motivos de calidad, es aún posible tener un excedente de combustible después de una operación de acabado del secado incluso con los toscos secadores de aire caliente de un paso de hoy en día. Por otra parte se puede quemar la cáscara en un generador de gas pobre y después accionar un motor sobre ese gas pobre para producir electricidad, y al igual que con el biogás, el calor residual procedente del generador de gas y del motor puede usarse para calentar una corriente de aire limpio, y eso puede todavía usarse para secar aún más café, teniendo así un uso eficiente de la biomasa [3].

Con respecto al mucilago se pueden obtener las siguientes sustancias:

- Pectinas sin refinar: Se pueden encontrar esas pectinas en forma de gel soluble termorreversible o en forma de eslabón en cruz no reversible, los cuales tienen un sabor de boca distinto [3].
- Azúcares naturales del fruto del café, procedentes principalmente del agua del despulpe reciclada: Estos son en su mayor parte monosacáridos, glucosa, galactosa, ramnosa y arabinosa, con un sabor distinto, con un sabor parecido al de las ciruelas, y podrían comercializarse como una novedad para el consumidor de café más refinado [3].
- Pro antocianinas incoloras: las cuales podrían utilizarse como recurso básico para la fabricación de otros alimentos o por otra parte quizá para la síntesis más sofisticada de otras sustancias químicas [3].

1.7. Marco legal

Tomando como referencia al párrafo sexto del Artículo 27 Constitucional, corresponde a la Nación de manera exclusiva generar, conducir, transformar,

distribuir y abastecer energía eléctrica que tenga por objeto la prestación de servicio público [35]. Las reformas realizadas a la LSPEE (Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica) establecieron que no se considera servicio público a la generación de energía eléctrica para cogeneración y a la generación de energía eléctrica para su exportación, derivada de cogeneración (Artículo 3, Fracción I y III). Con base a la Fracción II del Artículo 36 de esta misma Ley, la SENER (Secretaría de Energía) considerando los criterios y lineamientos de la política energética nacional y con la opinión de la CFE (Comisión Federal de Electricidad), otorgará permisos de cogeneración siempre y cuando [36]:

- La electricidad generada se destine a la satisfacción de las necesidades de establecimientos asociados a la cogeneración.
- Se incrementen las eficiencias energética y económica de todo el proceso.
- La eficiencia energética sea mayor que la obtenida en plantas de generación convencionales.
- El solicitante se obligue a poner sus excedentes de producción de energía eléctrica a la disposición de la Comisión Federal de Electricidad [36].

De acuerdo al artículo 37 de esta misma Ley, una vez presentadas las solicitudes de permiso de cogeneración a que se refiere el artículo 36, y con la intervención de la Secretaría de Economía en el ámbito de sus atribuciones y la Secretaría de Energía, los titulares de dichos permisos quedan obligados a [36]:

- a) Proporcionar, en la medida de sus posibilidades, la energía eléctrica disponible para el servicio público, cuando por causas de fuerza mayor o caso fortuito el servicio público se interrumpa o restrinja, y únicamente por el lapso que comprenda la interrupción o restricción. Para estos casos, habrá una contraprestación a favor del titular del permiso.
- b) Cumplir con las Normas Oficiales Mexicanas que expide la SENER relativas a las obras e instalaciones objeto de los permisos.
- c) La entrega de energía eléctrica a la red de servicio público se sujetará a las reglas de despacho y operación del SEN (Sistema Eléctrico Nacional) que establezca la CFE [36].

Por su parte, la LAERFTE (Ley para el Aprovechamiento de las Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética), en la Fracción VII de su Artículo 7, otorga a la CRE (Comisión Reguladora de Energía) expedir los procedimientos de intercambio de energía y los sistemas correspondientes de compensaciones, para sistemas de cogeneración que estén conectados con las redes del SEN (Sistema Eléctrico Nacional). Además, en el artículo 20 se menciona que las atribuciones de la CRE, referidas en el artículo antes mencionado de la presente Ley, se aplicarán a los sistemas de cogeneración de electricidad, aunque

no utilicen energías renovables, siempre y cuando dichos sistemas cumplan con el criterio de eficiencia que establezca la CRE [37].

Ley de Transición Energética (LTE):

Tiene como objeto regular el aprovechamiento sustentable de la energía, así como las obligaciones en materia de energías limpias y reducción de emisiones contaminantes de la industria eléctrica, manteniendo la competitividad de los sectores productivos [38, p. 1].

La LTE contempla dos metas importantes que son las metas de energías limpias (en el capítulo II) y las metas de eficiencia energética (en el capítulo III) [38].

Ley General de Cambio Climático (LGCC):

Esta ley busca garantizar el derecho a un medio ambiente sano y establecer la concurrencia de facultades de la federación, las entidades federativas y los municipios en la elaboración y aplicación de políticas públicas para la adaptación al cambio climático y la mitigación de emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero. También tiene como objetivo regular las emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero para que México contribuya a lograr la estabilización de sus concentraciones en la atmósfera a un nivel que impida interferencias antropógenas peligrosas en el sistema climático considerando, en su caso, lo previsto por el artículo 2o. de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático y demás disposiciones derivadas de la misma [39, p. 1].

Esta ley está enfocada en materia de protección al ambiente, desarrollo sustentable, preservación y restauración del equilibrio ecológico. Algunos de los principales objetivos son: a) Garantizar el derecho a un medio ambiente sano. b) elaborar políticas para la adaptación y la mitigación de GEI. c) Regular las emisiones de GEI para lograr los compromisos derivados de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. e) Promover la transición hacia una economía competitiva, sustentable y de bajas emisiones de carbono [39].

Ley de los Órganos Reguladores Coordinados en Materia Energética:

Esta Ley es reglamentaria del párrafo octavo del artículo 28 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos y tiene por objeto regular la organización y funcionamiento de los Órganos Reguladores Coordinados en Materia Energética y establecer sus competencias [40, p. 1].

Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos:

Esta Ley es reglamentaria de los artículos 25 y 27 fracción XX de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, es de observancia general en toda la República Mexicana y tiene por objeto la promoción y desarrollo de los bioenergéticos con el fin de coadyuvar a la diversificación energética y el desarrollo

sustentable como condiciones que permiten garantizar el apoyo al campo mexicano [41, p. 1].

Algunos de los principales objetivos de esta Ley son: a) Promover la producción de insumos para Bioenergéticos, a partir de las actividades agropecuarias, forestales, algas y procesos biotecnológicos sin poner en riesgo la seguridad alimentaria del país. b) Desarrollar la producción, comercialización y uso eficiente de los Bioenergéticos para promover el desarrollo del sector rural. c) Intentar reducir las emisiones contaminantes a la atmósfera y gases de efecto de invernadero. d) Coordinar acciones para el desarrollo de Bioenergéticos.

Ley de Inversión Extranjera:

La presente Ley es de orden público y de observancia general en toda la República. Su objeto es la determinación de reglas para canalizar la inversión extranjera hacia el país y propiciar que ésta contribuya al desarrollo nacional [42, p. 1].

Ley de Desarrollo Rural Sustentable:

Sus disposiciones son de orden público y están dirigidas a: promover el desarrollo rural sustentable del país, propiciar un medio ambiente adecuado, en los términos del párrafo 4o. del artículo 4o.; y garantizar la rectoría del Estado y su papel en la promoción de la equidad, en los términos del artículo 25 de la Constitución. Se considera de interés público el desarrollo rural sustentable que incluye la planeación y organización de la producción agropecuaria, su industrialización y comercialización, y de los demás bienes y servicios, y todas aquellas acciones tendientes a la elevación de la calidad de vida de la población rural, según lo previsto en el artículo 26 de la Constitución, para lo que el Estado tendrá la participación que determina el presente ordenamiento, llevando a cabo su regulación y fomento en el marco de las libertades ciudadanas y obligaciones gubernamentales que establece la Constitución [43, p. 1].

Ley de Asociaciones Público Privadas:

La presente Ley es de orden público y tiene por objeto regular los esquemas para el desarrollo de proyectos de asociaciones público-privadas, bajo los principios de los artículos 25 y 134 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos [44, p. 1]. Esta ley comprende como proyectos de asociación público-privada aquellos que se realicen con cualquier esquema para establecer una relación contractual de largo plazo, entre instancias del sector público y del sector privado, para la prestación de servicios al sector público, mayoristas, intermediarios o al usuario final y en los que se utilice infraestructura proporcionada total o parcialmente por el sector privado con objetivos que aumenten el bienestar social y los niveles de inversión en el país [44].

Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente:

La presente Ley es reglamentaria de las disposiciones de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos que se refieren a la preservación y restauración del equilibrio ecológico, así como a la protección al ambiente, en el territorio nacional y las zonas sobre las que la nación ejerce su soberanía y jurisdicción. Sus disposiciones son de orden público e interés social y tienen por objeto propiciar el desarrollo sustentable [45, p. 1]. Dentro de los principales objetivos de esta Ley se encuentran: a) Establecer las políticas ambientales y su aplicación. b) la preservación y protección de la biodiversidad y administración de las áreas naturales protegidas. c) que sean compatibles la obtención de beneficios económicos y las actividades de la sociedad con el cuidado del medio ambiente [45].

Certificados de Energías Limpias:

La Ley de la Industria Eléctrica (LIE) define en su artículo 3, fracción VIII, los Certificados de Energías Limpias (CEL) como: "título emitido por la Comisión Reguladora de Energía que acredita la producción de un monto determinado de energía eléctrica a partir de Energías Limpias y que sirve para cumplir los requisitos asociados al consumo de los Centros de Carga" [46, p. 1]. Un CEL ampara la generación de 1 MWh de energía eléctrica limpia. Debido a que los CEL son un instrumento del mercado su precio no es fijo, sino que depende de la oferta y la demanda, en consecuencia, los participantes del mercado podrán presentar ofertas para vender CEL a cualquier precio, así como presentar ofertas para comprar CEL a cualquier precio. La compra-venta podrá realizarse a través del mercado de CEL, este mercado será realizado por lo menos una vez al año por CENACE (Centro Nacional de Control de Energía), de igual manera también podrán comercializarse libremente mediante Contratos Bilaterales o Subastas de Largo Plazo. Tiene derecho a recibir CEL la energía generada por centrales de cogeneración eficiente en términos de los criterios de eficiencia emitidos por la CRE y de emisiones establecidos por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [47].

Sobre la Generación Distribuida:

Con base al capítulo I de la Ley de la Industria Eléctrica, la Ley de Energía Geotérmica y donde se adicionan y reforman diversas disposiciones de la Ley de Aguas Nacionales, se entiende por generación distribuida a la generación de energía eléctrica que cumple con las siguientes características: 1) que se realice con un generador que cumpla con esta Ley, 2) que se realice en una Central Eléctrica que este interconectada a un circuito de distribución que contenga una alta concentración de Centros de Carga, considerando los términos de las Reglas del Mercado.

Con base al capítulo VII de la ley antes mencionada, la Generación Distribuida contará con acceso abierto a las Redes Generales de Distribución, así como el

acceso a los mercados donde pueda vender su producción. Algunos puntos a considerar para este efecto son los siguientes:

- Las especificaciones técnicas generales requeridas para la interconexión de nuevas Centrales Eléctricas incluirán determinadas especificaciones para la Generación Distribuida.
- Las condiciones generales para la prestación del Suministro Eléctrico ayudan a facilitar la venta de energía y productos asociados por la Generación Distribuida.
- La CRE se encargará de expedir y aplicar la regulación necesaria en materia de eficiencia, calidad, confiabilidad, continuidad y seguridad de la Generación Distribuida.

Para contribuir en el desarrollo de Centrales Eléctricas de Generación Limpia Distribuida, la Secretaría fomentará el otorgamiento de créditos y otros esquemas para su financiamiento. Además, la CRE, por su parte, fomentará la capacitación de empresas y su personal, así como de profesionales y técnicos independientes, para la instalación de Centrales Eléctricas de Generación Limpia Distribuida.

1.8. Conclusión

Se debe crear conciencia en minimizar las emisiones de GEI y buscar alternativas más limpias para la generación de energía, pero también utilizar las tecnologías más rentables y eficientes, con el fin de beneficiar a las generaciones actuales y futuras.

Sistemas de potencia eficientes, como la cogeneración, son indispensables para el abastecimiento de energía eléctrica en la mayoría de los países. Además de que esta tecnología trata de ser amigable con el medio ambiente, logra minimizar costos de producción, lo que permite aumentar el desarrollo tecnológico y económico del país. Aunado a esto, obtener energía a partir de fuentes renovables, tal como lo es el aprovechamiento de residuos, es en la actualidad la vía de acceso que permite resolver problemas de la demanda y generación energética, preservando el medio ambiente, con recursos inagotables y que proporciona sistemas de desarrollo no centralizados.

Con base a lo anterior es que se busca aprovechar el proceso de cogeneración y el aprovechamiento de residuos de café para generar energía eléctrica y térmica con menores costos, de forma eficiente y siendo amigable con el medio ambiente, en beneficio del desarrollo del país. Lo importante en el análisis del presente capítulo es crear las bases para poder implementar el sistema propuesto, aplicable en una finca en específico, considerando; los procesos de producción de café y el aprovechamiento de sus residuos, los fundamentos de cogeneración y energía de la biomasa, así como el marco legal comprendido para este estudio.

Capítulo 2. Caracterización de los requerimientos energéticos en el procesamiento de café del caso de estudio

Introducción

En este capítulo se presenta un resumen relacionado a la producción de café en México, así como también la estacionalidad de cosecha en México y en el estado de la región propuesta (Chiapas). Por otra parte, también se muestra una breve información y la ubicación de la finca en estudio de este trabajo, así como los procesos específicos que esta finca lleva a cabo para la producción de café y el tipo de infraestructura industrial utilizada en estos procesos. La producción de residuos de estos procesos y el uso que se le da a los mismos en esta finca, también son mencionados. En el presente capítulo se muestran y analizan los requerimientos energéticos para el procesamiento del café. Al final del capítulo se espera obtener como resultado la información necesaria, como los requerimientos energéticos de la finca en estudio, para la propuesta del sistema de cogeneración con gasificador, aprovechando los residuos en el procesamiento del café, buscando un beneficio económico y ambiental.

2.1. Producción de café en México

México cuenta con una extensa diversidad de flora y fauna, específicamente tiene condiciones muy favorables para la agricultura, un ejemplo de ello es el cultivo de café, gracias a que se cuenta con zonas montañosas en el sureste del país, tales como el estado de Chiapas, que se encuentran a altitudes mayores a 900 metros sobre el nivel del mar, así como temperaturas que van de los 17.5°C a los 25.3°C. La cafecultora en el país representa una actividad fundamental en el sector agrícola, no sólo por el valor de su producción, sino además por ser un importante generador de divisas, también se obtiene un gran beneficio ambiental por las bondades que ofrece al ser cultivado, puesto que el 99% de los predios cafetaleros se establecen bajo sombra, es decir, que las plantas de café estén cultivadas junto a árboles de sombra para protegerlas y promover la conservación de flora y fauna [1].

La producción de café cereza, el cual es el grano antes del proceso de beneficio, en México para el ciclo 2015/2016 fue de 835.0 miles de toneladas lo que equivale 835,000,000 kg de café cereza cosechado. Cabe mencionar que el ciclo cafetalero para México generalmente inicia en octubre y termina en septiembre, la cosecha del café se realiza principalmente de noviembre a marzo. En la Figura 14 se presenta la producción de café cereza en México para los ciclos de 2004/05 a 2015/16 en Millones de toneladas [1].

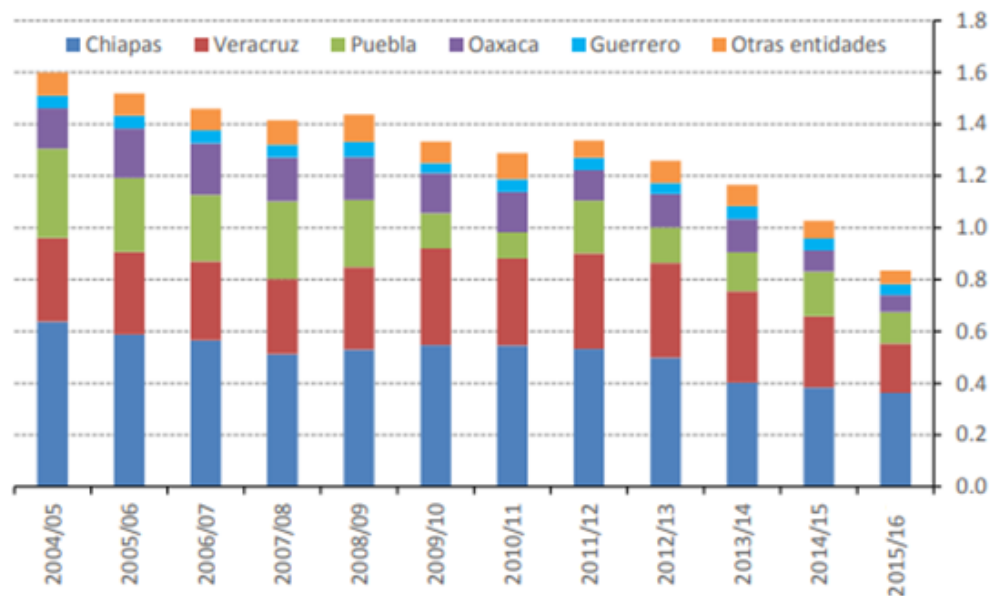


Figura 14. Producción de café cereza en México, de 2004/05 a 2015/16 en millones de toneladas.

Fuente: Extraído de [1]

En el ciclo de 2015/16 se produjo café cereza en 15 entidades, de las cuales en cinco de éstas se concentró el 93.7% de la producción nacional, estas entidades son: Chiapas (con el 43.3%), Veracruz (con el 22.9%), Puebla (con el 14.5%), Oaxaca (con el 7.9%) y Guerrero (con el 5.0%). Durante la década de 2004/05 a 2014/15, la producción nacional de café cereza disminuyó a una tasa promedio anual de 6.0%; en el ciclo de 2015/16 se redujo 18.6% con respecto al ciclo previo [1].

Con base en información del USDA (United States Department of Agriculture), en el ciclo de 2015/16 la producción de café verde, también llamado café oro que es el grano después de los beneficios húmedo y seco, en México fue de 2.5 millones de sacos de 60 kg equivalente a 150,000,000 kg, que fue su nivel más bajo desde el ciclo 1962/63. En la Figura 15 se presenta la producción de café en México del periodo 2004/05 a 2016/17 en millones de sacos de 60 kg de café oro [1].

En el ciclo 2015/16 el rendimiento promedio nacional de café cereza fue de 1.3 toneladas por hectárea, y en consecuencia se obtuvo de igual manera una baja producción de café verde. Este nivel de productividad es el mínimo desde que se tiene registro desde el ciclo 1979/80. La causa de este gran déficit de producción se debe, entre otros factores, a las considerables afectaciones que en años recientes ha ocasionado a las plantaciones la enfermedad de la roya y a esto se suman la avanzada edad de los cafetales. La roya es considerada la enfermedad más destructiva del cafeto y la de mayor importancia económica a nivel mundial, ya que provoca la caída prematura de las hojas, propiciando el debilitamiento de árboles enfermos y en infecciones severas que puede ocasionar la muerte de árboles [1].

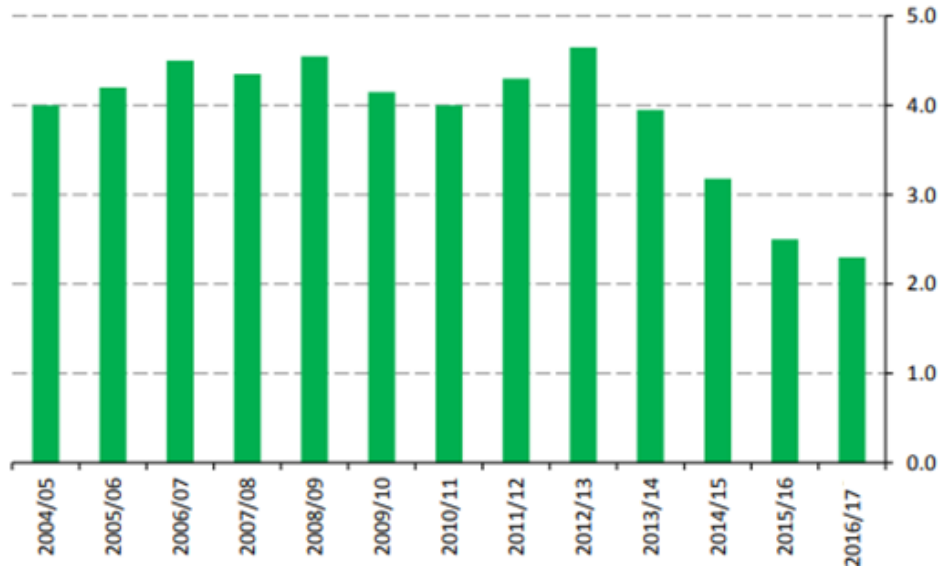


Figura 15. Producción de café en México, de 2004/05 a 2016/17 (Millones de sacos de 60 kg de café oro).

Fuente: Extraído de [1].

Pero este gran déficit ha disminuido y se han atacado los problemas que impedían la buena producción de café en México. La Organización Internacional del Café publica anualmente un listado con los mayores productores de café del mundo. En ese listado, publicado en 2018, Brasil, Colombia y Vietnam encabezan la lista, y por otro lado México es el 11º productor mundial de café. Para el periodo 2018-2019, se calcula que el volumen de producción de café en México será de 4 millones de sacos (cada saco de 60 kg), un 5,8% más alto que el del año anterior de cosecha. El objetivo es Incrementar la productividad de manera competitiva del sector cafetalero a 4.5 millones de sacos (cada saco de 60 kg), y de esta manera fomentar las bases para su incremento anual, y así lograr que para el año 2030 México tenga una producción sostenible de 15 millones de sacos. [48]

2.1.1. Estacionalidad de la producción de café

La producción de café tiene una marcada estacionalidad en México, debido a que en épocas específicas del año las condiciones climatológicas son idóneas para el cultivo y la cosecha del café. La producción de café se realiza en 8 meses del año, que son los meses entre octubre y mayo; sin embargo, entre los meses de diciembre a marzo se cosecha el 80.8% de la producción nacional anual de café cereza, debido a que para estas fechas el café cereza ya está lo suficientemente maduro para entrar a los procesos de beneficiado [1].

La estacionalidad en los 3 principales estados productores es muy similar, aunque la de Puebla es menos pronunciada, de manera que su producción se distribuye en

un mayor número de meses. Así, para el mismo periodo de diciembre a marzo, en Chiapas se produce el 83.4% de su producción, en Veracruz el 79.3% y en Puebla el 66.5% por ciento. En la Figura 16 se muestra la marcada estacionalidad de la producción de café cereza de 2001 a 2015, tanto para el estado de Chiapas como para todo el país [1].

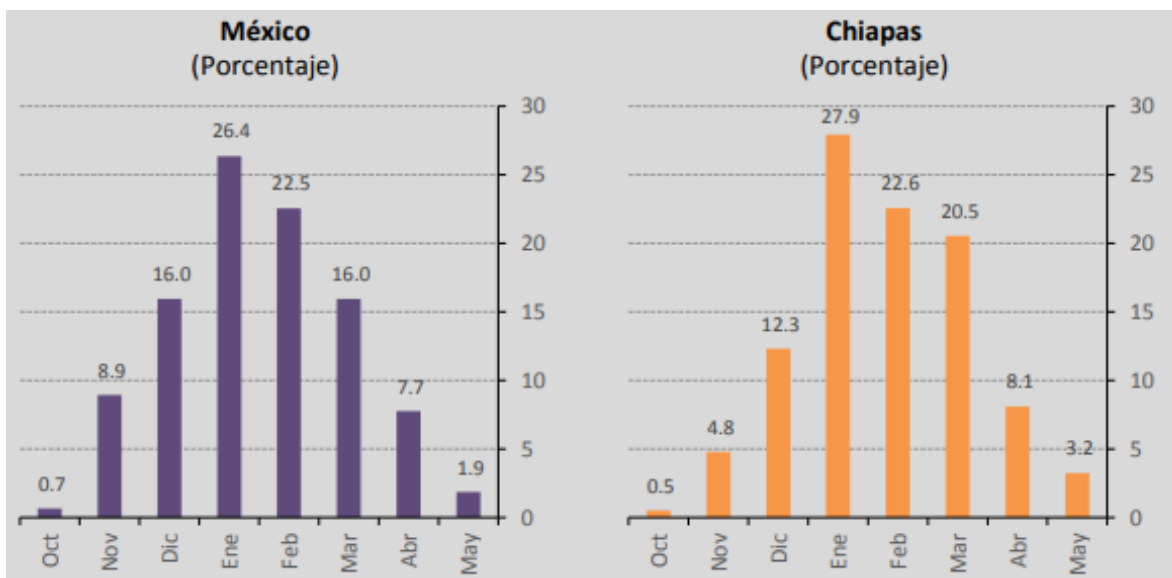


Figura 16. Estacionalidad de la producción de café cereza para el periodo 2001 a 2015.

Fuente: Extraído de [1].

2.2. Zona de la región propuesta

La región propuesta para este estudio fue en el estado de Chiapas, ya que es el estado con mayor producción de café a nivel nacional. En Chiapas las delegaciones de los pueblos productores son Copainalá, Ocozocoautla, San Cristóbal, Comitán, Ángel Albino Corzo, Bochil, Pichucalco, Ocosingo, Palenque, Yajalón, Motozintla, Tapachula y Mapastepec. De estas delegaciones se cuenta con un total de 88 municipios aledaños que se dedican y dependen de la producción del café. En Chiapas la principal especie cultivada es la arábica. La arábica es un cultivo de altura y que requiere de un clima subtropical. Asimismo, el estado cuenta con grandes superficies con un enorme potencial productivo [49].

Una vez que se escogió el estado en el cual se propone la implementación de este estudio, fue necesario buscar, mediante diversas instituciones, una finca que estuviera interesada en este trabajo y que brindara el apoyo necesario para lograr los objetivos del mismo. Gracias al Instituto del Café de Chiapas se logró tener contacto con una finca cafetalera que estaría interesada en este estudio.

La finca propuesta para este trabajo es la Finca Nuevo México, la cual se ubica en la Cuenca del Valle Custepec, esta cuenca es la más alta y seca que cultiva café en México, dentro de la Reserva de la Biosfera de El Triunfo, está localizada en la Sierra Madre de Chiapas. Área natural protegida de 119,177 hectáreas, perteneciente a la Red Internacional de Reservas de la Biosfera las cuales son reconocidas por la UNESCO. La máxima autoridad en cuanto a cafés especiales se refiere, es la Specialty Coffee Association (SCA), que es una asociación sin fines de lucro cuyo propósito es mejorar la calidad del café al elevar los estándares a nivel mundial. Esta asociación clasifica la calidad del café mediante un determinado puntaje y establece que cualquier café por encima de los 80 puntos es considerado como café de especialidad. Cabe señalar que el café producido en esta finca es un café de especialidad y está acreditado por la Red de Agricultura Sostenible (RAS), quien les otorga la certificación Rainforest Alliance. Además, esta finca se encuentra entre las 10 fincas más productivas por hectárea a nivel nacional [50].

2.3. Procesos para la producción de café en el caso de estudio

En esta sección se muestran los diferentes procesos para la producción del grano de café en la finca de estudio. Para tener una mejor visión de estos procesos, se realizó una visita a la Finca Nuevo México para poder recopilar datos necesarios para el presente estudio. Es de suma importancia mencionar que en la finca se realizan los procesos desde la siembra hasta el secado. Con respecto al beneficio seco, actualmente ya no se realiza en este mismo sitio como se hacía anteriormente, ahora este proceso es llevado a cabo en otro lugar, pero el cascabillo, obtenido del beneficio seco, es transportado nuevamente a la finca para alimentar como combustible a los secadores mecánicos. Los procesos que se realizan en la Finca Nuevo México, donde no se efectúa el beneficio seco, se muestran en la Figura 17, en la cual no se incluye el proceso de secado en patios para el café de baja calidad [50].

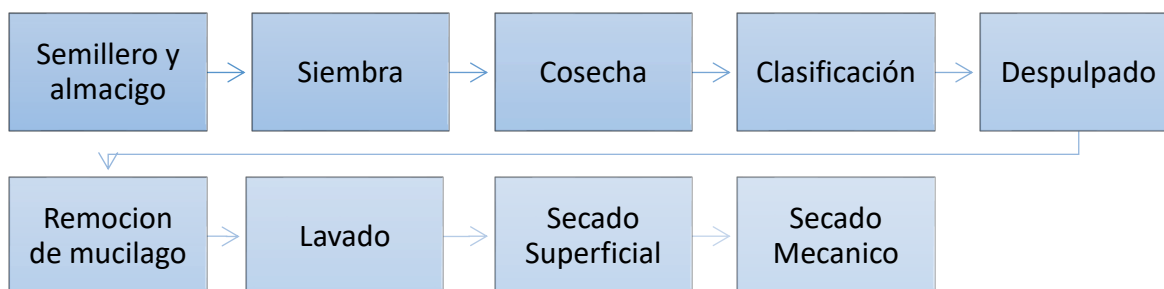


Figura 17. Procesos de producción de café en la Finca Nuevo México, sin incluir secado en patios.

Fuente: Elaboración propia con información de [50].

Los diferentes procesos para el cultivo y procesamiento de café utilizado en esta finca, considerando también el beneficio seco, se pueden dividir en tres etapas:

- 1) Siembra, cosecha y beneficio húmedo
- 2) Secado
- 3) Beneficio seco

1) Siembra, cosecha y beneficio húmedo

El Semillero es el inicio de todo. En la Finca Nuevo México el semillero es donde se germinan las semillas de las distintas variedades de café que se sembrarán el año siguiente. Esta labor inicia desde que se adquieren las semillas y el periodo de estancia en el semillero es aproximadamente de 40 a 60 días. El Almácigo se lleva a cabo después de haberse terminado la germinación de la semilla, entonces la plántula es trasplantada a una bolsa o tubete, donde llevan un estricto cuidado mediante riego y fertilizantes, y se siembra en el campo en el mes de junio [50].

Siembra

El sistema utilizado para la siembra en la Finca Nuevo México es por surcos, en curvas por contorno con una densidad aproximada de 4,000 plantas por hectárea. Después de trazar el nuevo cafetal teniendo en cuenta las condiciones topográficas, recorrido del sol y las horas luz que recibe el terreno, se prepara el suelo antes de la siembra. El trasplante de las plantas del almácigo al campo definitivo se hace en el mes de junio para aprovechar de mejor manera las lluvias y también se le adicionan nutrientes. La sombra es un elemento fundamental en los cafetales de la finca, es por ello por lo que se siembran aproximadamente 300 árboles de sombra por hectárea al momento de la siembra del cafetal, considerando que estos árboles son plantados sobre el surco del café cada seis metros, para no estorbar en las labores de cultivo y cosecha [50].

Cosecha

La cosecha en esta finca es la primera parte del Beneficiado Húmedo, en donde sólo se recolectan granos maduros, tal como se muestra en la Figura 18 [50].



Figura 18. Cosecha de café.

Fuente: Elaboración propia.

La cosecha inicia en diciembre y termina en abril. Los frutos bayos, semimaduros, secos, enfermos, etcétera se separan para no afectar la calidad del café. En la finca se tienen tres recibidores en donde diariamente los trabajadores llevan el café cosechado, y en los cuales se mide el café maduro en unas cajas de metal con capacidad de 200 litros (en esta finca se recibe por volumen y no por peso) [50].

Clasificación

Posteriormente se lleva el café cosechado a las instalaciones del Beneficio Húmedo en donde se clasifica el café en un sifón de paso continuo para separar los flotes que son frutos de menor peso además de piedras y hojas [50].

Esta es una de las etapas que nunca se deben eliminar, debido a que las plantaciones de café algunas veces son dañadas por plagas y enfermedades, que generan frutos de menor densidad (flotantes y vanos), por lo que se debe clasificar el fruto en los sifones, además los sifones también sirven para separar piedras y basuras que pueden provocar deterioro en la máquina de despulpado. Posterior al sifón se tienen dos cribas rotativas para separar el café por tamaño, donde el café de baja calidad se secará en patios y el de buena calidad seguirá al proceso de despulpado, se podría considerar que todo el café cosechado es despulpado [51].

Despulpado

Es el proceso mecánico donde se busca separar la pulpa o también llamado epicarpio, que se realiza con 3 máquinas despulpadoras, las cuales aprovechan la cualidad lubricante del mucilago del café, para que por presión suelten los granos. Este proceso se pretende realizar sin dañar el pergamino o el grano ya que, si esto ocurre, entonces los defectos permanecerán en los procesos siguientes, tales como la fermentación y el secado, provocando un deterioro en la calidad de la bebida. Estas despulpadoras no retiran completamente la pulpa de los distintos tamaños de los frutos, debido a que funcionan de forma mecánica, pero es preferible que pase fruto sin ser despulpado, a que se lastimen o quiebren [51]. Estas máquinas son despulpadoras cónicas verticales que no utilizan agua en el proceso. Posterior a estas máquinas se tiene una criba rotativa adicional para rechazar cualquier pulpa y grano sin despulpar, y obtener el café de baja calidad que será secado en patios. La pulpa de café es aproximadamente el 45% en peso del fruto fresco. Este residuo, la pulpa, es utilizado para un proceso de vernicompostaje. [50]

Remoción de mucilago

El mucilago o miel es un material gelatinoso insoluble en el agua (hidrogel) y es necesario solubilizarlo para convertirlo en un material de fácil remoción en el lavado (hidrosol). Para esto es necesario forzarlo a su degradación, en este caso, mediante la fermentación natural. [51]

Para remover el mucilago en la Finca Nuevo México se utiliza el método de fermentación en tanques de fermento por alrededor de 36 horas [50].

Lavado de café fermentado

En esta operación se quita la miel que queda adherida al café (después del fermentado), por medio de la inmersión y paso de una corriente de agua en una canal [51]. El lavado, en la Finca Nuevo México, es realizado gracias a un equipo mecánico diseñado para lavar café fermentado con bajos consumos de agua y energía, esta máquina de lavado es conocida como “eco-washer”. Los residuos obtenidos (mucilago y agua) son utilizados para regar una especie de pasto en particular, llamado pasto de estrella africana. El porcentaje en peso, del fruto fresco, para el mucilago que es retirado, es de aproximadamente 22% en esta finca. [50]

Cabe mencionar que los porcentajes en peso de los residuos en el procesamiento del café varían debido a varios factores como el clima, la temporada, la zona etc. Por esta razón los porcentajes en peso obtenidos directamente de la Finca Nuevo México pueden variar con datos citados de otras fuentes. En la Figura 19 se muestra el diagrama de flujo para la etapa de siembra, cosecha y beneficio húmedo.

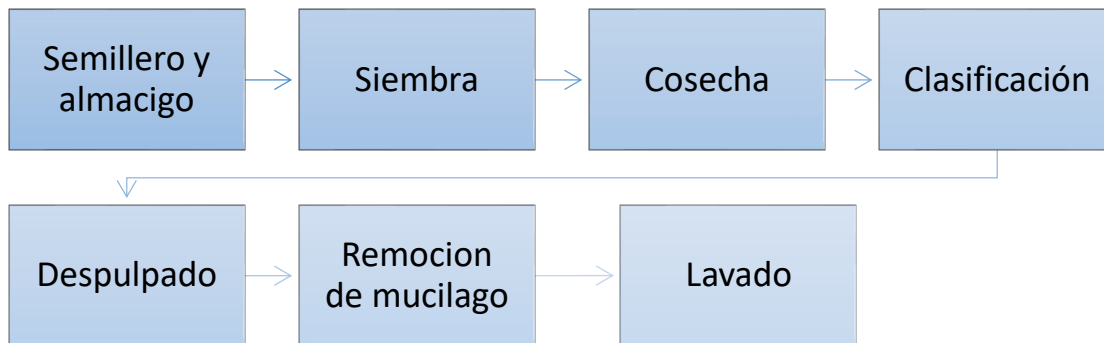


Figura 19. Diagrama de flujo de la etapa de siembra, cosecha y beneficio húmedo en la Finca Nuevo México.

Fuente: Elaboración propia con información de [50].

2) Secado

Secado superficial

El secado es el procedimiento de bajar la humedad de un 55% (con la que sale el café después del beneficio húmedo) a un 12% (después del secado mecánico) necesario para su almacenamiento. Primero se lleva acabo el secado superficial, en la Finca Nuevo México se realiza con una máquina conocida como “Centriflux” [50].

Secado mecánico

Se realiza a través de secadoras de tipo guardiola que consisten de:

- a. Una fuente de calor (horno o calorífero)
- b. Un ventilador para forzar el aire caliente
- c. Una estructura con compartimientos donde se coloca la carga de café a secar (tambor rotativo).

El elemento fundamental en el secado es el aire caliente, que es mecánicamente impulsado y forzado a través de la masa de café, para que el aire adquiera la condición desecante es necesario aumentar su temperatura y así bajar la humedad relativa del mismo [51]. La temperatura de secado en los tambores rotativos es aproximadamente de 45°C y no debe sobrepasar los 50°C. Después del proceso total de secado se retira 10% en peso de agua, del porcentaje total del fruto fresco. [50]

Secado en patios

El secado en patios se lleva a cabo solamente para los granos de café de baja calidad, a los cuales no se les aplica el proceso de fermentado. Esta técnica consiste en extender el café en el patio (en este caso de cemento) con ayuda de un rastrillo, de tal manera que los surcos estén en la posición más favorable posible para aprovechar los rayos del sol. Es importante señalar que se seca el 20% del total del café cosechado en la finca con esta técnica [50]. En la Figura 20 se muestra cómo se lleva a cabo esta técnica en la Finca Nuevo México.



Figura 20. Secado en patios en la Finca Nuevo México.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 21 se presenta el diagrama de flujo correspondiente a la etapa de secado del café de buena calidad.

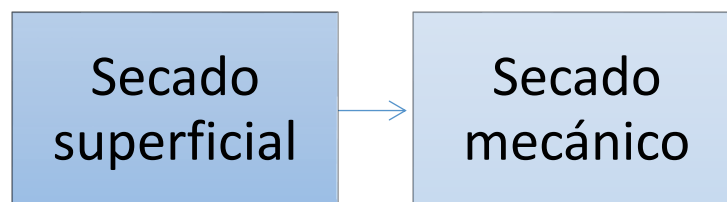


Figura 21. Diagrama de flujo de la etapa de secado de café de buena calidad en la Finca Nuevo México.

Fuente: Elaboración propia con información de [50].

3) Beneficio seco

El beneficio seco, como se mencionó anteriormente, se lleva a cabo en un lugar distinto a la ubicación de la Finca Nuevo México, por tanto, no se considera el consumo energético de este proceso que será generado con la planta de cogeneración propuesto para el presente estudio. Sin embargo, se muestra a continuación este proceso, donde se obtiene uno de los residuos en el procesamiento del café, que es el cascabillo.

Retiro de cascara, pajilla o cascabillo

La cáscara es retirada en la Finca Nuevo México con el uso de una retrilla o morteadora. El residuo obtenido es utilizado para alimentar como biomasa a los secadores Guardiolas y el porcentaje en peso, del fruto fresco, de la pajilla en esta finca es aproximadamente del 4.6%. [50]

Selección grano

En esta etapa también se separa el café con base a sus formas o tamaños que pueden ser planchuelas grandes y medianas, caracolillo, elefantes, triángulos y granos quebrados. Para llevar a cabo este proceso de selección de granos de café, de acuerdo con su peso por gravedad y separar los defectos, se utiliza una zaranda seleccionadora de café. A continuación, pasa el café a dos catadores y dos dosimétricas, que son máquinas que apartan por densidad los cafés menos pesados enviándolos a café de baja calidad. El café oro es el producto final después de la trilla y representa un porcentaje en peso de 18.4% del café fresco. [50]

Envasado

Como última operación se envasa el café en sacos de yute, henequén o polipropileno dependiendo de las indicaciones de los clientes de esta finca. [50]

A continuación, se muestra en la Figura 22 el diagrama de flujo de los procesos en la etapa del beneficio seco.

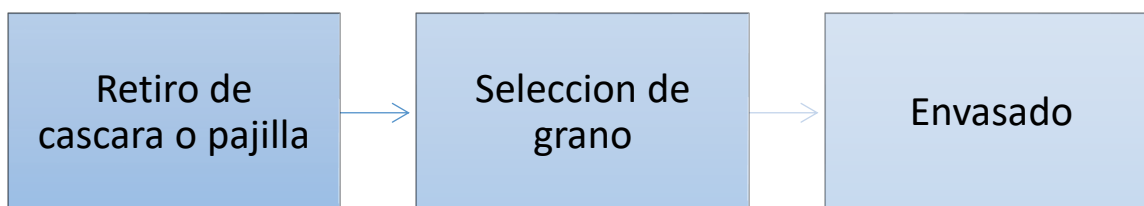


Figura 22. Diagrama de flujo de la etapa de beneficio seco en la Finca Nuevo México.

Fuente: Elaboración propia con información de [50].

2.4. Tipo de infraestructura industrial usada en sus procesos energéticos

Tal como se ha mencionado anteriormente, actualmente en la Finca Nuevo México se realizan los procesos desde el cultivo y cosecha hasta el secado del café. Para conocer más a detalle el tipo de infraestructura se realizó un levantamiento en la Finca Nuevo México. Dentro su infraestructura industrial se encuentra lo siguiente:

En la Figura 23 se muestra uno de los 3 recibidores donde se encuentran las cajas de metal de 200 litros para medir el café que se ha recolectado en los cafetales por los trabajadores.



Figura 23. Recibidor de café.

Fuente: Elaboración propia.

En la finca se cuenta con tres despulpadoras, que se encuentran después de las cribas rotativas. Cada una de estas despulpadoras cuenta con un motor de 2 HP. Estas máquinas se muestran a continuación en la Figura 24.



Figura 24. Despulpadoras de café.

Fuente: Elaboración propia.

La pulpa del café cae, de las despulpadoras, a un tornillo helicoidal (en posición horizontal) que utiliza un motor de 5 HP y que transporta la pulpa hacia otro tornillo helicoidal de la misma potencia (en posición diagonal) para transportar la pulpa a una bodega donde se almacena este residuo. En la bodega se encuentra un tornillo helicoidal adicional (horizontalmente) para distribuir la pulpa a lo largo de la bodega de almacenamiento, cabe mencionar que este último tornillo helicoidal es necesario para que la pulpa no se concentre en un sólo punto, ya que requiere de mucho espacio para su almacenamiento. Uno de estos tres tornillos se muestra en la Figura 25, que es el tornillo inclinado que transporta la pulpa hacia la bodega de almacenamiento.



Figura 25. Tornillo helicoidal encargado de transportar la pulpa hacia la bodega de almacenamiento.

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se presenta una de las cribas que se utilizan en esta finca. Estas cribas sirven para eliminar cuerpos extraños y granos de tamaño no conforme a los parámetros establecidos. La criba expuesta en la Figura 26 es la que se utiliza después de que el grano de café ha sido despulpado y utiliza un motor de 0.5 HP para su funcionamiento.



Figura 26. Criba rotativa posterior de las maquinas despulpadoras.

Fuente: Elaboración propia.

Después de la criba anteriormente mencionada, el café de buena calidad es transportado, con ayuda de una bomba, hasta los tanques de fermentado (Figura 27). El tiempo de fermentado es de 36 horas y después se lava el café para retirar el mucilago. El proceso de lavado se lleva a cabo con una máquina de lavado que cuenta con un motor de 1.5 HP y otro más de 5 HP, esta máquina se muestra en la Figura 28.



Figura 27. Tanques de fermentado.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 28. Máquina de lavado.

Fuente: Elaboración propia.

Posterior al lavado del café, éste es transportado hasta un escurridor, para después llevarse a cabo el proceso de secado superficial con la maquina centrifugadora, la cual se muestra en la Figura 29.



Figura 29. Centrifugadora.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez que el café es secado superficialmente se deposita en un elevador que transporta el café hasta el secado mecánico. El sistema de las secadoras guardiolas cuenta con un dosificador, en el cual se le agrega el cascabillo, y sirve para graduar la proporción del cascabillo que posteriormente es transportados hacia el quemador de la caldera con ayuda de un ventilador. El cascabillo es quemado y los gases de combustión se trasladan a través de unos tubos de humo, los cuales transfieren calor al aire del ambiente que entra al hogar de la caldera. El aire caliente del hogar es transportado por tres tuberías (con ayuda de un ventilador para cada tubería) hasta los 3 tambores rotativos (con capacidad de 30, 45 y 60 quintales de café cada uno, donde cada quintal es de 46 kg) que contienen los granos de café. Las tuberías que salen de la caldera se muestran en la Figura 30.



Figura 30. Tuberías que transportan el aire caliente a la salida de la caldera.

Fuente: Elaboración propia.

Uno de los tambores rotativos (el de 30 quintales) se muestra en la Figura 31, donde la tubería de color marrón inyecta el aire caliente para secar el café. Después de que el café ha sido secado es transportado hasta un elevador, para posteriormente ser pesado y empacado en costales.



Figura 31. Tambor rotativo para secado de café.

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 1 se presenta la maquinaria, utilizada en la finca, con la potencia y velocidad angular de sus respectivos motores, así como una breve descripción, y donde “ND” significa; dato no disponible.

Tabla 1. Equipos utilizados en la Finca Nuevo México.

		Nombre del equipo	Descripción del equipo	Potencia del motor [HP]	Velocidad angular del motor [rpm]
Beneficio Húmedo	1	Criba antes de despulpadoras	Separa cuerpos extraños y granos de tamaño no deseado	1	1750
	2	Despulpadora 1	Retira la pulpa del grano de café	2	ND
	3	Despulpadora 2	Retira la pulpa del grano de café	2	ND
	4	Despulpadora 3	Retira la pulpa del grano de café	2	ND
	5	Criba después del despulpado	Separa cuerpos extraños y granos de tamaño no deseado	½	1680
	6	Tornillo helicoidal horizontal	Transporta la pulpa retirada de las despulpadoras	2	1695
	7	Tornillo helicoidal inclinado	Transporta la pulpa hasta la bodega de almacenamiento	5	1730
	8	Tornillo helicoidal en la bodega	Distribuye la pulpa a lo largo de la bodega de almacenamiento	5	1380
	9	Escurredor después de café de baja calidad	Escurre el café de baja calidad en un tanque	¾	1680
	10	Bomba de café para fermentar	Transporta el café de buena calidad a los tanques de fermentado	2	2900
	11	Escurredor en tanques de fermentado	Escurre el café antes de entrar a los tanques de fermentado	1½	1720
	12	Filtro de agua	Limpia el agua, requerida en las etapas del beneficio húmedo, para reutilizarla	½	1700
	13	Bomba para filtro de agua	Transporta el agua hacia el filtro de agua	1	1750
	14	Máquina lavado (motor 1)	Lava el café fermentado	½	3450
	15	Máquina lavado (motor 2)	Lava el café fermentado	5	1735
Secado	16	Escurredor antes de centrifugadora	Escurre el café fermentado antes de entrar al centrifugadora	½	Nd
	17	Centrifugadora	Se encarga del secado superficial antes del secado mecánico	7½	1770
	18	Elevador después de centrifugadora	Ayuda a transportar el café a los tambores rotativos	2	ND
	19	Bazuca de cascabillo	Sirve para transportar el cascabillo hacia el dosificador	5	ND
	20	Dosificador de cascabillo	Sirve para graduar la proporción del cascabillo antes de entrar al quemador	⅓	1680
	21	Ventilador de cascabillo	Transporta el cascabillo, después del dosificador, al quemador	1	1725
	22	Ventilador de secador 30 quintales	Transporta el aire caliente obtenido de la caldera hacia el tambor rotativo	3	1725
	23	Ventilador de secador de 45 quintales	Transporta el aire caliente obtenido de la caldera hacia el tambor rotativo	5	1800
	24	Ventilador de secador de 60 quintales	Transporta el aire caliente obtenido de la caldera hacia el tambor rotativo	7½	1780
	25	Tambor rotativo de 30 quintales	Gira mientras el aire caliente absorbe la humedad del grano de café	1½	1780
	26	Tambor rotativo de 45 quintales	Gira mientras el aire caliente absorbe la humedad del grano de café	10	ND
	27	Tambor rotativo de 60 quintales	Gira mientras el aire caliente absorbe la humedad del grano de café	10	1800
	28	Elevador después del secado	Ayuda a transportar el café seco para poder pesarlo	2	ND
	29	Ventilador de chimenea	Transporta los gases de combustión hacia el ambiente	5	1750

Fuente: Elaboración propia a partir de [50].

2.5. Producción de residuos en el procesamiento de café, caso de estudio

Para la mayoría de los sectores industriales la generación de subproductos o residuos es inevitable, la industria del café es un gran ejemplo de ello, debido a que genera enormes cantidades de residuos, que actualmente son un gran problema ambiental y a la vez un importante tópico de investigación. Dependiendo del método empleado para la producción del café oro, será el tipo de residuo obtenido, pero principalmente son la pulpa, el mucilago y cascarilla o cascabillo [52], mismos que se obtienen de la Finca Nuevo México [50].

De los varios residuos del procesado del café, la pulpa es el que se genera en mayor cantidad y en consecuencia el que origina un mayor problema de contaminación ambiental. La degradación de este material requiere de semanas hasta varios meses de la acción microbiana nativa para su degradación parcial, por lo que puede acumularse e incrementar los problemas de contaminación [52].

Los residuos del procesado de café contienen grandes cantidades de fibra compuesta por celulosa y hemicelulosa, tal como ocurre en muchos otros residuos agroindustriales. Dentro de los componentes que se encuentran en los residuos del procesado de café se pueden mencionar la cafeína, las proteínas y compuestos fenólicos, los cuales permanecen en cantidades significativas. Para mostrar un panorama de la gran cantidad de residuos generados en el procesado del café, se tiene que tan solo para el año 2009 la producción mundial de café produjo al menos 1 millón de toneladas de residuos. Y en ese mismo año para México ocho mil toneladas de residuos fueron producidos. Tomando en consideración este último dato y la gran demanda de oxígeno que se requiere para degradar este tipo de materiales, es posible imaginar la magnitud del problema ecológico que se produce al liberar directamente al medio ambiente estos residuos [52].

También se debe tomar en cuenta la presencia de los agentes llamados antinutricionales como la cafeína, los taninos y polifenoles, ya que el riesgo potencial de estos residuos aumenta al ser compuestos tóxicos para muchos microorganismos, reduciendo drásticamente su biodegradabilidad. Desafortunadamente en México, muy pocas industrias controlan los residuos generados de la producción del café. En la actualidad, existen varios estudios para atacar este problema, y aprovechar estos materiales es un tema que se sigue estudiando, cuyo objetivo es el proceso integral en el que las industrias aprovechen de manera sustentable todos los recursos utilizados dentro de las mismas [52].

En la Figura 32 se presenta el diagrama de flujo de los subproductos en el procesado del café desde la cosecha hasta la obtención del café oro, mostrando el balance de masa en el procesamiento del café. Estos datos fueron recabados de la Finca Nuevo México y son datos empíricos proporcionados por el dueño de la finca.

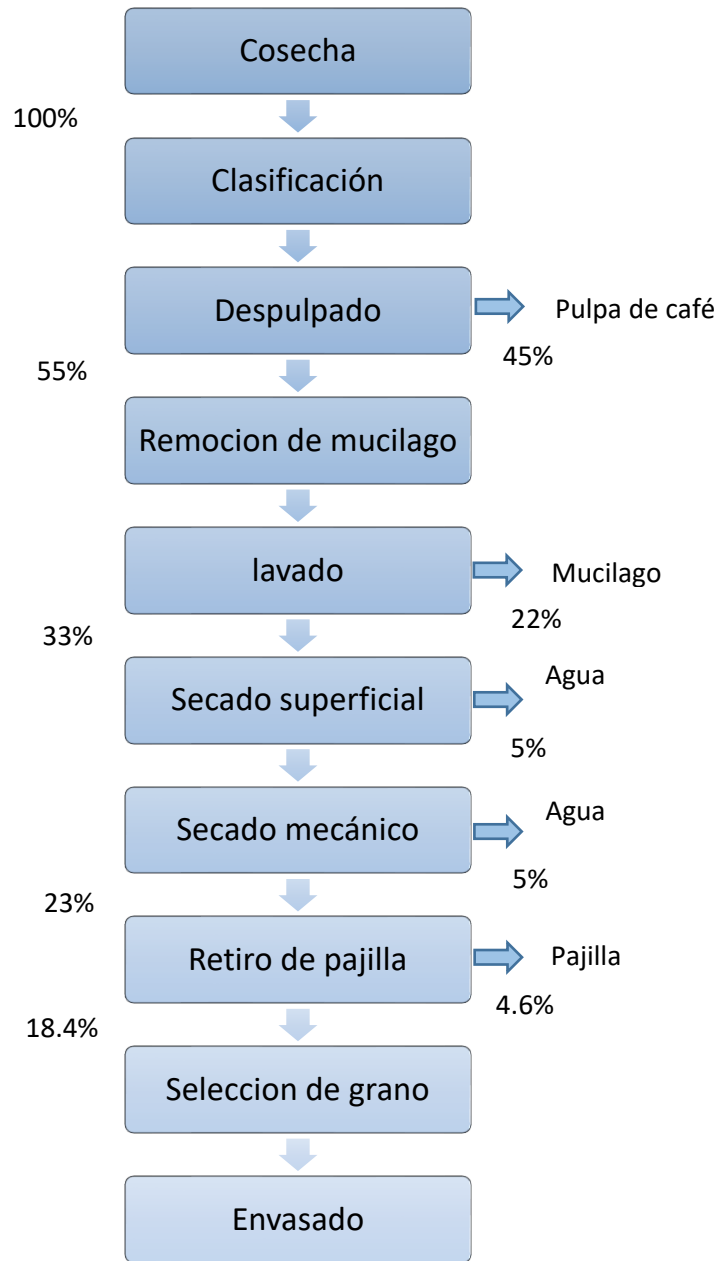


Figura 32. Estimaciones base para elaborar el balance de masa en el procesado de café

Fuente: Elaboración propia con información de [50].

La producción de café cereza en la finca Nuevo México es aproximadamente de 870 toneladas al año, y del total de este café cosechado se obtienen los siguientes residuos: aproximadamente 40.02 toneladas de cascabillo o pajilla, 191.4 toneladas de mucilago y 391.5 toneladas de pulpa [50]. En la Tabla 2 se muestran los porcentajes en peso de cada subproducto y la cantidad en toneladas de cada subproducto al año.

Tabla 2. Porcentaje en peso del fruto fresco y toneladas al año de cada subproducto de la cosecha de café en la Finca Nuevo México.

Subproducto	Porcentaje en peso del total del fruto fresco [%]	Cantidad de subproducto por año [ton/año]
Cascabillo	4.6	40.02
Mucilago	22	191.4
Pulpa	45	391.5
Agua	10	87
Café oro	18.4	160.08

Fuente: Elaboración propia a partir de [50].

Es importante señalar que los datos, como los de la Tabla 2, pueden variar de acuerdo a las condiciones y procesado del café de cada finca. Para obtener un panorama sobre los porcentajes en peso de los subproductos del procesado de café, se presenta en la Tabla 3 datos recabados tomando como referencia otras fincas y otras fuentes de información.

Tabla 3. Porcentaje en peso de los subproductos de café de la Finca Nuevo México y otras fuentes de información.

	Finca Nuevo México. Recopilado de [50]. [%]	Anacafé. Recopilado de [51]. [%]	Tesis. Recopilado de [2]. [%]	Cenicafé. Recopilado de [53]. [%]	Cenicafé. Recopilado de [54]. [%]
Cascabillo	4.6	4.5	6.1	3.5	4.2
Mucilago	22	22	11.8	21.6	14.85
Pulpa	45	40	43.2	39.4	43.58
Agua	10	ND	ND	17.1	17.1
Café oro	18.4	ND	38.9	ND	ND

Elaboración propia a partir de información de [50], [51], [2], [53], [54].

ND: Dato no disponible.

En este trabajo se utilizará como biomasa para el gasificador únicamente el cascabillo y la pulpa. Lo ideal sería también utilizar el residuo del mucilago, pero este producto no es fácil de separar del grano de café, ya que es solubilizado en agua después del fermentado [50].

En la Figura 33 se presenta la bodega de almacenamiento de la pulpa, que es retirada del grano de café después del proceso de despulpado, en la Finca Nuevo México, donde se puede observar la enorme generación de este subproducto en la producción del café.



Figura 33. Bodega donde se almacena la pulpa en la Finca Nuevo México.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 34 se presenta una muestra del cascabillo que es utilizado como combustible para el secado mecánico de los granos de café, en la finca de estudio.



Figura 34. Muestra de cascabillo utilizado para el secado mecánico.

Fuente: Elaboración propia.

El poder calorífico del cascabillo y la pulpa son:

- A) Cascabillo: $4000 \text{ kcal/kg} = 16.736 \text{ MJ/kg}$ [51].
- B) Pulpa: 15.88 MJ/kg [54].

Para obtener el poder calorífico superior de la mezcla de los dos residuos se calcula lo siguiente:

Sumando las toneladas de los dos subproductos para biomasa al año, se obtiene un total de 431.52 ton/año de cascabillo y pulpa. De este modo se obtienen a continuación los porcentajes en peso de cada subproducto del total de los dos residuos:

- a) Cascabillo: 40 ton/año de cascabillo representan el 9.27% del total de los tres residuos.
- b) Pulpa: 391.5 ton/año de cascabillo representan el 90.73% del total de los tres residuos.

Con estos porcentajes en peso de cada residuo y con el valor del poder calorífico superior de cada residuo se obtiene a continuación el poder calorífico superior del total de estos dos residuos (cascabillo y pulpa):

$$PCS = (PCS_{cascabillo})(\%en\ peso\ de\ cascabillo) + (PCS_{pulpa})(\%en\ peso\ de\ pulpa) \quad (1)$$

Sustituyendo valores se tiene:

$$PCS = \left(16.736 \frac{MJ}{kg}\right)(0.0927) + \left(15.88 \frac{MJ}{kg}\right)(0.9073) = 15.9594 \frac{MJ}{kg} \quad (2)$$

Este dato obtenido del poder calorífico superior del cascabillo y la pulpa, será usado para el modelo de la planta propuesta en la simulación con el software especializado Thermoflex 28.

Para obtener el flujo de biomasa disponible (cascabillo y pulpa) para el gasificador se considera lo siguiente: en la Finca Nuevo México se seca el 95% del café cosechado anualmente en los meses de enero, febrero y marzo. En abril y diciembre se seca el 5% restante. Con esta información se obtienen las toneladas por año de cada subproducto de la cosecha de café, considerando como temporada 1 (T1) los meses de enero, febrero y marzo, y como temporada 2 (T2) los meses de abril y diciembre. Con esta información se obtiene la Tabla 4 [50].

Tabla 4. Toneladas de cada subproducto en la temporada 1 y temporada 2

Subproducto	Cantidad de subproducto por año [ton/año]	95% de subproducto en T1 [ton/90días]	5% de subproducto en T2 [ton/61días]
Cascabillo	40.02	38.019	2.001
Mucilago	191.4	181.83	9.57
Pulpa	391.5	371.925	19.575
Agua	87	82.65	4.35
Café oro	160.08	152.076	8.004
Total	870	826.5	43.5

Fuente: Elaboración propia a partir de [50].

Los 7 meses restantes del año. donde no se lleva a cabo la cosecha de café, son considerados como temporada 3 (T3). En esta temporada se lleva a cabo la siembra de los cafetales y se aprovecha la temporada de lluvias para el riego de éstos. Debido a que no existe cosecha, la demanda de energía térmica para el secado de café y los residuos de café son nulos. En esta temporada, para aprovechar el sistema de cogeneración con gasificación, se hará operar el sistema con residuos forestales como planta eléctrica y una cogeneración parcial, solo para recuperar calor para el servicio de la ducha del personal que labora en este periodo.

En la Figura 35 se presenta una gráfica que describe la cantidad (en toneladas) promedio por día de cosecha y de biomasa de residuos de café disponible (para alimentar al gasificador), para las 3 temporadas durante un año, con base a la Tabla 4.

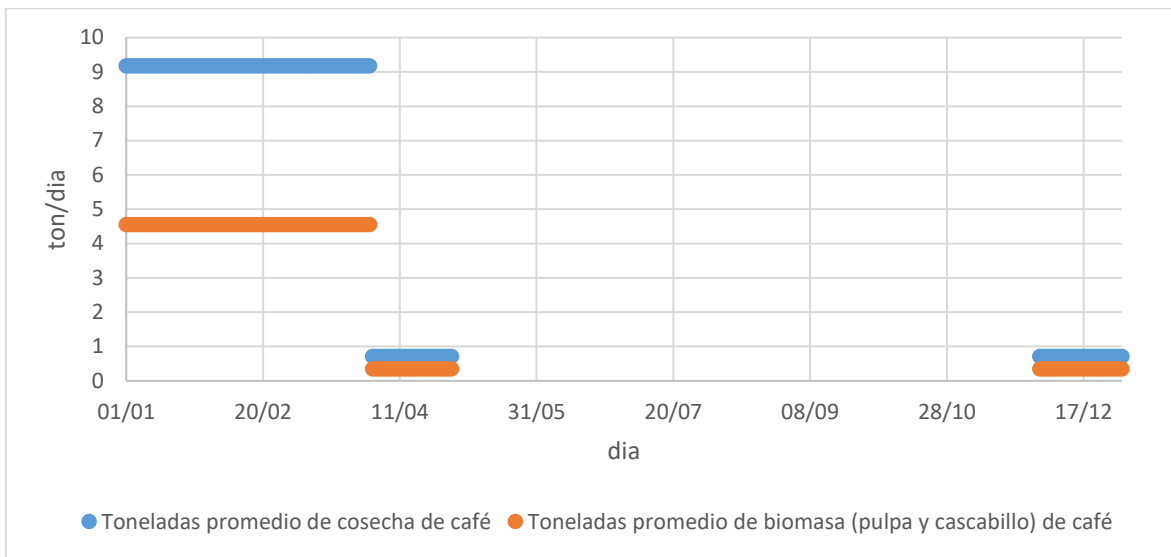


Figura 35. Toneladas promedio de cosecha de café y de biomasa de residuos de café.

Fuente: Elaboración propia con información de [50].

Con la Tabla 4 se obtienen los flujos máxicos promedio de biomasa disponible correspondientes a la suma de los subproductos de cascabillo y pulpa para la T1 y T2, tal como se muestra a continuación:

$$\dot{m}_{biomasaT1} = \left(\frac{409.944 \text{ ton}}{3 \text{ meses}} \right) \left(\frac{1000 \text{ kg}}{\text{ton}} \right) \left(\frac{3 \text{ meses}}{90 \text{ días}} \right) \left(\frac{1 \text{ día}}{24 \text{ horas}} \right) \left(\frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} \right) \left(\frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \right) \quad (3)$$

$$\dot{m}_{biomasaT1} = 0.0527 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$\dot{m}_{biomasaT2} = \left(\frac{21.576 \text{ ton}}{2 \text{ meses}} \right) \left(\frac{1000 \text{ kg}}{\text{ton}} \right) \left(\frac{2 \text{ meses}}{61 \text{ días}} \right) \left(\frac{1 \text{ día}}{24 \text{ horas}} \right) \left(\frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} \right) \left(\frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \right) \quad (4)$$

$$\dot{m}_{biomasaT2} = 0.0041 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Estos datos también serán usados para alimentar el modelo de sistema de cogeneración, para obtener la capacidad de generación de energía eléctrica y térmica, en el software especializado Thermoflex 28.

2.6. Necesidad de estudiar e implementar la cogeneración para eficientar y mejorar los costos de este sector en el país

La necesidad de estudiar e implementar la cogeneración con un gasificador, en este sector agrícola, está basada en el uso eficiente de la energía, buscando optimizar los procesos para la obtención de los requerimientos energéticos, tanto térmico como eléctrico, para el procesado de café. Ya que es fundamental tomar conciencia de la contaminación que provocan los residuos en el procesado del café, y que en varias fincas del país estos residuos no llevan un buen control para aprovechar su potencial energético. De este modo, con ayuda del presente estudio, se busca crear conciencia en la industria cafetalera para aprovechar estos residuos y eficientar la generación de energía de forma sustentable, y que además sea aplicable a cualquier sector con problemáticas similares.

México es un país con un gran potencial de generación de energía con fuentes renovables, y que necesita de frecuentes investigaciones aplicables a este tipo de generación de energía. La implementación de nuevas tecnologías sustentables es indispensable para el desarrollo del país, tanto en la industria cafetalera como en cualquier otro sector industrial. Es por ello que este trabajo es necesario para promover proyectos de ingeniería aplicables a los sectores industriales del país, buscando siempre un beneficio económico y ambiental.

2.6.1. Necesidad de energía eléctrica y térmica en el procesado de café del caso de estudio

Requerimiento Eléctrico:

Para desarrollar este punto se dispuso de información proporcionada por la Finca Nuevo México y se complementó con un levantamiento físico, tal como se mencionó anteriormente, que se realizó en las instalaciones de la finca durante una visita de una semana. Cabe mencionar que algunos datos obtenidos son empíricos otorgados por el dueño de la finca y otros fueron supuestos, ya que no se tiene el dato exacto. En ese levantamiento se monitorio el consumo y demanda con un analizador de redes y con un levantamiento de datos de placa de equipos, y una encuesta de uso al personal encargado y operadores. Algunos de estos datos como los equipos y la potencia de sus motores fueron mencionados con anterioridad, pero

en este apartado se presentan los requerimientos energéticos totales de esta finca [50].

En la Figura 36 se presenta la demanda eléctrica de la finca, con base a los datos adquiridos con el analizador de redes, el cual fue instalado para obtener la demanda eléctrica durante un día completo (martes 29 de enero de 2019). De este modo, se obtiene un consumo eléctrico para este día de 307 kWh. Con el analizador se obtiene la demanda eléctrica total con los motores de las máquinas, iluminación, una máquina eléctrica de tortillas, resistencias para regaderas, etc. En la Figura 36 se observa el pico de demanda eléctrica que es de 25.7 kW [50].

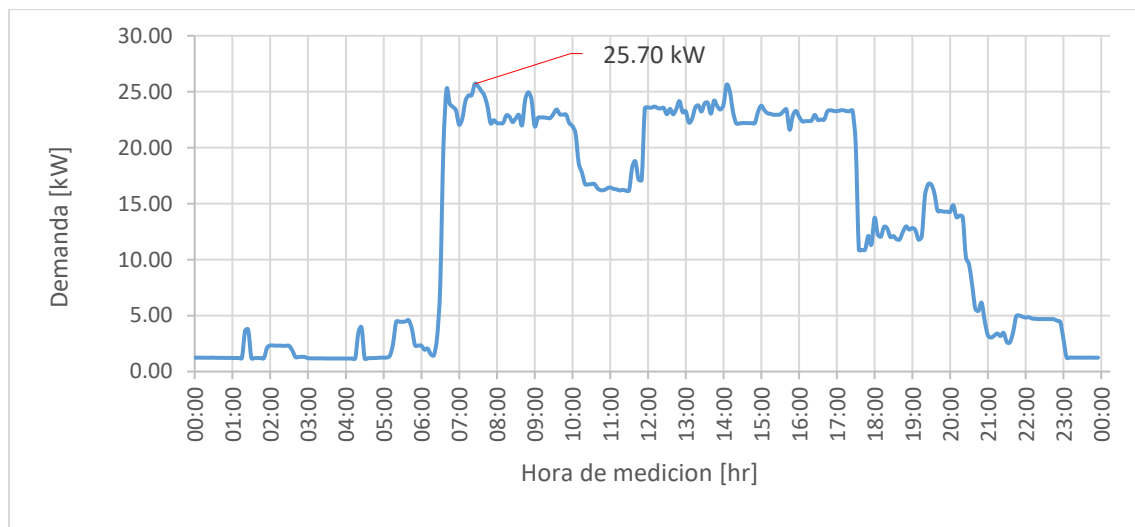


Figura 36. Demanda eléctrica en la Finca Nuevo México para el día 29 de enero de 2019.

Fuente: Elaboración propia con información de [50].

El ideal para esta medición sería poder medir un periodo de tiempo más amplio para poder reflejar el consumo y demanda típicos de los procesos durante un año, pero por limitaciones de infraestructura en la finca y disponibilidad del equipo (analizador de redes) facilitado por PAE (Proyectos de Ahorro de Energía) de la UNAM, solo es posible esta medición. Para poder realizar la proyección anual del consumo y la demanda se recurrirá a la experiencia de los encargados u operadores de la finca.

La demanda de energía eléctrica presentada anteriormente, en la Figura 36, corresponde a la T1, y se considera por información de los operadores de la finca que, durante los tres meses de la T1, la demanda eléctrica es la misma cada día. Mientras que la demanda de la T2 baja al 20% respecto a la T1. La demanda de energía, en los meses que no hay cosecha, también baja al 20% del consumo de la T1 [50].

Es importante señalar que la micro central hidroeléctrica, que tiene una capacidad de 84 kW, actualmente genera la energía eléctrica para la finca durante todo el año, las 24 horas del día, a excepción de los primeros quince días de junio, que es cuando se le da mantenimiento [50]. Esta energía de la microhidroeléctrica, una vez

que opere el sistema de cogeneración, se evaluará que se entregue a la red eléctrica o aun usuario para comercializarla, bajo el esquema que más convenga.

Requerimiento térmico:

Tal como se mencionó anteriormente en el Capítulo 2.3, al 20% del café cosechado en la finca no se le aplica los procesos de secado superficial y secado mecánico, sino más bien se lleva al proceso de secado en patios. Considerando los días de máxima producción de café en la finca, se propone que el proceso de secado mecánico, con las secadoras de tipo guardiola, se lleva a cabo a su máxima capacidad con la utilización de los tres 3 tambores rotativos (con capacidad de 30, 45 y 60 quintales de café cada uno) operando al mismo tiempo. De este modo se calcula a continuación el flujo de aire caliente requerido por los tres tambores rotativos.

Posterior al proceso de presecado con la máquina centrifugadora se considera, por información de los operadores de la finca, que en el secado mecánico el tiempo de residencia para el grano de café en las secadoras guardiolas es alrededor de 24 horas. Analizando el tambor rotativo con capacidad de 45 quintales de café, sabiendo que 1 quintal es igual a 46 kg, se tendrán 2070 kg de granos de café a secar.

La humedad del café después del beneficio húmedo y antes del presecado es estimada por los operadores de la finca en 55%, y al final del proceso de secado mecánico (con los secadores guardiola) es del 12%. Por tanto, el porcentaje de humedad retirado del grano de café en el proceso total de secado es de 43%. Tal como se mencionó anteriormente, se retira un 5% en porcentaje en peso del fruto fresco de agua en el proceso de presecado y otro 5% en el secado mecánico. Como el 43% de humedad es el total de agua a retirar del fruto fresco en el proceso total de secado (que es el 10% en porcentaje en peso del fruto fresco), entonces se va a retirar la mitad de la humedad en el presecado que sería el 21.5% de humedad, y la otra mitad se retira en el secado mecánico.

Para obtener la masa de agua a retirar del grano de café en el tambor rotativo de 45 quintales de los secadores Guardiola, se calcula lo siguiente:

$$(2070 \text{ kg})(0.215) = 445.05 \text{ kg}_{\text{agua}} \quad (5)$$

La masa de agua a retirar en 24 horas es de 445.05 kg de agua, obteniendo una masa final de café después del secado mecánico de 1624.95 kg de café seco, que es el café pergamino.

Se asume, por el tipo de caldera y estado físico que opera, una eficiencia del 75% quemando la biomasa para calentar el aire para secar el café, ya que es de tubos de humo. La altitud en la Finca Nuevo México se extrajo de la aplicación de Google Earth Pro, que fue de aproximadamente 1160 metros sobre el nivel del mar [55], y posteriormente se obtuvo la presión con ayuda del software Thermoflex 28, que fue

de 0.881486 bar. La entalpia de evaporación del agua a 0.881486 bar es de 2266.7 kJ/kg [56]. Para obtener el calor total en el aire para realizar el secado se calcula lo siguiente:

$$Q_{aire} = \left(2266.7 \frac{kJ}{kg}\right) \left(\frac{1}{.75}\right) (445.05 \text{ kg}_{agua}) = 1345059.78 \text{ kJ por día} \quad (6)$$

Para obtener el calor necesario durante 24 horas, que es el tiempo que se dejan operando los secadores, se calcula:

$$\dot{Q}_{aire} = (1345059.78 \text{ kJ}) \left(\frac{1}{24h}\right) = 56044.1575 \frac{kJ}{h} = 15.5678 \frac{kJ}{s} \quad (7)$$

Para obtener el flujo de aire caliente para secar el café, se necesita la temperatura ambiente en la finca, la cual se considera como la temperatura media para los meses correspondientes a la T1 que es de 28.33 °C (T_1) [57] y la temperatura de secado en los tambores rotativos es de 45 °C (T_2). Sabiendo que el calor específico del aire es de 1.005 kJ/kg°C [56] el flujo de aire caliente se calcula:

$$\dot{Q}_{aire} = (\dot{m}_{aire})(Cp_{aire})(T_2 - T_1) \quad (8)$$

$$\dot{m}_{aire} = \frac{\dot{Q}_{aire}}{Cp_{aire}} (T_2 - T_1) \quad (9)$$

$$\dot{m}_{aire \text{ caliente}} = \frac{15.5678 \frac{kJ}{s}}{\left(1.005 \frac{kJ}{kg^\circ C}\right) (45^\circ C - 28.33^\circ C)} = 0.929 \frac{kg}{s} \text{ aire caliente} \quad (10)$$

Este flujo másico de 0.929 kg/s de aire caliente, es el aire necesario para el secado del tambor rotativo de 45 quintales de café. Pero debido a que los tres tambores rotativos (con capacidad de 30, 45 y 60 quintales) funcionan al mismo tiempo, entonces se deben realizar los mismos cálculos para los dos tambores rotativos restantes de 30 y 60 quintales de café, y posteriormente sumar los tres flujos másicos de aire necesarios para secar el café. Los flujos másicos de aire caliente para los tambores rotativos restantes son:

Tambor rotativo de 30 quintales:

$$\dot{m}_{aire \text{ caliente}} = 0.619 \frac{kg}{s} \text{ aire caliente}$$

Tambor rotativo de 60 quintales:

$$\dot{m}_{aire \text{ caliente}} = 1.239 \frac{kg}{s} \text{ aire caliente}$$

El flujo de aire caliente total para el secado mecánico en la temporada 1 es de:

$$\dot{m}_{Total\ de\ aire\ caliente} = 2.788 \frac{kg}{s} \text{ aire caliente}$$

Este flujo másico total de aire caliente es el necesario para la capacidad máxima de secado con los tres tambores rotativos para la temporada 1.

Para la temporada 2 se realizan los mismos cálculos y parámetros, lo único que cambia es la temperatura ambiente que es la temperatura media correspondiente a los meses de la temporada 2, que es de 28.75°C. Los flujos másicos de aire caliente requeridos por los 3 tambores rotativos para la temporada 2 son:

Tambor rotativo de 30 quintales:

$$\dot{m}_{aire\ caliente} = 0.635 \frac{kg}{s} \text{ aire caliente}$$

Tambor rotativo de 45 quintales:

$$\dot{m}_{aire\ caliente} = 0.953 \frac{kg}{s} \text{ aire caliente}$$

Tambor rotativo de 60 quintales:

$$\dot{m}_{aire\ caliente} = 1.271 \frac{kg}{s} \text{ aire caliente}$$

El flujo másico total de aire caliente necesario para la capacidad máxima requerida por los tres tambores rotativos en la temporada 2 es:

$$\dot{m}_{Total\ de\ aire\ caliente} = 2.86 \frac{kg}{s} \text{ aire caliente}$$

Por otro parte, también se propone brindar agua caliente, con el sistema de cogeneración, para los trabajadores y que puede utilizarse para otros servicios. Esto es para remplazar el uso de resistencias eléctricas que es como actualmente se hace para el calentamiento de agua de las regaderas para los trabajadores, y que requieren de energía eléctrica otorgada por la micro hidráulica. La finca informa que en la temporada alta se cuenta con aproximadamente 130 trabajadores. El cálculo para estimar el flujo de agua caliente para regaderas, que puede tener una temperatura igual o mayor a 40°C debido a que este se mezcla con agua fría, se muestra a continuación.

Se tiene como dato de diseño que una regadera consume 6 litros de agua por minuto, más 10 minutos en promedio de consumo de agua por ducha. El factor de demanda usual del servicio de ducha es de 0.33. Se considera un requerimiento máximo de 100 regaderas para 130 trabajadores, por lo que el sistema podría abastecer de agua caliente a ese número de trabajadores, pero también puede aprovecharse parte de este flujo para otros servicios. Por otro lado, se considera

por simplicidad que un litro de agua equivale a un kg de agua. Con estos datos se calcula el flujo de agua caliente aproximado para duchas, en la T1 como:

$$\dot{m}_{agua\ caliente} = \frac{(consumo\ de\ diseño\ en\ 1\ ducha)(regaderas\ disponibles)}{(factor\ de\ demanda\ en\ una\ ducha)} \quad (11)$$

$$\dot{m}_{agua\ caliente} = \left(6 \frac{l}{min}\right) (100\ regaderas)(0.33) \left(\frac{1\ kg}{1\ l}\right) \left(\frac{1\ min}{60\ s}\right) = 3.3 \frac{kg}{s} \quad (12)$$

Los flujos de agua caliente, que pueden utilizarse para duchas y servicios, de las T2 y T3 se calculan con las mismas operaciones que en la T1, lo único que cambia es el número de trabajadores. En la T2 se consideran 50 trabajadores, estimando una demanda máxima de 40 regaderas, se calcula un flujo de agua caliente de 1.32 kg/s. En la T3 se consideran 30 trabajadores, estimando una demanda máxima de 20 regaderas, se calcula un flujo de agua caliente de 0.66 kg/s.

2.7. Solución a la problemática y resultados esperados con el estudio

Como ya se ha mencionado con anterioridad, este estudio consiste en aprovechar los residuos generados en el procesamiento del café para producir gas de síntesis con ayuda de un gasificador y usarlo en un moto generador, así mismo se espera obtener como resultado la mejor forma de combinar la generación eléctrica de la planta de cogeneración con la generación eléctrica de la micro central hidroeléctrica de 84 kWe para abastecer de energía eléctrica y térmica a la finca, y vender el excedente de acuerdo a los esquemas de comercialización de energía que ofrece el nuevo mercado eléctrico mexicano para las energías limpias en generación distribuida sin rebasar el límite de 499 kW, ya sea por Net Billing, Net Metering o Venta Total. Bajo la perspectiva de que el estudio de cogeneración va a competir con un sistema energético ya sustentable y con el uso de energía renovable que hace actualmente la finca.

Así mismo, se espera como resultado contribuir al cuidado del medio ambiente y promover estos proyectos, de energía limpia y eficiencia energética, en beneficio del usuario y del país. Pero también, es de suma importancia considerar los máximos beneficios económicos, recuperando la inversión del proyecto en el menor tiempo posible y posteriormente obtener ganancias durante el mayor periodo de vida del proyecto, ayudando al desarrollo de la tecnología. Además, este estudio puede servir como base y ejemplo para futuros trabajos en el mismo o diferente sector agroindustrial.

Para la implementación de este estudio se necesita del espacio suficiente para la instalación del sistema propuesto; en la Finca Nuevo México se cuenta con un área disponible, donde anteriormente estaban instalados los equipos del beneficio seco,

pero actualmente este espacio se encuentra vacío, debido a que el beneficio seco se lleva a cabo en otro lugar. Este espacio cuenta con un área aproximada de 20 metros por 10 metros (Figura 37), suficiente para la instalación del sistema de cogeneración con un gasificador.



Figura 37 Área propuesta para la instalación de la planta de cogeneración con gasificador.

Fuente: Elaboración propia.

2.8. Conclusión

Con base al estudio realizado en este capítulo se sabe que la producción de café es una gran fuente de ingresos en México, especialmente para el estado de Chiapas que es el mayor productor de café en el país. La producción de café depende de ciertos requerimientos energéticos, que pueden variar para cada finca cafetalera. En el presente capítulo se logró caracterizar los requerimientos energéticos del proceso productivo de la Finca Nuevo México, así como conocer sus procesos de producción y su maquinaria para poder visualizar con más precisión como podría diseñarse el sistema de cogeneración. Uno de los resultados indispensables de este capítulo es la cantidad de residuos generados en el procesamiento del café y que serán utilizados como biomasa para un gasificador. Al final del presente capítulo se tienen los datos necesarios para proponer y modelar la planta de cogeneración con gasificador que más convenga a esta finca.

Capítulo 3. Propuesta del sistema de cogeneración con gasificación

Introducción

En esta sección, con base en información ya obtenida, se selecciona la tecnología de aprovechamiento de los residuos generados en el procesamiento de café, y la tecnología de generación eléctrica y térmica, que más se adapte a las necesidades de la finca en estudio, señalando las ventajas que ofrecen las tecnologías seleccionadas. Posteriormente se muestra el diseño conceptual de operación, donde se describen las consideraciones y propuestas que se implementan en las tres temporadas del año, así como la estructura de operación del sistema propuesto en conjunción con la micro central hidroeléctrica. Ulteriormente, con los recursos energéticos disponibles, características de operación de los procesos de producción y los requerimientos térmicos y eléctricos de la finca, se presenta el modelado y simulación de la propuesta de la planta de cogeneración con gasificador, en el software Thermoflex 28, para los diferentes datos de cada temporada, obteniendo así los parámetros de operación y desempeño de las simulaciones.

3.1. Selección de la tecnología de aprovechamiento de residuos y de cogeneración

Tomando como referencia la investigación realizada sobre los antecedentes de este trabajo, específicamente del Capítulo 1.3.2, se toman en consideración a tres tecnologías de aprovechamiento de biomasa para utilizar los residuos de café del caso de estudio. Estas tecnologías son: combustión directa, biodigestor y gasificador. Después de analizar la investigación de estas tecnologías, la mejor tecnología para este estudio es el gasificador debido a las siguientes ventajas [58]:

- Bajos costos en el combustible primario.
- El combustible utilizado está disponible localmente.
- Permite generar bajos niveles de emisiones.
- Disposición eficiente de desechos, como los agrícolas, que generalmente son incinerados al aire libre o desechados al medio ambiente.
- Aumento en la competitividad agroindustrial.
- Reducción de la utilización de productos derivados del petróleo.
- Reducción del impacto ambiental por contaminación.
- Producción de combustible para generar energía eléctrica y térmica.
- La tecnología de un gasificador puede ofrecer mejores ventajas, como más eficiencia energética en el procesamiento de los residuos de la biomasa, que un biodigestor.

Con base en información recabada y debido a las características de la planta, como la baja capacidad de generación de energía, se propone emplear un gasificador de lecho fijo de flujo descendente (“Downdraft”). Se podrían considerar los gasificadores de la marca Ankur Scientific, de la serie COMBO, proveniente de la India. Estos gasificadores brindan flexibilidad para usar biomasa fina (residuos de café) y leñosa (residuos forestales), pero no juntas, ya que se usa alternativamente con un cambio simple en el proceso, [59] [60] [61].

En la gasificación las partículas del combustible se queman parcialmente para formar una mezcla de gases: CO, H₂, H₂S+CO₂, CH₄, CO₂, con partículas inquemadas, que es el gas de síntesis. Este gas pasa por un sistema de limpieza para su incorporación a ciclos de potencia, esquemas de cogeneración, procesos de refinación de petróleo, etc., [62]. Entre los sistemas de cogeneración que pueden emplearse, y que fueron mencionados en el Capítulo 1.4.2 de este trabajo, se encuentran: con motor de gas, con turbina de gas, con turbina de vapor, en ciclo combinado con turbina de gas y vapor, con motor de gas y turbina de vapor.

Analizando las diferentes opciones mencionadas anteriormente para aplicar cogeneración, se selecciona como mejor opción, para la Finca Nuevo México, al sistema de cogeneración con un motor de combustión interna de gas, debido a las siguientes ventajas [63]:

- Tecnología bien conocida y probada
- Altamente confiables
- De fácil mantenimiento
- Encendido rápido
- Buen desempeño ante fluctuaciones de carga
- Bajo impacto ambiental
- Se pueden adaptar para diversos proyectos
- Costos de inversión menores en que una turbina de gas o un ciclo combinado

El sistema de cogeneración con un motor de combustión interna de gas se propone sea similar, en términos generales, al sistema de cogeneración presentado en la Figura 38. Este esquema consta de un generador de corriente eléctrica (1), un motor de combustión (2) y un recuperador de calor de los gases de escape generados por el motor (3). El motor de combustión arrastra al generador, que frecuentemente es un alternador. El agua de refrigeración del circuito primario extrae el calor de las unidades anteriores y lo cede a un circuito secundario, para cubrir la demanda de calor requerida, a través de otro intercambiador de calor (4). Una bomba hace circular el agua del circuito primario [64].

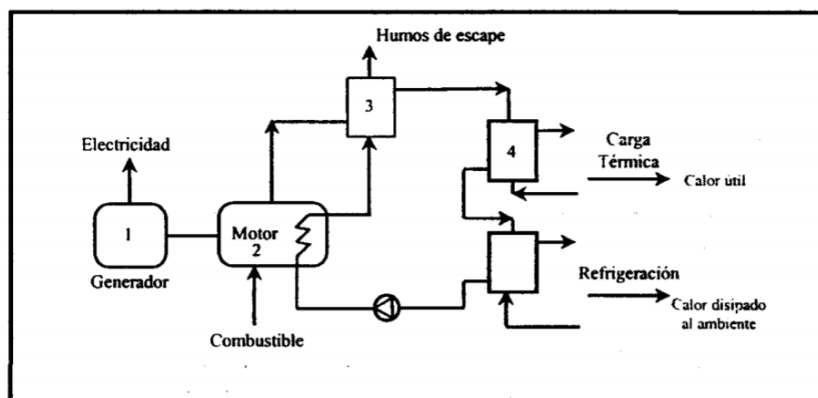


Figura 38. Sistema de Cogeneración con motor de combustión interna.

Fuente: Extraído de [64].

El motor de gas, para el sistema de cogeneración propuesto, fue seleccionado de la librería del software Thermoflex 28. La marca de este motor es Waukesha modelo VHP-8003 con una potencia nominal de 360 kW.

3.2. Diseño conceptual de operación de la planta

Hasta este punto se han obtenido y calculado los datos necesarios para el diseño del sistema de cogeneración con un gasificador, así como las tecnologías para el aprovechamiento de los residuos de café (gasificador, *se escoge esta tecnología porque ofrece más eficiencia y flexibiliza a más opciones la selección del primotor a usar en el esquema de cogeneración*) y generación de energía eléctrica y térmica (cogeneración con un motor de combustión interna a gas, *mejor que una turbina de gas, por su mejor costo y mejor eficiencia en esta capacidad*).

Es importante señalar que algunos parámetros de operación, del sistema propuesto, cambiarían con base a las tres temporadas que anteriormente fueron mencionadas en el Capítulo 2.5, las cuales son: temporada 1 (T1) los meses de enero, febrero y marzo, como temporada 2 (T2) los meses de abril y diciembre, y como temporada 3 (T3) los meses restantes del año (donde no hay cosecha, se realiza la siembra de los cafetales y se aprovecha la temporada de lluvias para el riego). En la T1 se realiza el 95% de la cosecha anual, en la T2 el 5% anual restante y en la T3 no existe la cosecha. La cosecha inicia en el mes de diciembre y termina en abril.

Biomasa requerida por el sistema propuesto

En la T1 se cuenta con la biomasa necesaria, de residuos de café, para alimentar al sistema de cogeneración con gasificador que alcanza para hacer funcionar a un motor de combustión interna de gas con capacidad nominal de 360 kW y con 316 kW de capacidad real en sitio (debido a las condiciones en sitio) durante las 24 horas del día en toda la T1.

Debido a que en la T3 no se cuenta con residuos de café, se propone tener trabajadores que recolecten residuos forestales para alimentar al gasificador y hacer funcionar el sistema de cogeneración a su máxima capacidad. Dentro de los residuos forestales se podrían considerar los residuos de las podas y mantenimiento de los cafetales.

En la T2 se genera una cantidad de residuos de café muy baja, en la cual, si se acumulara toda la biomasa generada durante los dos meses de T2, apenas alcanzaría para hacer funcionar aproximadamente 4.7 días al sistema de cogeneración a su máxima capacidad, considerando que el sistema trabaje las 24 horas del día durante las 3 temporadas. Por esta razón se pueden considerar dos propuestas:

- 1) Recolectar residuos forestales a finales del último mes de la T1 (mes de marzo) y utilizar esta biomasa para el arranque del sistema de cogeneración al inicio del mes de abril (mes correspondiente a la T2) y seguir utilizando esta biomasa durante este mes para hacer funcionar al sistema de cogeneración a su máxima capacidad. Y en los últimos dos días de abril, utilizar los residuos de café acumulados en este mes, y para el mes de mayo (correspondiente a la T3 donde no hay cosecha) utilizar nuevamente residuos forestales durante toda la T3. Para el mes de diciembre (correspondiente a la T2) donde empieza la cosecha, seguir utilizando residuos forestales y terminado el mes utilizar el residuo de café acumulado para el arranque del sistema de cogeneración en el mes de enero correspondiente a T1. Con este planteamiento, se pretende no almacenar la biomasa de café generada en abril durante toda la T3 y el mes de diciembre.
- 2) Recolectar residuos forestales a finales del último mes de la T1 y utilizar esta biomasa para el arranque del sistema de cogeneración al inicio abril hasta finales de diciembre. Y utilizar el residuo de café acumulado, durante la T2, para los últimos días de diciembre y para el arranque del sistema de cogeneración en el mes de enero de la T1.

La selección de cualquiera de las dos propuestas anteriores dependerá de la operación del sistema propuesto que más convenga a la finca en estudio, y deberán ser autorizados y aceptados por la finca. La idea central de estas propuestas es aprovechar la infraestructura de cogeneración para operar el mayor tiempo posible, dado que el mercado eléctrico ofrece la posibilidad de que toda la energía generada sea comercializada vía esquemas legales en México para sistemas menores a 500 kW y con energía limpia: Net Metering, Net Billing o venta total, dependiendo del esquema correspondiente para este proyecto, así como las CELs.

Generación de energía eléctrica por el sistema propuesto

Anteriormente, en la Figura 36 se presentó la demanda eléctrica en la finca durante un día medida con analizar de redes, correspondiente a la T1, y se considera igual para todos los días de la T1. La demanda eléctrica de la T2 baja al 20% respecto a la T1 según información proporcionada por la finca. La demanda eléctrica para las

T2 y T3 se considerada igual, ya que en la T2 se realiza una cosecha mínima de café lo que provoca un consumo mínimo de electricidad, prácticamente igual a T3.

Tal como se mencionó anteriormente, con base en el flujo de residuos de café disponible en la T1, el sistema propuesto alcanzaría para hacer funcionar un motor de 316 kW de capacidad real en sitio, sin considerar perdidas por consumo de auxiliares de la planta. La Finca Nuevo México cuenta con una micro hidráulica de 84 kW de potencia, la cual no funciona a su factor de planta total debido a que no lo requiere el propio auto consumo eléctrico de la finca. Por tal razón se plantea tener la micro hidráulica a su máximo factor de planta y vender en el Sistema Eléctrico Nacional la energía eléctrica generada en su totalidad; y con el sistema de cogeneración propuesto se proveerá la energía eléctrica y térmica requerida por la Finca Nuevo México, e igualmente, se pretende vender la energía eléctrica excedente del sistema de cogeneración eficiente al Sistema Eléctrico Nacional. Ambas son limpias, ambas generan CELs y ambas pueden optar por los esquemas de generación distribuida.

Generación de energía térmica por el sistema propuesto

Con respecto a la demanda de energía térmica para el secado de café en la T2, se considera igual que en la T1 para mantener la capacidad máxima de producción de aire caliente para el secado de café, con los tres tambores rotativos. En la T3 la demanda de energía térmica para el secado de café será nula, ya que no se lleva a cabo la cosecha de café.

Con relación a la generación de agua caliente por el sistema de cogeneración, para duchas y servicios, esta varía de acuerdo con el número de trabajadores que laboran en la finca para cada temporada.

3.3. Modelado y simulación del sistema

Se realizarán cuatro simulaciones, en el software Themoflex 28 del sistema de cogeneración con gasificación para las tres temporadas, con base en los requerimientos energéticos, el flujo de biomasa disponible y los parámetros de diseño en sitio (temperatura ambiente, altitud y humedad en la zona propuesta).

Simulación para la T1 con residuos de café

La humedad relativa promedio (78.33 %) y la temperatura promedio (28.33 °C) fueron calculadas de la estadística en la zona donde se encuentra la Finca Nuevo México para los meses de la T1 [57] [65]. La altitud en la zona de la finca es de 1160 metros sobre el nivel del mar [55].

El flujo promedio de residuos de café disponible calculado para esta temporada es de 0.0527 kg/s con un poder calorífico superior de 15.96 MJ/kg.

Requerimientos energéticos:

- El pico de la demanda de energía eléctrica requerida es de 25.7 kWe, con base en la Figura 36, el excedente se venderá al Sistema Eléctrico Nacional.
- El flujo de aire caliente calculado a capacidad máxima para el secado de café con los tres tambores rotativos en la T1 es de 2.788 kg/s a 45°C. Se considera un flujo de aire caliente de 4 kg/s y a 50°C para que exista un margen de ajuste en operación. Además, en virtud de que la Finca Nuevo México tiene planes de aumentar su capacidad de producción, con este flujo alcanzaría para un tambor rotativo adicional de 45 quintales, puesto que al sumar el flujo de aire requerido por los tres tambores rotativos (2.788 kg/s) más el flujo de aire requerido por el tambor rotativo adicional de 45 quintales (0.929 kg/s) se obtiene un flujo total de 3.717 kg/s. Y si se sumara el flujo de aire caliente requerido por un tambor rotativo de 60 quintales (1.239 kg/s) se obtendría un flujo total de aire caliente requerido de 4.027 kg/s el cual podría ser abastecido con el sistema propuesto.
- El flujo de agua caliente para 100 duchas calculado es de 3.3 kg/s a 40°C, considerando 130 trabajadores en la T1. Se propone que el flujo de agua caliente sea más grande, para que exista un margen de reserva en la operación. Este flujo también se puede utilizar para otros servicios.

En la Figura 39 se presenta un diagrama de bloques que describe la estructura de operación del sistema propuesto en conjunción con la micro central hidroeléctrica. Esta estructura se modela y simula su operación en el software Thermoflex 28, solo para el sistema de cogeneración con gasificador para la T1 con residuos de café.

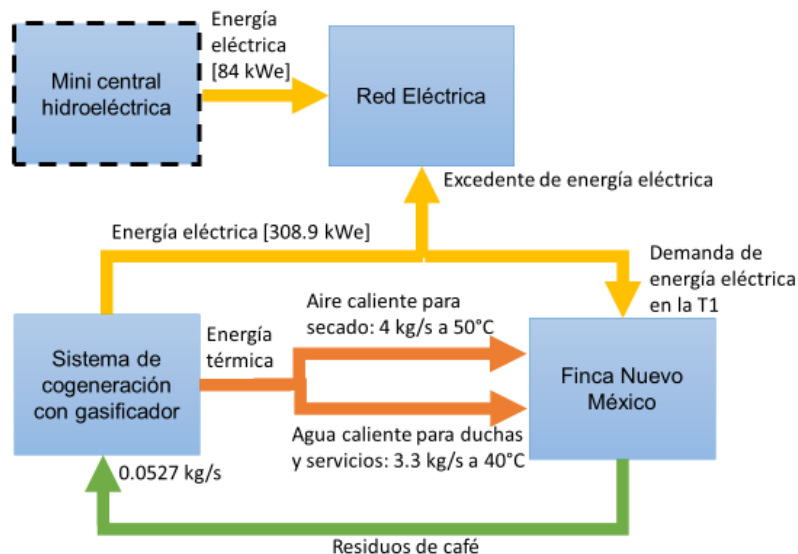


Figura 39. Diagrama de bloques que describe la estructura de operación del sistema de cogeneración con gasificador para la T1 (con residuos de café) en conjunción con la micro central hidroeléctrica.

Fuente: Elaboración propia.

En el Anexo 1 se muestra el modelado y la simulación del sistema de cogeneración con gasificador para la T1 (con residuos de café). El gasificador (equipo 8) es alimentado por un flujo de residuos de café de 0.0552 kg/s, el cual tiene una muy pequeña variación con el flujo promedio de biomasa de café calculado. El gasificador también requiere un flujo de agua (flujo 42) y uno de aire (flujo 9) para su funcionamiento, teniendo como producto energético al combustible (syngas) que hace funcionar al motor de combustión interna de gas.

El flujo de combustible (flujo 12) sale a alta temperatura (900°C) y pasa por un limpiador de gases (equipo 10), posteriormente pasa por un intercambiador de calor (equipo 13) para aprovechar la energía térmica contenida en este flujo de combustible. De este modo se obtiene un aumento de temperatura en el flujo 36, el cual, después de adquirir energía térmica en este intercambiador, se combina con el flujo 6 en el mezclador (equipo 33) que se encuentra antes de la entrada al economizador (equipo 3). El combustible sale del intercambiador de calor (equipo 13) a 200°C para hacer funcionar al motor de combustión interna de gas de 316 kW de potencia real con la altitud en la finca (equipo 1).

El motor de combustión interna requiere de un sistema de enfriamiento (equipos 18, 16, 2, 40, 17, 20), del cual se aprovecha la energía térmica generada para aumentar la temperatura del flujo 35 (en el equipo 16), este flujo se mezcla después con el flujo 37 (en el equipo 33). Posteriormente, el flujo 39, que sale del mezclador, entra al economizador. Los gases de combustión generados por el motor (flujo 10) pasan por el economizador, para aumentar la energía térmica del flujo 39, y posteriormente salen por la chimenea (equipo 4).

El flujo de agua que sale del economizador se divide en dos flujos (en el equipo 39):

- El flujo 29 está destinado como calor a proceso para el calentamiento de aire a fin del secado de café (en el equipo 21). El equipo 21 puede ser considerado como un intercambiador de calor, en el cual se busca obtener aire caliente. Previamente se obtuvo, con el software Thermoflex 28, el flujo y la temperatura de agua de entrada (de 2.25 kg/s y 80°C respectivamente) y la temperatura de agua de salida (de 70°C) aproximados que se requieren para obtener un flujo estimado de aire caliente de 4 kg/s a 50°C, en un intercambiador de calor. Estos son cálculos estimados, por lo tanto, pueden variar un poco en las simulaciones y ajustarse en la operación real de sistema. De esta manera, se tiene un flujo de agua caliente (para obtener el flujo de aire requerido) de 2.25 kg/s a 79.99°C con una temperatura de retorno de 65 °C, en esta simulación.
- El flujo 45 pasa por un intercambiador de calor (equipo 22) para aumentar la temperatura del segundo flujo (flujo 33) que entra al intercambiador, el cual va destinado hacia calor a proceso (en el equipo 29) para duchas y servicios. Este flujo se calculó de 3.3 kg/s a 40 °C para 100 regaderas. Dicho flujo también es estimado y puede variar un poco en las simulaciones y ajustarse

en la operación real, debido a que este se mezcla con agua fría. De este modo, se tiene un flujo de agua caliente de 3.516 kg/s a 40.02 °C para duchas y servicios, en esta simulación.

Más adelante, los dos flujos antes mencionados (flujo 29 y flujo 45), son mezclados y separados nuevamente en otros dos flujos, en el equipo 12, que son: el flujo 32 es utilizado para suministrar el agua requerida por el gasificador. Y el flujo 11 es separado, en el equipo 32, en dos flujos:

- El flujo 35 que pasa por un intercambiador de calor (equipo 16), en el sistema de enfriamiento del motor, para adquirir energía térmica antes de mezclarse con el flujo 37 en el equipo 33.
- El flujo 36 que se dirige a un intercambiador de calor (equipo 13), en el cual pasa el combustible a alta temperatura producido por el gasificador, para adquirir energía térmica antes de unirse con el flujo 6 en el equipo 33.

Una vez que estos dos flujos salen del mezclador (equipo 33) se dirigen nuevamente al economizador para repetir el ciclo (véase Anexo 1).

Simulación para la T2 con residuos de café

Tal como se mencionó a detalle anteriormente, se plantean dos propuestas sobre la manera de utilizar los residuos de café en la T2 (temporada donde se genera una escasa cantidad de residuos de esta biomasa) en las que se pretende utilizar residuos forestales para mantener en funcionamiento al sistema de cogeneración reemplazando la carencia del residuo de café. La primera propuesta es utilizar en dos partes los residuos de café generados, acumulando los residuos generados por cada mes y utilizarlos al final de cada uno. La segunda es almacenar, durante toda la T2, los residuos de café generados y utilizarlos hasta el final del último mes de esta temporada (diciembre). La finca empleará la propuesta que más le convenga, y para cualquiera de las dos propuestas se realizan dos simulaciones para la T2: una utilizando residuos de café y la otra utilizando residuos forestales, tomando el mismo esquema del modelo del sistema de cogeneración con gasificador de la T1.

La humedad relativa promedio (78%) y la temperatura promedio (28.75°C) fueron calculadas de la estadística en la zona donde se encuentra la Finca Nuevo México para los meses de la T2 [57] [65].

Se toma el mismo flujo de residuos de café de la T1 de 0.0527 kg/s para mantener el sistema de cogeneración con gasificador a su máxima capacidad. Tal como se mencionó precedentemente, con este flujo de residuos de café generado en la T2, solo alcanzaría para hacer funcionar al sistema aproximadamente 4.7 días.

Requerimientos energéticos:

- La demanda eléctrica requerida en la T2 baja al 20% respecto a la T1. Por tal motivo, el pico de la demanda eléctrica sería de 5.14 kW (el excedente de energía eléctrica se venderá al Sistema Eléctrico Nacional).
- El flujo de aire caliente calculado a capacidad máxima para el secado de café con los tres tambores rotativos en la T2 es de 2.86 kg/s a 45°C. Se propone un flujo de aire caliente de 4 kg/s y a 50°C para que exista un margen de ajuste en operación. El flujo de aire caliente para el secado de café en la T2 se considera el mismo que en la T1 para mantener al sistema de secado de café a su máxima capacidad.
- El flujo de agua caliente para 40 regaderas calculado es de 1.32 kg/s a 40°C, considerando 50 trabajadores para la T2. Se propone que el flujo de agua caliente sea más grande para que exista un margen de reserva de agua en la operación para duchas y servicios.

A continuación, en la Figura 40 se presenta un diagrama de bloques que describe la estructura de operación del sistema propuesto en conjunción con la micro central hidroeléctrica. Esta estructura se modela y simula, en el software Thermoflex 28, solo para el sistema de cogeneración con gasificador para la T2 con residuos de café.

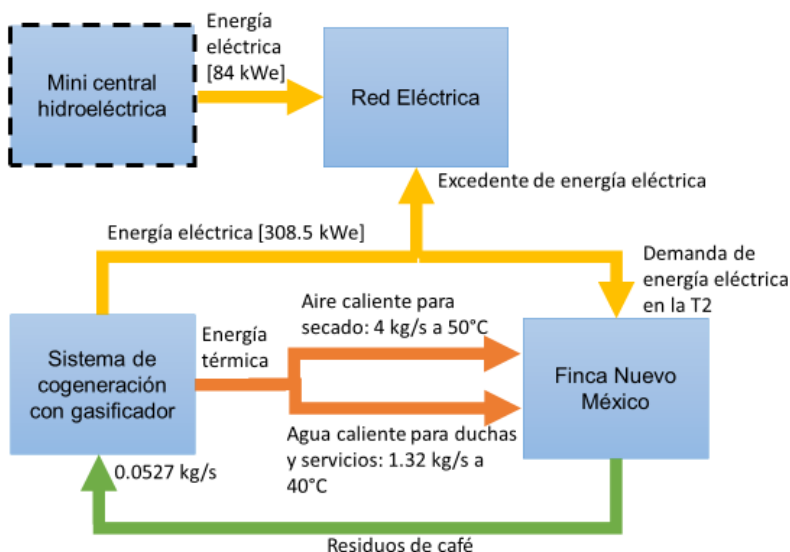


Figura 40. Diagrama de bloques que describe la estructura de operación del sistema de cogeneración con gasificador para la T2 (con residuos de café) en conjunción con la micro central hidroeléctrica.

Fuente: Elaboración propia.

En el Anexo 2 se presenta la simulación del sistema de cogeneración con gasificador, teniendo como biomasa a los residuos de café, para la T2. La descripción del modelo es semejante a la descrita anteriormente para la simulación de la T1, solo cambian los datos del flujo de agua caliente para duchas y servicios.

Simulación para la T2 con residuos forestales

La humedad relativa promedio (78%) y la temperatura promedio (28.75°C) fueron calculadas de la estadística en la zona donde se encuentra la Finca Nuevo México para los meses de la T2 [57] [65], que son los mismos que en la simulación anterior.

El flujo de la biomasa (residuos forestales) requerido para mantener el sistema de cogeneración con gasificador a su máxima capacidad fue calculado por el software Thermoflex, el cual es de 0.1226 kg/s. Esta biomasa se encuentra en la librería del software Thermoflex 28, con un poder calorífico superior de 10.301 MJ/kg.

Requerimientos energéticos (son los mismos que en la simulación anterior):

- El pico de la demanda eléctrica sería de 5.14 kW (el excedente de energía eléctrica se venderá al Sistema Eléctrico Nacional).
- El flujo de aire caliente para el secado de café es 4 kg/s y a 50°C para mantener el sistema de secado de café a su máxima capacidad.
- El flujo de agua caliente para 40 regaderas calculado es de 1.32 kg/s a 40°C. Se propone que el flujo de agua caliente sea más grande para que exista un margen de reserva en la operación para duchas y servicios.

A continuación, en la Figura 41 se presenta un diagrama de bloques que describe la estructura de operación del sistema propuesto en conjunción con la micro central hidroeléctrica. Esta estructura se modela y simula, en el software Thermoflex 28, para el sistema de cogeneración con gasificador para la T2 con residuos forestales.

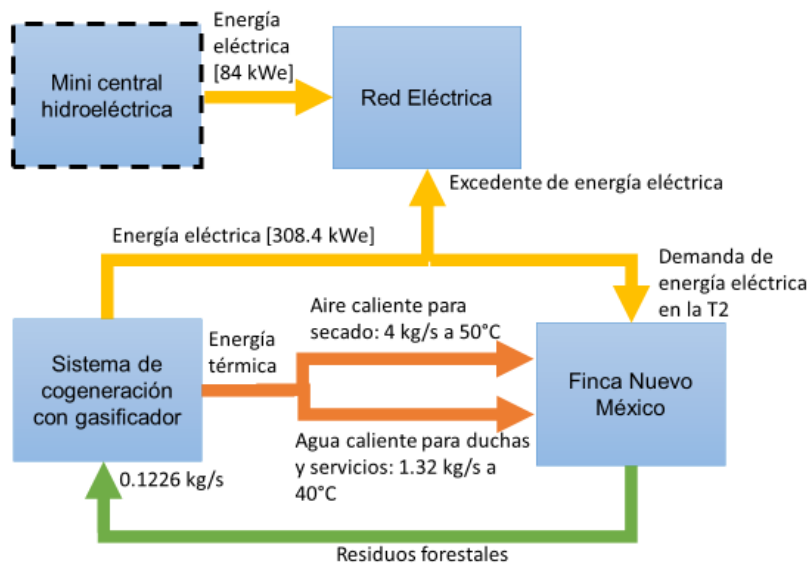


Figura 41. Diagrama de bloques que describe la estructura de operación del sistema de cogeneración con gasificador para la T2 (con residuos forestales) en conjunción con la micro central hidroeléctrica.

Fuente: Elaboración propia.

En el Anexo 3 se presenta la simulación del sistema de cogeneración con gasificador, para la T2, tomando como biomasa a los residuos forestales. La descripción del modelo es prácticamente la misma que la descrita en la simulación de la T1, a excepción de: el tipo y flujo de biomasa, una ligera disminución en la temperatura del flujo de entrada para la obtención de aire caliente para el secado (la cual no afecta en la operación real), así como también, los datos del flujo de agua caliente para duchas y servicios.

Simulación para la T3 con residuos forestales

La humedad relativa promedio (78.57%) y la temperatura promedio (28.64°C) fueron calculadas de la estadística en la zona donde se encuentra la Finca Nuevo México para los meses de la T3 [57] [65].

Se retoma el flujo de biomasa de la simulación anterior, simulación de la T2 con residuos forestales, para conservar el sistema de cogeneración con gasificador a su máxima capacidad. Este flujo es de 0.1226 kg/s de residuos forestales.

Requerimientos energéticos:

- La demanda eléctrica requerida en la T3 baja al 20% respecto a la T1. Debido a lo cual, el pico de la demanda eléctrica sería de 5.14 kW (del mismo modo, el excedente de energía eléctrica se venderá al Sistema Eléctrico Nacional).
- El flujo de aire caliente requerido para el secado de café es nulo, debido a que no existe cosecha en esta temporada.
- El flujo de agua caliente para 20 regaderas calculado es de 0.66 kg/s a 40°C, considerando 30 trabajadores en la T3. De igual manera, se propone que el flujo y temperatura de agua caliente para duchas, sea mayor para que exista un margen de ajuste en operación.

En la Figura 42 se presenta un diagrama de bloques que describe la estructura de operación del sistema propuesto en conjunción con la micro central hidroeléctrica, cabe señalar que, la energía eléctrica, proveniente del sistema de cogeneración, es la generación de energía neta (considerando el consumo de auxiliares de la planta). Esta estructura se modela y simula, en el software Thermoflex 28, para el sistema de cogeneración con gasificador para la T3 con residuos forestales.

En el Anexo 4 se presenta la simulación del sistema de cogeneración con gasificador para la T3, con residuos forestales. La descripción del modelo para la T3 es similar a la simulación de la T1, a excepción de: el tipo y flujo de biomasa, los datos del flujo de agua caliente para duchas y servicios, además, en esta simulación (Anexo 4) se mantiene cerrada la válvula (equipo 46) que permite el paso del flujo que va dirigido a proceso para el secado de café, debido a esto, los gases de combustión salen del motor a una temperatura más alta, hacia la chimenea, que en los modelos anteriores.

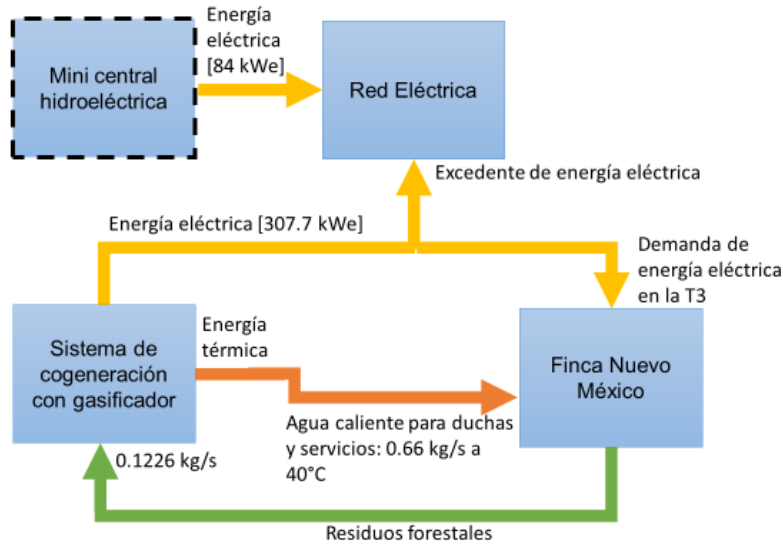


Figura 42. Diagrama de bloques que describe la estructura de operación del sistema de cogeneración con gasificador para la T3 (con residuos forestales) en conjunción con la micro central hidroeléctrica.

Fuente: Elaboración propia.

Los parámetros de operación y desempeño de cada una de las simulaciones se presentan a continuación en la Tabla 5.

Tabla 5. Parámetros de operación y desempeño recuperados de los modelos en el software Thermoflex 28.

Temporada	T1	T2		T3
Nombre del combustible (biomasa)	Residuos de café	Residuos de café	Residuos forestales	Residuos forestales
Altitud del sitio [m]	1160	1160	1160	1160
Temperatura ambiente [°C]	28.33	28.75	28.75	28.64
Humedad relativa [%]	78.33	78	78	78.57
Consumo de auxiliares [kW]	7.103	7.54	7.64	8.284
Emisiones de CO ₂ [ton/año]	2540.8	2540.8	3367	3367
Potencia bruta [kW]	316	316	316	316
Potencia neta [kW]	308.9	308.5	308.4	307.7
Eficiencia de cogeneración [%]	67.48	67.21	66.74	42.65
Eficiencia eléctrica bruta (LHV) [%]	38.91	38.91	30.02	30.02
Régimen térmico bruto (LHV) [kJ/kWh]	9252	9252	11994	11994
Eficiencia eléctrica neta (LHV) [%]	38.04	37.98	29.29	29.23
Régimen térmico neto (LHV) [kJ/kWh]	9465	9478	12291	12317
Energía neta de entrada de combustible (LHV) [kW]	812.1	812.1	1052.8	1052.8

Elaboración propia con resultados de Thermoflex 28.

LHV: (Low Heat Value). Poder calorífico inferior.

Algunas de las principales ecuaciones que se resuelven en Thermoflex 28 y cómo las resuelve, se muestran en el Anexo 5. Por otra parte, los parámetros de operación del motor y del gasificador para la T1 se muestran en el Anexo 6 y en el Anexo 7 respectivamente, estos parámetros son similares a los de las otras temporadas, pero con sus respectivos factores.

3.4. Conclusión

Al inicio de este capítulo, se seleccionaron las tecnologías de cogeneración y aprovechamiento de biomasa más convenientes para el sistema propuesto. El propósito principal de este capítulo fue modelar y simular la planta de cogeneración con un gasificador, para la Finca Nuevo México, con ayuda del software especializado Thermoflex 28. Se realizaron múltiples modelados y simulaciones para obtener el sistema, de cogeneración con un gasificador, óptimo para los requerimientos energéticos demandados y los residuos de café generados por la finca en estudio. Cabe señalar que, la biomasa fundamental de este trabajo son los residuos de café, pero también se tomó en consideración a los residuos forestales como biomasa, para mantener al sistema propuesto en funcionamiento durante los días en los que no se cuenta con la generación de residuos de café. El modelo final, del sistema de cogeneración con un gasificador, se muestra en el presente capítulo, del cual se realizaron 4 simulaciones, que dependen de los parámetros de operación y requerimientos de la finca para las 4 temporadas de cosecha de café durante el año. Finalmente, el principal objetivo de este capítulo fue completado satisfactoriamente, y gracias a que el software Thermoflex 28 calcula los balances de masa y energía, se pudieron obtener los parámetros de desempeño del sistema propuesto para cada simulación.

Existe un considerable excedente de energía eléctrica (generado por el sistema propuesto), el cual se pretende vender a la red eléctrica junto con la energía generada por la micro central hidroeléctrica, este excedente de energía es considerado como ingresos para la parte económica de este trabajo. Al final de este capítulo, se cuenta con determinados datos requeridos para abordar el siguiente apartado, correspondiente al análisis económico y financiero.

Capítulo 4. Análisis económico y financiero

Introducción

En este apartado se presenta la evaluación económica y financiera de la propuesta del sistema de cogeneración con gasificador, el cual está adaptado a la finca de café del caso de estudio, teniendo como combustible a los residuos de café y residuos forestales. La evaluación económica y financiera se lleva a cabo con base en algunos parámetros de operación y desempeño de los modelos correspondientes a las tres temporadas, analizando dos escenarios, con la finalidad de contar con los criterios necesarios para la toma de decisiones sobre este proyecto.

La planta de cogeneración con gasificación propuesta en este estudio lleva consigo un gran desafío económico al competir con un sistema ya sustentable que se tiene en la Finca Nuevo México. Esta finca cuenta actualmente con el aprovechamiento de residuos de café para alimentar a una caldera, y de este modo cubrir su demanda térmica en el proceso de secado de café. Por otra parte, cuenta con un micro central hidroeléctrica, la cual no opera a su máxima capacidad, para cubrir su demanda eléctrica. Con el presente proyecto, se propone la planta CHP con gasificación para cubrir la demanda eléctrica y térmica, y vender su excedente eléctrico a la red, pero también, que la micro hidroeléctrica opere a su máxima capacidad para vender su energía generada a la red. En la Figura 43 se presenta esquemáticamente la manera en la que opera actualmente la Finca Nuevo México sin el presente proyecto. En la Figura 44 se presenta un esquema con el proyecto propuesto para esta finca. Y en la Figura 45 se muestra un esquema que comprende a una finca convencional, en la que se tienen costos por consumo de combustible fósil (para el proceso de secado) y por consumo de energía eléctrica de la red.

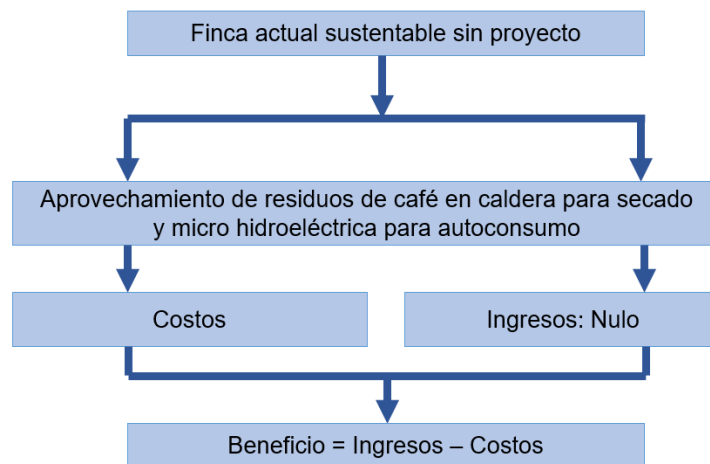


Figura 43. Esquema de operación de la finca actual sustentable sin proyecto.

Fuente: Elaboración propia.

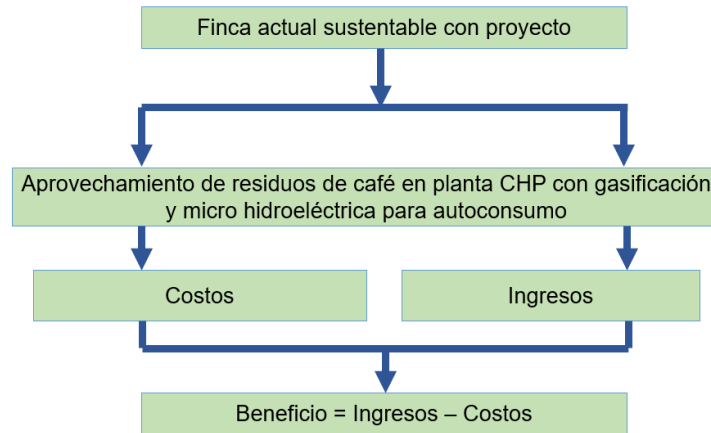


Figura 44. Esquema de operación de la finca actual sustentable con proyecto.

Fuente: Elaboración propia.

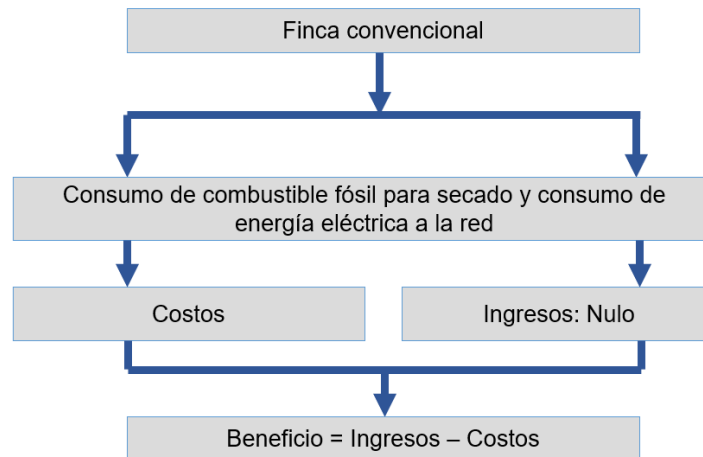


Figura 45. Esquema de operación de finca convencional

Fuente: Elaboración propia.

4.1. Escenarios de operación y supuestos

Para el análisis económico, se tomarán en consideración dos escenarios, los cuales se describen a continuación. Cabe mencionar que el consumo de energía eléctrica de la finca, el cual fue recabado del analizador de redes, es de 307 kWh para un día de la T1, para un día de las T2 y T3 es de 61.4 kWh. De este modo se tiene un consumo anual de la finca por las T1 (27,630 kWh), T2 (3,745.4 kWh) y T3, (13,139.6 kWh) de 45,515 kWh. La factibilidad de considerar estos dos escenarios, en la evaluación económica y financiera, es para saber qué escenario es más atractivo económicamente para la finca.

Escenario 1

En este escenario se considera que el sistema de cogeneración con un gasificador se encuentre en funcionamiento durante las 24 horas del día, todo el año. Así mismo, se suministrará de energía eléctrica y térmica a la finca, y el excedente de energía eléctrica se venderá. En la Finca Nuevo México, se cuenta con la biomasa requerida (residuos de café) por el gasificador, para hacer funcionar al sistema propuesto durante la T1 y aproximadamente 5 días de la T2. Para los días restantes de la T2 y la T3 se requiere una cantidad aproximada de 593.04 y 2,266.26 toneladas de residuos forestales respectivamente, es decir, 2,859.3 [ton/año].

De este modo, se venderá la energía eléctrica excedente de la planta de cogeneración junto con la energía total generada por la micro hidroeléctrica durante las 24 horas del día.

Escenario 2

En este escenario el sistema de cogeneración con gasificador solo operara en los horarios laborales ya establecidos que tiene la Finca Nuevo México, los cuales son de 6 a.m. a 11 p.m. (17 horas al día), considerando que estos horarios sean aplicados para todos los días del año. De este modo, la planta de cogeneración suministrará la misma cantidad, de energía térmica y eléctrica a la finca, que en el escenario anterior, y solo se venderá el excedente eléctrico en este horario. Debido a que en este escenario se tiene un sobrante de residuos de café en la T1, a causa de que la planta tiene un requerimiento de biomasa más bajo por no operar las 24 horas del día, se propone utilizar este sobrante para la T2, que alcanzaría para suministrar de combustible a la planta propuesta durante 37 días adicionales en la T2. Para los días restantes de la T2 y la T3 se requiere una cantidad aproximada de 127.5 y 1,605 toneladas de residuos forestales respectivamente, es decir, 1,732.5 [ton/año].

Por consiguiente, solo se venderá el excedente de la generación eléctrica de la planta de cogeneración en el horario antes mencionado, mientras que la energía generada por la micro hidroeléctrica será vendida casi en su totalidad. Debido a las horas donde no opera la planta de cogeneración (de 11 p.m. a 6 a.m.), la energía eléctrica requerida por la finca será abastecida con la micro central hidroeléctrica. Así mismo, se cuantifica que la finca consumirá 1,759.7 kWh al año de la micro hidroeléctrica, que para 1 día de la T1 sería de 12.14 kWh, y para la T2 y T3 este consumo baja al 20%.

4.2. Supuestos técnicos

Los supuestos técnicos son contemplados tanto para la planta CHP como la micro hidroeléctrica.

Con relación a la planta de cogeneración con gasificación:

El factor de planta o de capacidad de una planta de cogeneración con gasificador es alrededor del 85%, para este proyecto se considera un factor de planta de 88% [66]. Así mismo, el factor de planta para el escenario 1 será de 88% y para el escenario 2 se calculó de 62%, a causa de que en este último se consideran las horas donde no se tiene en operación a la planta.

En la Tabla 6 se muestran los parámetros de desempeño, de la planta de cogeneración con gasificación, requeridos para la evaluación económica y financiera, los cuales fueron recabados de las simulaciones en el software Thermoflex 28, a excepción del factor de planta. Debido a que la potencia neta tiene una ligera variación en las 4 simulaciones realizadas, se tomará la media de la potencia neta, que es de 308.4 kW.

Con relación a la micro central hidroeléctrica:

Una planta hidroeléctrica, de pequeña escala, puede alcanzar hasta un factor de planta del 95% [67]. Considerando que, la micro hidroeléctrica, de la Finca Nuevo México, es relativamente nueva y se le da mantenimiento solo los primeros quince días del mes de junio, se toma un factor de planta del 95%.

La potencia de la micro central hidroeléctrica (84 kW), fue proporcionada por la Finca Nuevo México, la cual es considerada como la potencia bruta. Para obtener la potencia neta de la micro hidroeléctrica, se tomó como referencia a la International Atomic Energy Agency (IAEA), quien reporta que para una hidroeléctrica pequeña el consumo de auxiliares es del 2.5%. Sabiendo que la potencia neta es igual a la diferencia de la potencia bruta y el consumo de auxiliares, se tiene una potencia neta para la micro hidroeléctrica de 81.9 kW [68]. En la Tabla 6 se presentan los parámetros de desempeño, necesarios para la evaluación económica y financiera, de la micro hidroeléctrica.

Tabla 6. Parámetros de desempeño de planta CHP con gasificación y micro hidroeléctrica.

Parámetros de desempeño	Planta CHP con gasificación		Micro hidroeléctrica
	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 1 y 2
Potencia Bruta [kW]	316	316	84
Potencia Neta [kW]	308.4	308.4	81.9
Consumo de Auxiliares[kW]	7.6	7.6	2.1
Factor de planta [%]	88	62	95

Elaboración propia con resultados de Thermoflex 28 y a partir de información de [66], [67]

Conforme avanzan los años el mantenimiento de los sistemas, tanto de la planta CHP con gasificación como la micro hidroeléctrica, será más frecuente por el deterioro y envejecimiento de los equipos y componentes debido a la acumulación de horas de operación, por lo que la disponibilidad y por tanto el factor de planta se verá reducido año con año. Debido a esto, se utilizará la siguiente expresión para tener en cuenta este detalle para la evaluación económica-financiera [69].

$$FP_n = (FP_{n-1})(1 - DAFP) \quad (13)$$

Donde:

FP_n : Factor de planta del año n.

FP_{n-1} : Factor de planta del año anterior.

DAFP: Decremento anual del factor de planta. Debido a que la planta CHP con gasificación es nueva y la micro hidroeléctrica es relativamente nueva, se asigna in valor de 0.0005 [70].

4.3. Supuestos económicos

Para la evaluación económica y financiera del proyecto propuesto, se requiere establecer consideraciones económicas. Los supuestos técnicos, económicos y financieros, forman parte de un grupo de datos concentrados en un modelo numérico, que sirvió como herramienta, en un libro de Excel, para determinar los escenarios de costos, escenarios de ingresos, indicadores de rentabilidad, entre otros. La evaluación económica y financiera es realizada en moneda USD.

Se estima un periodo de ejecución de la obra, para la planta CHP con gasificación de 6 meses y un periodo de puesta en marcha y aceptación de la instalación de 1 mes. Durante estos 7 meses, la finca continuará con sus operaciones habituales, ya que el sistema propuesto no afecta en los procesos de la finca. El periodo de ejecución de la obra se propone que comience al inicio del mes de junio del año 2019 y el periodo de puesta en marcha y aceptación de la instalación, se provee que se lleve a cabo en diciembre de 2019. De este modo, la planta empezará a operar en enero de 2020.

La vida útil de una planta, como la que se propone en este trabajo es de al alrededor de 20 a 25 años [66]. Para el presente proyecto se propone una vida útil de la planta de 20 años, desde el año 2020 hasta el año 2039.

Las centrales hidroeléctricas suelen tener una vida útil muy larga. Así mismo, dependiendo del diseño, capacidad, componentes, etc., la vida útil de las grandes centrales hidroeléctricas oscila entre 40 y 80 años. Existen centrales hidroeléctricas que han estado en funcionamiento durante más de 100 años con mejoras periódicas de los sistemas eléctricos y mecánicos, pero sin mejoras importantes de las

estructuras civiles. Para plantas hidroeléctricas a pequeña escala, la vida útil típica es de 40 años, pero en algunos casos puede ser menor [67]. En consecuencia, y debido a que la micro central hidroeléctrica, que se encuentra en la Finca Nuevo México, tiene poco tiempo de haber sido instalada, su vida útil se encuentra dentro del periodo de vida de la planta de cogeneración con gasificación (20 años).

Para la Inflación de Estados Unidos, se realizó una proyección con base al histórico de la inflación media norteamericana de los últimos 10 años, la cual da una tasa de inflación esperada de aproximadamente 1.75% para el año 2020, donde empieza a operar la planta. Para la inflación mexicana se realizó el mismo procedimiento [71] [72]. La Tasa de Rendimiento Mínima Aceptable (TREMA) es de 15% [73].

En la Tabla 7 se resumen los supuestos para evaluar económica y financieramente este proyecto.

Tabla 7. Supuestos económicos y financieros utilizados para la evaluación

Supuestos económicos		
Tipo de cambio [74]	[\$/USD]	20.53
Inflación (EUA)	[%]	1.75
Inflación (México)	[%]	3.99
Año de inicio de la construcción	[año]	2019
Año de inicio de operación	[año]	2020
Mes de inicio	[mes]	Enero
Tiempo de construcción	[meses]	7
Vida útil de la central	[años]	20
Año de retiro	[año]	2039
TREMA	[%]	15

Fuente: Elaboración propia a partir de [74], [71], [72], [73], [66], [67].

4.4. Costos de inversión y de operación y mantenimiento

En proyectos como el que se propone es este trabajo, los costos se pueden desglosar en dos grupos: de inversión y de operación y mantenimiento (O&M). Al inicio del proyecto se debe cubrir el costo de inversión, que generalmente es muy grande. Posteriormente, se atenderán los costos de operación y mantenimiento durante el periodo de vida del proyecto.

Para este estudio se contemplan los costos de inversión y de O&M de la planta de cogeneración con gasificación, y para la micro hidroeléctrica solo se tomarán en cuenta los costos de O&M, debido a que esta se encuentra actualmente instalada y en operación.

Por otra parte, se tiene un costo adicional del biocombustible para el gasificador, que son los residuos forestales. El costo es nulo para los residuos de café, debido

a que estos residuos son proporcionados y obtenidos en los procesos de producción habituales de la Finca Nuevo México.

Los costos de O&M de la planta CHP con gasificación y de la micro hidroeléctrica, así como los costos por los residuos forestales, se estima que evolucionen conforme a la tasa media de inflación anual pronosticada para 2020 de los Estados Unidos, los cuales se calculan con la herramienta antes mencionada y se muestran en el flujo de efectivo de la evaluación económica-financiera.

Costo de inversión de la planta CHP con gasificación

Para obtener el costo de instalación de la planta propuesta se realizó una exhaustiva búsqueda en diversas fuentes. De entre las cuales, se tomó como referencia, para obtener un panorama de plantas ya establecidas, un artículo realizado por Obernger sobre la evaluación de costos de aplicaciones de plantas de cogeneración basadas en la combustión y la gasificación de biomasa [60]. Así mismo, se tomó como principal referencia a la International Renewable Energy Agency, en un documento publicado en 2012 sobre un análisis de costos de tecnologías de energías renovables, específicamente generación de energía con biomasa [66].

En ese documento se presenta el costo de inversión de una planta de cogeneración con un gasificador, el cual fue calculado gracias a un análisis de diversas plantas con esta tecnología. Este costo tiene un rango desde 5,570 a 6,545 USD/kWe, del cual se obtuvo el promedio que es de 6,057.5 USD/kW. Sabiendo que la capacidad nominal de generación eléctrica de la planta propuesta es de 360 kW, el costo de inversión será de 2,232,000 USD en moneda del año 2010 [66]. Aplicando la inflación de Estados Unidos se tiene un costo de inversión pronosticado en moneda de 2020 de 2,607,508 USD.

El costo de inversión contempla el motor de gas, el gasificador, maquinaria de preparación y manejo de combustible (biomasa), costos de ingeniería y construcción (obras civiles), consultoría, costos de diseño y planificación, así como el capital de trabajo. También incluye los costos de conexión a la red y sistemas de control y monitoreo. Generalmente el motor representa del 5 al 15% de la inversión, mientras que el gasificador usualmente representa la mayor parte del costo de inversión, aunque el manejo y la preparación del combustible también contribuyen de manera importante en los costos totales de inversión [66].

Para la ejecución de la evaluación económica del proyecto, no se contempla el costo de inversión de la micro central hidroeléctrica, la cual se encuentra instalada y en operación, de este modo, este costo se encuentra amortizado.

Costo de operación y mantenimiento de la planta CHP con gasificación

Los costos de operación y mantenimiento fijos y variables reportados por la International Renewable Energy Agency [66], son excesivamente elevados por lo que se optó por consultar otra fuente, que es el COPAR 2015. En el COPAR 2015 se especifican costos que determina CFE con base a la operación de sus plantas, lo que provee bastante confiabilidad a los datos. Se tomó un costo aproximado de O&M fijos de 21.6 USD/kW y un costo de O&M variables de 0.0031 USD/kWh, correspondientes a plantas centrales térmicas convencionales y ciclo combinado con capacidad de 100 a 200 MW. El costo de O&M fijo, multiplicado por la capacidad nominal de la planta (360 kW), a moneda de 2020 pronosticado es de 2,607,508 USD/año. Y el costo de O&M variable a moneda de 2020 es de 0.0339 USD/kWh.

Costo de operación y mantenimiento de la micro central hidroeléctrica.

Los costos promedio de O&M anual para una central hidroeléctrica de pequeña escala es alrededor de 2.5% el costo de instalación. Como no se cuenta con el dato del costo de inversión de la micro hidroeléctrica que tiene la finca, se utiliza el costo promedio de inversión reportado por la International Renewable Energy Agency para centrales grandes y pequeñas de Estados Unidos, el cual es de 2,350 USD/kW. Consecuentemente, el costo de operación y mantenimiento anual para la micro central hidroeléctrica se calcula al multiplicar este costo por la potencia nominal (84 kW) y el costo promedio de O&M anual (2.5% de la inversión), teniendo a si el costo de O&M de 4,935 USD/año en moneda del año 2010, y que para moneda en 2020 sería de 5,901 USD/año [67].

Costo de residuos forestales

En el costo por residuos forestales se contempla la recolección, trituración, carga, transporte y descarga, tarifa de derechos de tala y devolución para beneficio y riesgo. Este costo puede ser de 15 USD/tonelada en moneda de 2010, que para moneda de 2020 sería de 17.93 USD/ [66].

Tomando en consideración las toneladas requeridas para el escenario 1 y el escenario 2, se tiene un costo de 51,284 USD/año y 31,074 USD/año, respectivamente.

4.5. Ingresos

Los precios de los PML, por venta de energía eléctrica, y de los CELs se estima que incrementen conforme a la tasa de inflación media anual de México, pronosticada para el año 2020, durante los siguientes 20 años.

Venta de energía eléctrica

Los ingresos por venta de energía serán adquiridos con el excedente eléctrico de la planta CHP con gasificación y la micro hidroeléctrica para cada escenario. Existen diversos esquemas para la venta de energía por los generadores, en el Mercado Eléctrico Mayorista (MEM). Con base en la resolución de la CRE que expide las disposiciones administrativas de carácter general, los modelos de contrato, la metodología de cálculo de contraprestación y las especificaciones técnicas generales, aplicables a las centrales eléctricas de generación distribuida y generación limpia distribuida, se toma en consideración los siguientes esquemas de venta de energía por los generadores exentos para la interconexión de centrales eléctricas con capacidad menor a 0.5 MW a las Redes Generales de Distribución [75]:

- Medición neta de energía: metodología de contraprestación que considera los flujos de energía eléctrica recibidos y entregados desde y hacia las Redes Generales de Distribución compensando dichos flujos de energía eléctrica entre sí durante el periodo de facturación. También se conoce como Net Metering por su nombre en inglés.
- Facturación neta: metodología de contraprestación que considera los flujos de energía eléctrica recibidos y entregados desde y hacia las Redes Generales de Distribución, y les asigna un valor que puede variar a la compra y a la venta. También se conoce como Net Billing por su nombre en inglés.
- Venta total de energía: metodología de contraprestación que considera el flujo de energía eléctrica entregada hacia las Redes Generales de Distribución, al cual se le asigna un valor de venta. En este no existe un contrato de suministro eléctrico asociado al mismo Punto de interconexión de la Central Eléctrica.

Para este estudio se toma el esquema de venta total, del cual la energía eléctrica entregada por el Generador Exento a las Redes Generales de Distribución se liquidará al valor del Precio Marginal Local horario en el nodo correspondiente.

Para obtener el nodo correspondiente a la región donde se localiza la Finca Nuevo México, se consultó el documento del CENACE, Diagramas Unifilares del Sistema Eléctrico Nacional. Este nodo se encuentra en la gerencia oriental, en la zona Tapachula con el nodo Pijijiapan y clave 02PJJ-115 [76].

Los horarios, base, intermedio y punta, considerados para la evaluación económica y financiera se muestran en el Anexo 8 [77]. Los PML horarios en el nodo 02PJJ-115, fueron tomados para el mes de agosto de 2019, se calcularon los precios promedio de los PML, los cuales en muestran también en el Anexo 8 con sus respectivos precios pronosticados al 2020 con la tasa de inflación media mexicana [78].

En la Tabla 8 se muestran los precios promedio de los PMLs en los horarios base, intermedio y punta, así como también, el porcentaje de horas que se tiene para cada horario, en los dos escenarios, para la planta CHP con gasificación. El porcentaje de horas para cada horario que tiene la micro hidroeléctrica, es el mismo que el del escenario 1, debido a que se propone que opere las 24 horas.

Tabla 8. Precio de PMLs y fracción de horas por horario en cada escenario

Horario	Precio promedio PML [USD/kWh]	Fracción de horas Escenario 1 (24 horas)	Fracción de horas Escenario 2 (17 horas)
base	0.073	25.0%	0.0%
Intermedio	0.078	66.7%	88.2%
punta	0.086	8.3%	11.8%

Fuente: Elaboración propia a partir de [76], [77], [78].

Ingresos por CELs

Aquellas tecnologías que se consideren limpias según lo definido en el artículo 3, fracción XXII de la LIE tienen derecho a recibir un CEL por cada MWh generado [47]. El costo de 1 CEL, en la última subasta de largo plazo celebrada en 2017, fue de 20.57 USD/MWh [79]. Este precio fue estimado para el año 2020, año en el que ya se encuentra en operación el proyecto, con la tasa de inflación media anual de México, que sería de 0.0219 USD/kWh.

4.6. Evaluación económica y financiera

Hasta este punto se cuenta con todos los datos requeridos para calcular a lo largo del periodo de vida del proyecto, en cada Escenario, la generación neta de la planta CHP con gasificación y de la micro central hidroeléctrica, el excedente de energía a la venta correspondiente a cada horario (base, intermedio y punta), los Ingresos por CELs y PMLs, los costos de O&M, los costos por residuos forestales y por último el resultado neto anual.

En el Anexo 9 y el Anexo 10 se muestra el flujo de efectivo calculado para el Escenario 1 y para el Escenario 2, con ayuda de la herramienta numérica.

Supuestos para la evaluación financiera

Además de los supuestos establecidos en la Tabla 7, se requiere de los supuestos correspondientes para el financiamiento.

En un proyecto de este tipo, frecuentemente se opta por recurrir a un crédito para financiar el proyecto. El Banco Nacional de Comercio Exterior (BANCOMEXT)

dentro de su apartado de sectores estratégicos se encuentra el Programa establecido para el Financiamiento de Proyectos de Energías Renovables. Este se llama FINANCIAMIENTO PARA PROYECTOS SUSTENTABLES. Dirigido a empresas, industria, oficinas u otros, el enfoque de este crédito es promover la mejora del medio ambiente por medio de la reducción de gases de efecto invernadero (GEI). Dentro de esta banca se puede encontrar entidades de financiamiento de segundo piso. La Banca comercial de 2 piso esencialmente se refiera a bancas que no se dirigen directamente al solicitante, pero que si pueden por medio de otra entidad financiera ser participantes para ser seleccionados como medio de financiamiento. La tasa de interés de financiamiento con banca comercial de segundo piso para este proyecto es del 12% [73].

La construcción de una planta como la aquí presentada requiere de un periodo de tiempo establecido, tiempo en el cual no se generan ingresos y se generan intereses, en algunos casos se llega a un acuerdo para tener un periodo de gracia en el cual los intereses se pacta pagarlos en una fecha determinada (que es cuando la planta se encuentra ya en operación). Estos intereses corresponden a [69]:

Construcción: 3%, Comisión: 1% y Compromiso: 0.5%.

El porcentaje de apalancamiento considerado es de 80%, del total requerido para la inversión inicial, cuyo monto será cubierto con un esquema de amortizaciones de en 10 pagos anuales iguales, capital más intereses.

Tabla 9. Supuesto de Financiamiento

Supuestos de Financiamiento		
Tasa de interés de financiamiento	[%]	12
Interés durante la Construcción	[%]	3
Comisión de apertura	[%]	1
Comisión de compromiso	[%]	0.5
Apalancamiento	[%]	80
Pagos anuales		10

Fuente: Elaboración propia a partir de [73], [69]

En el Anexo 11 y en el Anexo 12 se presentan las evaluaciones económicas y financieras, las cuales se calcularon para el Escenario 1 y 2 respectivamente.

4.6.1. Indicadores de rentabilidad de Escenario 1

Los indicadores de rentabilidad que se tomaron en cuenta, para la evaluación económica y financiera de este proyecto, son los siguientes:

Valor Presente Neto (VPN) que es la representación de flujos netos de efectivo. Un proyecto es atractivo si [73]:

VPN>0 el proyecto es viable
 VPN=0 es indiferente realizar el proyecto
 VPN<0 el proyecto no es viable

Anualidad equivalente (AE) que depende del VPN y que en pocas palabras se describiría como la opción de recibir el VPN en 20 pagos iguales al 12%, para este estudio [69].

La Relación Costo Beneficio (B/C) se basa en la razón de Beneficio – Costo. Se considera que un proyecto es atractivo cuando los beneficios de su implementación esperados exceden su costo asociado, considerando lo siguiente [73]:

B/C>1 se recomienda realizar el proyecto.
 B/C=1 el proyecto resulta indiferente.
 B/C<1 el proyecto no es conveniente.

La TIR es la tasa máxima que soportaría el proyecto para ser rentable, cualquier tasa de descuento mayor que la TIR ocasionaría que el VPN del proyecto es negativo, por lo tanto, el proyecto deberá ser rechazado. Cualquier tasa de descuento inferior a la TIR garantizará una rentabilidad positiva para el proyecto, por lo tanto, será conveniente realizarlo. De este modo se debe cumplir que [80]:

TIR > TREMA se acepta el proyecto
 TIR < TREMA se rechaza el proyecto

La tasa interna de retorno modificada (TIRM) se diferencia en la TIR en que los flujos se reinvierten a la tasa del costo de capital que en este caso sería la TREMA y no a la tasa de la TIR misma como sucede en el cálculo de la TIR. Si la TIRM es mayor que la TREMA se acepta el proyecto de lo contrario, este se rechaza [69].

El período de recuperación simple (PR simple) mide el tiempo que le tomará al proyecto generar el dinero que se invirtió en él [69].

Los indicadores de rentabilidad sin financiamiento y con financiamiento, para el Escenario 1 se muestran en la Tabla 10:

Tabla 10. Indicadores de rentabilidad de la evaluación económica y financiera para el Escenario 1

Indicador	Económico	Financiero
VPN en 2020 [USD]	-\$770,466.85	\$3,074,549.44
AE [USD]	-\$123,090.92	\$491,194.54
B/C	0.705	5.996
TIR [%]	10%	98%
TIRM [%]	13%	26%
PR (simple) [años]	9.992	14.047

Fuente: Elaboración propia.

Los indicadores de rentabilidad, para la evaluación sin financiamiento, indican que el proyecto no es rentable.

Para la evaluación con apalancamiento, los indicadores económicos denotan que el proyecto es viable.

4.6.2. Indicadores de rentabilidad de Escenario 2

En la Tabla 11 se muestran los indicadores obtenidos de la evaluación económica y financiera, para el Escenario 2.

Tabla 11. Indicadores de rentabilidad de la evaluación económica y financiera para el Escenario 2

Indicador	Económico	Financiero
VPN en 2020 [USD]	-\$1,141,862.32	\$2,703,153.96
AE [USD]	-\$182,425.60	\$431,859.85
B/C	0.562	5.393
TIR [%]	7%	91%
TIRM [%]	12%	25%
PR (simple) [años]	11.562	16.673

Fuente: Elaboración propia.

Los indicadores económicos, resultantes de la evaluación económica sin financiamiento, en este escenario no son aceptables, al igual que en el Escenario 1. En realidad, estos resultados muestran que el proyecto es a un menos rentable.

Respecto a la evaluación con apalancamiento, los indicadores de rentabilidad denotan que el proyecto es aceptable, aunque en menor medida que el Escenario 1.

4.8. Analisis de sensibilidad

Hasta este apartado, se cuenta con una serie de criterios para saber si el proyecto es rentable. En adición a esto, se realiza un análisis de sensibilidad para tener conocimiento del comportamiento de los indicadores de rentabilidad del proyecto para cambios relevantes en los parámetros de operación y evaluación que se ven como más sensibles, tanto de la evaluación económica, como de la financiera. Las variables a modificar en este análisis de sensibilidad son:

Para la evaluación económica y financiera: Precio de CELs (+10% y +20%), Costo de la Inversión inicial de la planta CHP con gasificación (-20% y -30%), el costo por residuos forestales (-30% y -50%) y una sensibilidad combinada (+20% de CELs, -30% de Inversión, -50% de costos por residuos forestales).

Solo para la evaluación financiera: Tasa de interés de financiamiento (-10% y -20%) y el apalancamiento (+10% y -10%).

4.8.1 Analisis de sensibilidad para el Escenario 1

En el análisis de sensibilidad de la evaluación económica del Escenario 1, se observa una ligera mejora en los indicadores de rentabilidad, aunque no muy significativa, ya que los indicadores siguen siendo no aceptables. A excepción del cálculo de la evaluación económica al disminuir en un 30% la inversión inicial de la planta CHP con gasificación, teniendo así los indicadores de rentabilidad apenas aceptables para la puesta en marcha del proyecto. Y para el análisis de sensibilidad, en el que se contemplan las tres variables (combinado), se tiene una mejora en los indicadores de rentabilidad aún mayor (véase Anexo 13).

Respecto la evaluación financiera para el Escenario 1, se observa que las variables que más afectan a los indicadores de rentabilidad son las variaciones del costo de inversión, el apalancamiento y evidentemente, cuando se varían los tres parámetros. Si anteriormente el proyecto era rentable, en la evaluación financiera sin variar los parámetros, con estas variaciones el proyecto resulta a un más rentable y con un PR menor, en casi todas las variaciones. Cabe señalar que el VPN disminuye al reducir el monto de inversión inicial y la tasa de financiamiento. Además, se observa que los indicadores VPN, AE, BC, TIR y TIRM son menos aceptables al reducir la tasa de financiamiento, mientras que el PR disminuye (consulte Anexo 14).

4.8.2 Analisis de sensibilidad para el Escenario 2

Tal como se reportó con anterioridad, los indicadores para el Escenario 2 resultan menos aceptables, en términos generales, que el Escenario 1. Al calcular los indicadores de rentabilidad de la evaluación económica para el Escenario 2, se observa claramente que, para ninguna variación en los parámetros, el proyecto resulta económicamente atractivo, debido a que el VPN, AE, BC, TIR y TIRM no son aceptables. Esto se puede observar en el Anexo 15.

En el Anexo 16 se presentan los indicadores de rentabilidad para la evaluación financiera del Escenario 2. En esta tabla (Anexo 16) se puede notar que, en todas las sensibilidades, el proyecto resulta económicamente atractivo, aunque con un PR muy elevado. También se observa un incremento considerable del VPN, AE, BC, TIR y TIRM, al incrementar en un 10% el apalancamiento, y un aumento desfavorable del PR. Por otra parte, al disminuir la tasa de financiamiento, el VPN, AE, BC y TIR, tienen un valor de aceptación menor.

4.9. Conclusión

Al término de este capítulo se cumple con uno de los principales objetivos de este estudio, al tener los criterios necesarios para determinar si los resultados del proyecto son atractivos y con ellos visualizar el nivel de factibilidad técnica y de viabilidad económica del proyecto. La investigación exhaustiva que se llevó a cabo para adquirir los datos necesarios para la evaluación económica y financiera fue parte fundamental de este capítulo. Gracias a la herramienta numérica se lograron calcular escenarios de precios, ingresos y costos anuales, flujo de efectivo generados por la operación del proyecto, etc., y por último los indicadores de rentabilidad para determinar si el proyecto es aceptable.

Así mismo, se concluye que el proyecto es rentable solo bajo un esquema de financiamiento, tanto para el Escenario 1 como para el Escenario 2. En términos generales, los indicadores de rentabilidad obtenidos, en las evaluaciones, sin apoyo del financiamiento resultan muy poco atractivas, mientras que para las evaluaciones financieras resultan aceptables, pero se requiere que se cumplan los supuestos técnicos, económicos y financieros de la evaluación, resaltando los de los precios de la energía a la venta y de las CELs.

Cabe señalar que el Escenario 1 es más rentable que el Escenario 2, esto se debe a que en el Escenario 1 se genera más electricidad, gracias a que la planta CHP con gasificación opera más tiempo, lo que provoca un valor de ingresos significativamente mayor que en el Escenario 2.

Con base en el análisis de sensibilidad, se observa que las variables que más impactan en el proyecto son la variación en el costo de inversión, de la planta CHP con gasificación, y en la variación del apalancamiento.

Conclusiones Generales

La investigación realizada para el marco teórico fue clave para adentrarse en los principales temas de interés para este proyecto. La recopilación de una serie de datos indispensables, que se llevó a cabo gracias a un levantamiento en la Finca Nuevo México, fue básica para el diseño de la planta CHP con gasificación. Se realizaron diversos modelos en el Software Thermoflex 28 de esta planta, hasta diseñar el modelo óptimo para esta finca, aprovechando los residuos de café producidos, para generar la energía térmica y eléctrica requerida por la finca, más un excedente eléctrico para adquirir ingresos. La planta propuesta es de 316 kW de potencia bruta, con una potencia neta promedio de 308.4 kW, la eficiencia de cogeneración varía (dependiendo de la temporada) desde 42.65 hasta 67.48%, al igual que la eficiencia eléctrica neta que varía desde 29.23 hasta 38.04%. Uno de los aspectos más importantes de este proyecto es el aprovechamiento de los residuos de café, pero debido a que existe una temporada de cosecha, se optó por aprovechar residuos forestales, cuando no se generan residuos de café, para que la planta se mantenga en operación. De este modo, se concluye que la propuesta de esta planta es técnicamente aceptable, además de un beneficio medio ambiental, al utilizar una fuente renovable, y un beneficio social, en vista de que se podría favorecer a una comunidad.

Para obtener mayores ingresos y aprovechar al máximo la micro central hidroeléctrica que tiene la finca, se propuso mantener esta central a su máxima capacidad y vender los excedentes de energía eléctrica.

Después de haber obtenido los datos requeridos para la evaluación económica y financiera, se calcularon los flujos de efectivo para cada Escenario, así como los indicadores de rentabilidad.

En la evaluación económica, del Escenario 1, los indicadores de rentabilidad calculados como el VPN: -\$770,466.85 USD, Anualidad Equivalente: -\$123,090.92 USD, Relación Costo Beneficio: 0.705, TIR: 10%, TIRM:13%, indican que el proyecto no es económicamente atractivo, lo mismo sucede con la evaluación económica del Escenario 2. La evaluación económica resulta no rentable, para los dos Escenarios, debido al gran impacto del costo de inversión del proyecto.

Respecto a la evaluación financiera, del Escenario 1, los indicadores de rentabilidad como el VPN: \$3,074,549.44 USD, Anualidad Equivalente: \$491,194.54 USD, Relación Costo Beneficio: 5.996, TIR: 98%, TIRM: 26%, muestran que el proyecto es económicamente atractivo, al igual que la evaluación financiera para el Escenario 2.

De este modo, se concluye que este proyecto es económicamente atractivo solo bajo un esquema de financiamiento, para los 2 Escenarios. Sin considerar periodo de reocupación, se puede señalar que el Escenario 1 resulta más atractivo, debido

a que en este la planta CHP con gasificación opera más horas que en el Escenario 2 y con eso puede generar más valor económico al tener más producción para una misma inversión. Por ejemplo, en la evaluación financiera del Escenario 1 se tiene una mejora, respecto a la evaluación financiera del Escenario 2, de 11.1% en la Relación Costo Beneficio y para la TIR una mejora de 7.6%.

Adicionalmente, es importante destacar que este proyecto sería significativamente más rentable si se aplicara a una finca convencional, que consumiera combustible fósil, para su requerimiento térmico, y energía eléctrica de la red.

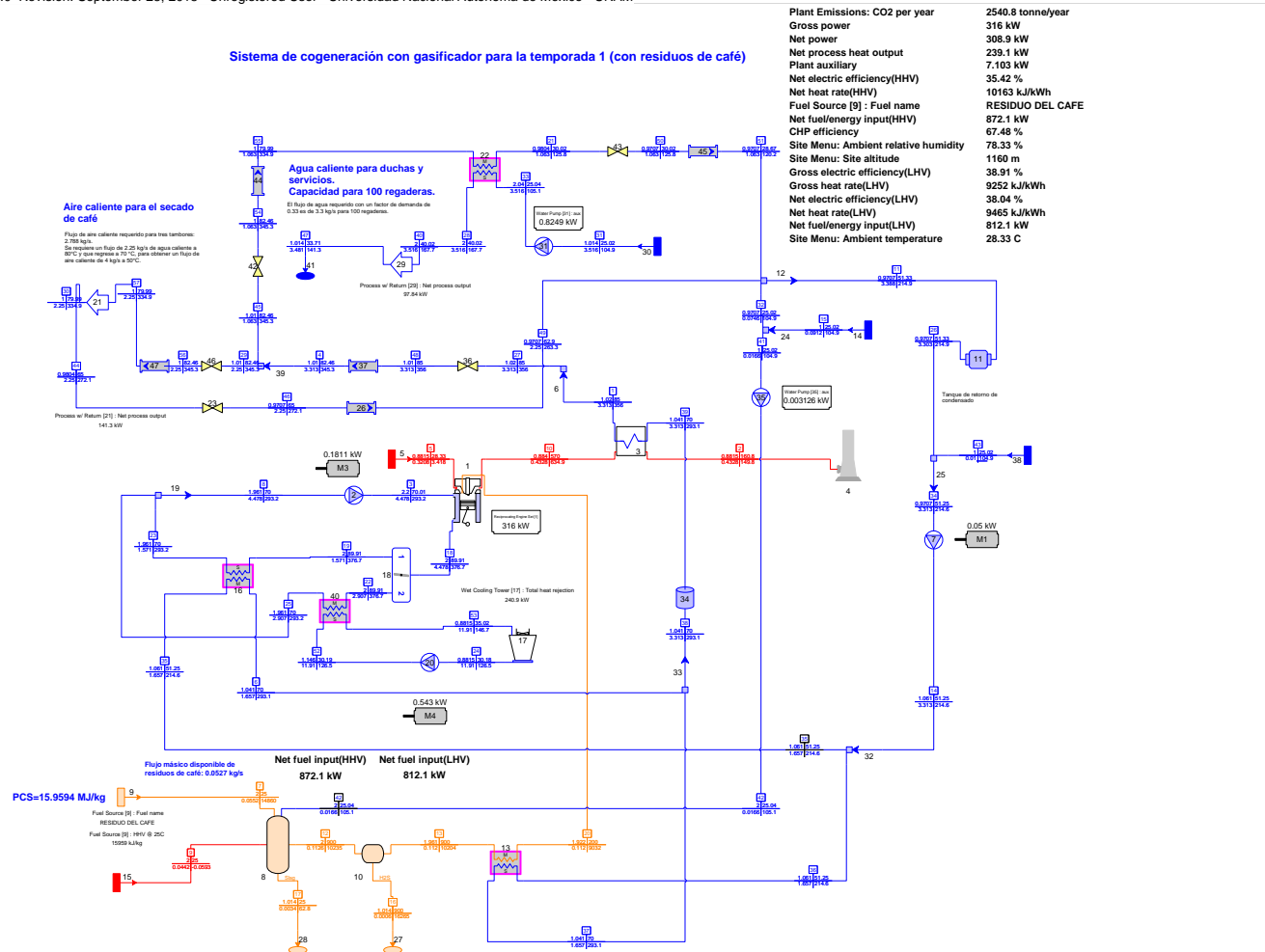
La propuesta de una planta de cogeneración con un gasificador para una finca cafetalera puede realizarse bajo diversos criterios técnicos y económicos. Existen diversos factores que impactan sobre la factibilidad y viabilidad del proyecto, siendo la obtención de los costos de inversión, operación y mantenimiento una de las principales barreras para obtener resultados más precisos en estos estudios. Con el presente proyecto, se pretende promover el uso de tecnologías alternativas y amigables al medio ambiente, buscando reducir los GEI, pero también obteniendo un beneficio económico y social. Es importante destacar que este proyecto puede extrapolarse para diversos sectores industriales, adaptándose a las necesidades del usuario.

Se cumplió en su totalidad el objetivo de hacer el análisis técnico económico de la planta y mostrar cómo se dan los resultados para cuando un sistema de cogeneración compite con un sistema que ya de por sí es sustentable; al competir contra los servicios energéticos y costos de operación existentes en la finca que ya hace uso por incineración en una caldera de los residuos agrícolas del procesamiento del café, y de la explotación parcial de una mini central hidroeléctrica que abastece del fluido eléctrico a la finca.

Para trabajos futuros, se podría realizar el análisis económico y financiero, de este proyecto, considerando que la micro central hidroeléctrica no estuviese amortizada. Por otra parte, se podría analizar la factibilidad técnica y económica que se tendría al implementar este proyecto en una finca convencional, o en algún otro sector agrícola, y comparar los resultados con el presente estudio.

Anexos

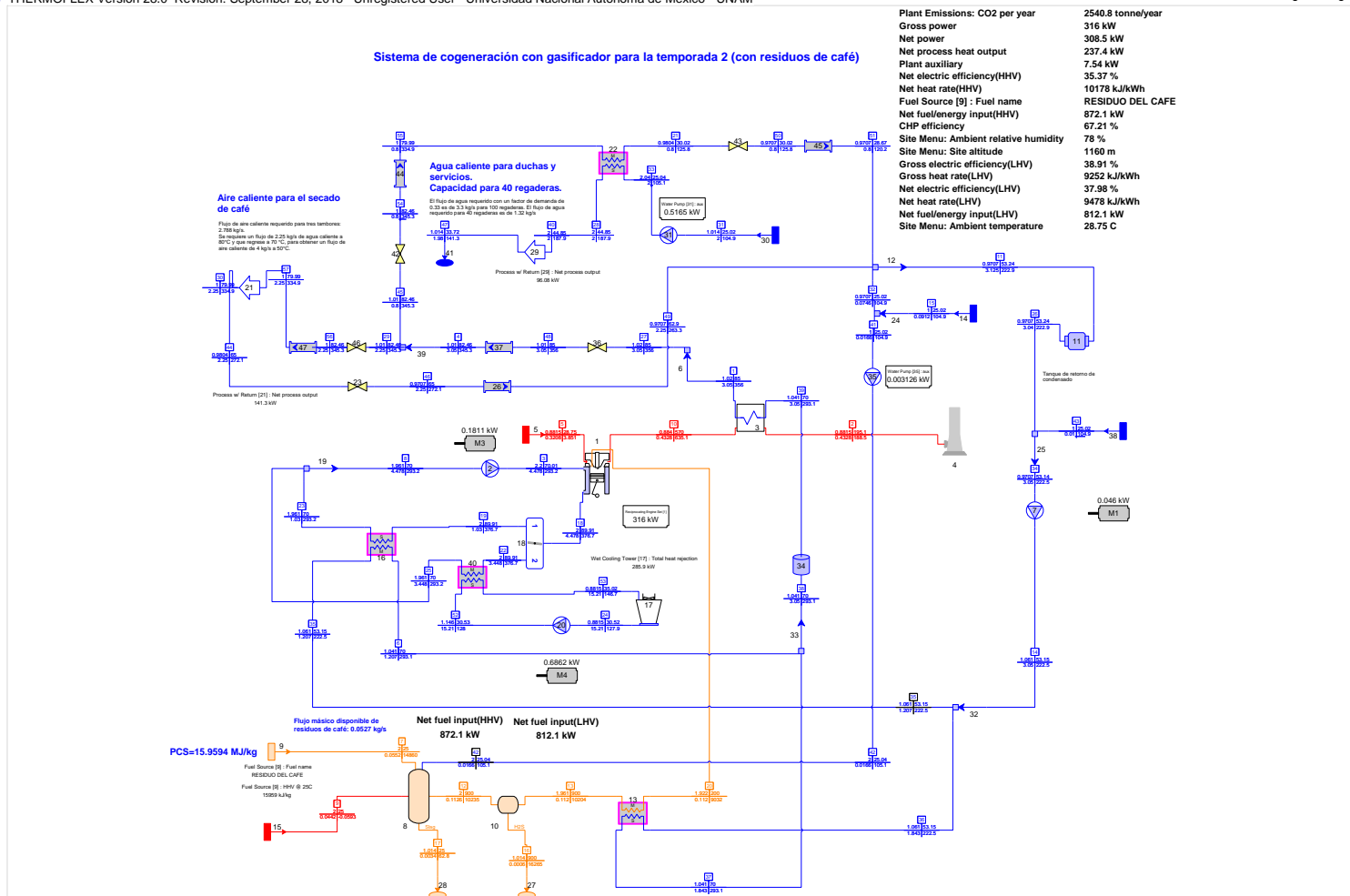
Anexo 1. Sistema de cogeneración con gasificador para la T1 (con residuos de café)



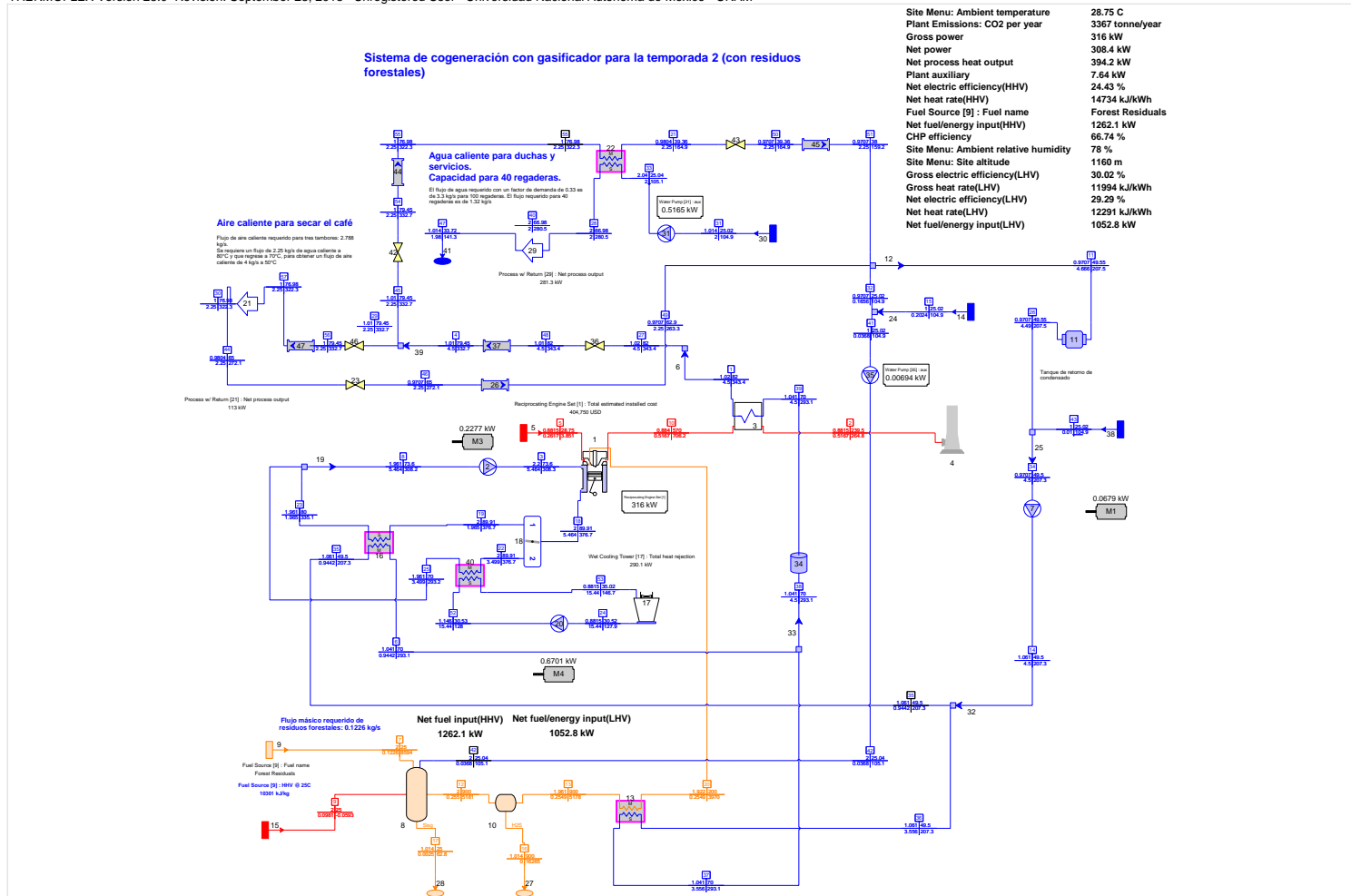
Anexo 2. Sistema de cogeneración con gasificador para la T2 (con residuos de café)

ThermoFLEX Version 28.0 Revision: September 28, 2018 Unregistered User Universidad Nacional Autonoma de Mexico - UNAM

bar | C
kg/s | kJ/kg



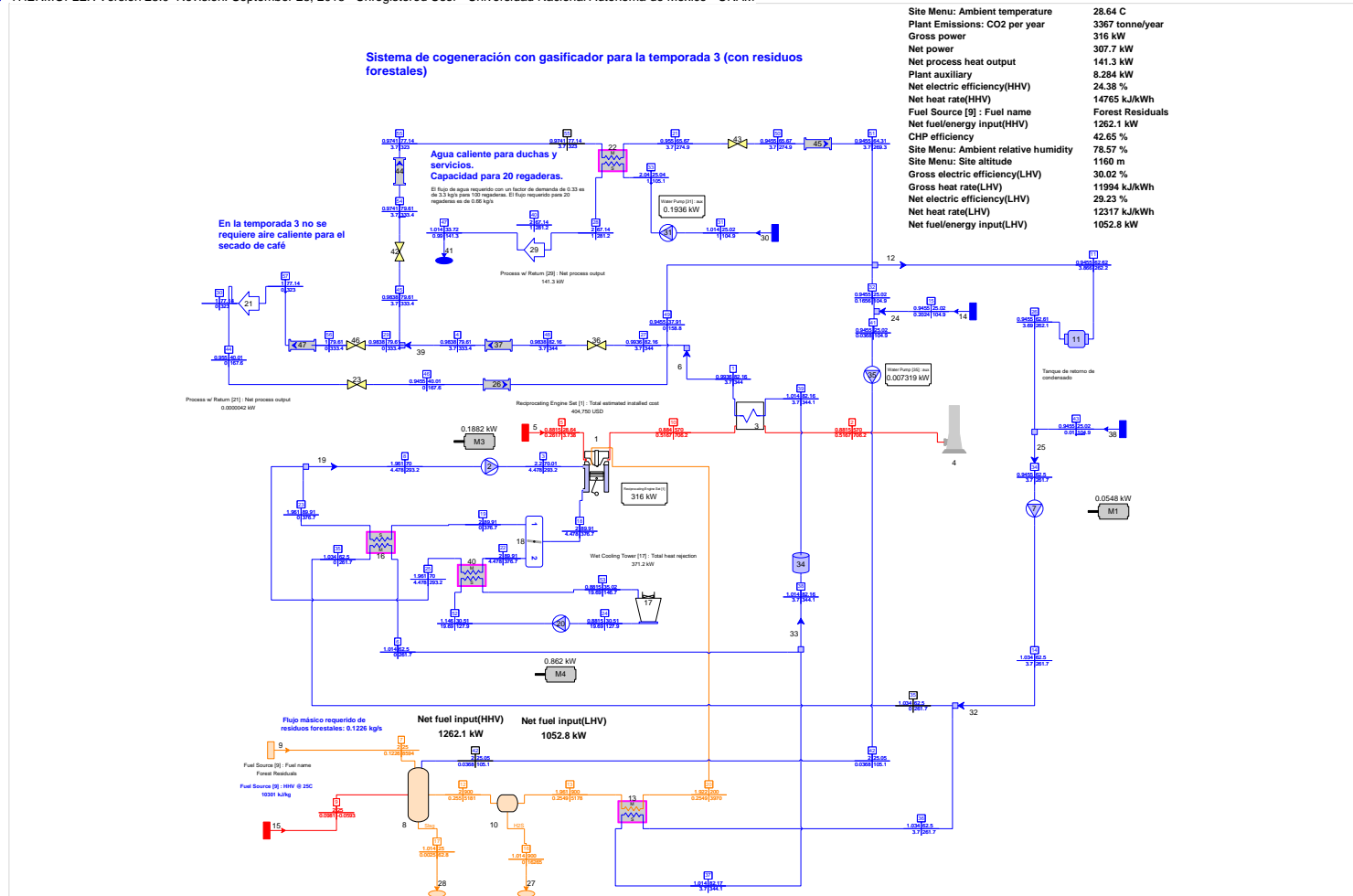
Anexo 3. Sistema de cogeneración con gasificador para la T2 (con residuos forestales)



Anexo 4. Sistema de cogeneración con gasificador para la T3 (con residuos forestales)

ThermoFLEX Version 28.0 Revision: September 28, 2018 Unregistered User Universidad Nacional Autonoma de Mexico - UNAM

bar | C
kg/s | kJ/kg



Anexo 5. Principales ecuaciones que emplea Thermoflex y cómo las resuelve

El software opera mediante una interfaz gráfica vía iconos que representa los equipos de procesos, y su interrelación y conexión entre sí a manera de reproducir la operación en un sistema real.

Para logra lo anterior: primeramente, se conectan los componentes requeridos para crear un modelo gráfico. Después se ingresan los valores de operación básicos según cada equipo, proceso y en función del objetivo que se busca obtener con el modelado y simulación, por componente, posteriormente, el software calcula los balances de masa y energía de los procesos y equipos, mediante iteraciones y luego muestra los parámetros de operación y desempeño obtenidos. Thermoflex informa por separado los resultados del balance de masa y energía para los componentes y el sistema general.

Las ecuaciones de gobierno de los procesos de conversión de energía y transferencia de masa y energía más importantes, usadas para el modelado son:

Balance de masa y energía:

$$m_e = m_s + m_a$$

donde:

me = masa que entra

ms = masa que sale

ma = masa acumulada

$$E_e = E_s + E_a$$

donde:

Ee = energía que entra

Es = energía que sale

Ea = energía acumulada

Para el cálculo de calor por tipo de fluido se tienen las siguientes expresiones:

Para aire o gas:

$$Q = M * (h - h_{@ \text{aire ambiente (condiciones del sitio)}})$$

Para agua o vapor:

$$Q = M * (h - h_{f@ 32^{\circ}F (0^{\circ}C)})$$

Para combustible como proceso

$$Q = M * (h - LHV)$$

donde:

Q = calor

M = flujo masico

H = entalpia

hf = entalpia de agua saturada

LHV = poder calorífico inferior (Lower Heating Value)

La potencia bruta (W_{bruta}) es la energía eléctrica producida de un generador u otro componente productor de energía. La suma de Auxiliares de planta y Pérdidas de transformador son las “Pérdidas totales de transformador y auxiliares de planta” ($W_{perdidas}$). La potencia neta (W_{neta}) se calcula como la diferencia entre la potencia bruta y las pérdidas totales de transformadores y auxiliares de planta.

$$\dot{W}_{neta} = \dot{W}_{bruta} - \dot{W}_{perdidas}$$

La eficiencia se define como:

$$\eta_{\text{electrica}} = \frac{E_{\text{salida}}}{E_{\text{entrada de combustible}}}$$

Una comparación alternativa de la potencia de salida con el consumo de energía del combustible es el Heat Rate (HR), esencialmente el recíproco de la eficiencia.

HR = Entrada de combustible / energía de salida

$$HR = \frac{E_{\text{entrada de combustible}}}{E_{\text{salida}}}$$

La eficiencia de una planta de cogeneración, que produce calor útil, así como energía eléctrica, puede expresarse como una Eficiencia Total, también llamada Eficiencia CHP (Combined Heat & Power):

$$\eta_{\text{CHP}} = \frac{E_{\text{salida}} + Q_{\text{neto a proceso}}}{E_{\text{entrada de combustible}}}$$

Cálculo de la caída de presión de la tubería con el método del coeficiente de resistencia

$$\Delta P = Rvm^2$$

dónde:

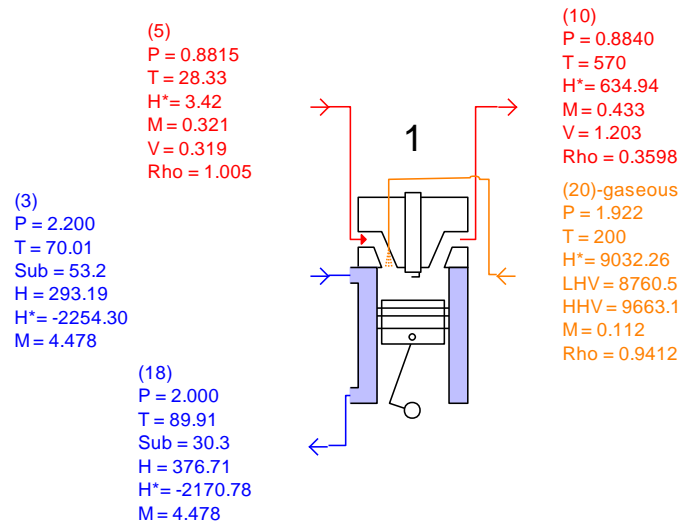
ΔP = pérdida de presión de la tubería

R = coeficiente de resistencia de la tubería

v = volumen promedio de vapor específico

m = caudal másico de vapor

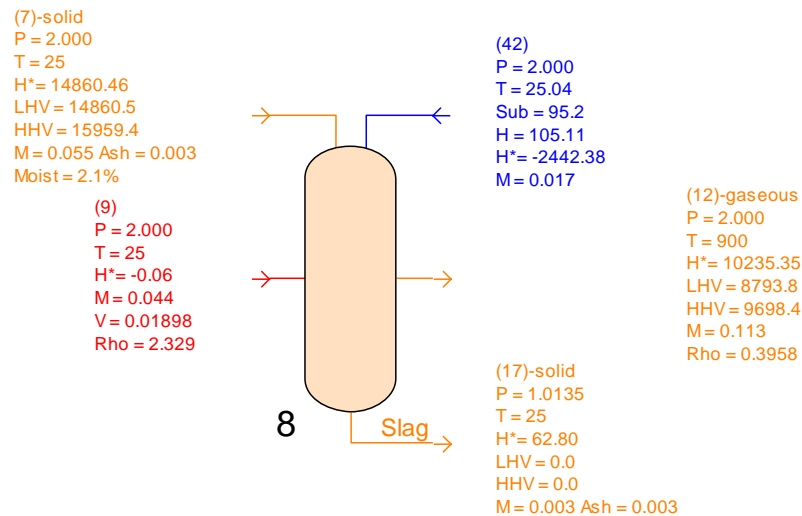
Anexo 6. Parámetros de operación del motor en T1



P[bar] T[C] H[kJ/kg] H*[kJ/kg] M[kg/s] V[m³/s] LHV[kJ/kg] HHV[kJ/kg] Rho[kg/m³]
 Reciprocating Engine Set [1] - WAU 3600G(#207)
 Engine set generator power = 316 kW
 Electrical efficiency (LHV) = 32.19 %, (HHV) = 29.19 %
 Engine efficiency (LHV) = 34.02 %, (HHV) = 30.84 %
 Generator efficiency = 94.63 %, Generator loss = 17.94 kW
 Non-recoverable heat loss = 30.42 kW, 3.006% of Q_{fuel} at inlet temperature
 Heat transfer to primary cooling Q₁ = 374 kW
 Heat to exhaust = 274.8 kW
 Gas fuel input (LHV) = 981.6 kW (HHV) = 1082.7 kW
 Gaseous fuel flow at standard condition (1atm 77 F/25 C) = 301.5 SCFM
 Gaseous fuel flow at normal condition (1atm 32 F/0 C) = 469.4 Nm³/h
 Exhaust gas composition [Mole %]
 O₂ = 2.566% CO₂ = 13.077% H₂O = 17.684% N₂ = 65.907% Ar = 0.766% SO₂ = 0.00114%

Motor de 360 kW=> WAU3600G => Waukesha VHP-8003

Anexo 7. Parámetros de operación del gasificador en T2



P[bar] T[C] H[kJ/kg] H*[kJ/kg] M[kg/s] V[m³/s] LHV[kJ/kg] HHV[kJ/kg] Rho[kg/m³]
 Gasifier (Simplified) [8]
 Total balancing heat rejection = -0.3748 MW
 Slag quench heat rejection = 0.0023 MW

Syngas composition (volume %):
 Hydrogen (H₂) = 33.82 % Water Vapor (H₂O) = 5.339 % Nitrogen (N₂) = 26.36 %
 Carbon Monoxide (CO) = 30.16 % Carbon Dioxide (CO₂) = 3.661 % Methane (CH₄) = 0.1194 %
 Hydrogen Sulfide (H₂S) = 0.2957 % Argon (Ar) = 0.2445 %

Syngas heating value @ (77 F/25 C): LHV = 8794 kJ/kg HHV = 9698 kJ/kg

Conservation of Elemental Species

Constituent	Inlet Flows	outlet Flows
C	kg-mol/s 0.00198	0.00198
H	kg-mol/s 0.004631	0.004631
O	kg-mol/s 0.002499	0.002498
N	kg-mol/s 0.003075	0.003075
S	kg-mol/s 0.0000172	0.0000172
Ar	kg-mol/s 0.0000143	0.0000143
Ash/Slag	kg/s 0.00337	0.00337

Anexo 8. Precios de PML y horas en base, intermedio y punta.

Hora	Precio de PML 2019 [MXN/MWh]	Precio de PML 2020 [USD/kWh]	Horario
1	1,533.654	0.078	Base
2	1,480.341	0.075	Base
3	1,416.185	0.072	Base
4	1,331.581	0.067	Base
5	1,311.047	0.066	Base
6	1,330.002	0.067	Intermedio
7	1,379.344	0.070	Intermedio
8	1,380.967	0.070	Intermedio
9	1,453.891	0.074	Intermedio
10	1,550.539	0.079	Intermedio
11	1,576.468	0.080	Intermedio
12	1,642.378	0.083	Intermedio
13	1,595.118	0.081	Intermedio
14	1,589.234	0.080	Intermedio
15	1,574.966	0.080	Intermedio
16	1,586.846	0.080	Intermedio
17	1,573.344	0.080	Intermedio
18	1,558.090	0.079	Intermedio
19	1,625.706	0.082	Intermedio
20	1,649.837	0.084	Punta
21	1,733.231	0.088	Punta
22	1,539.277	0.078	Intermedio
23	1,545.068	0.078	Intermedio
24	1,552.333	0.079	Base

Anexo 9. Flujo de efectivo calculado para el Escenario 1

n	Año	Planta de generación con gasificación						Micro central hidroeléctrica					Cogeneración con gasificador mas hidroeléctrica				CHP con gasificación		Hidroelect	Resid forest	Resultado					
		Factor de Planta	Potencia bruta [kW]	Potencia neta [kW]	Generación Bruta [kWh]	Generación Neta [kWh]	Consumo auxiliares [kWh]	Consumo de la finca [kWh]	Excedente cogeneración [kWh]	Factor de Planta	Potencia Bruta [kW]	Potencia Neta [kW]	Generación Bruta [kWh]	Generación Neta [kWh]	Excedente microhidro [kWh]	Venta en Base [kWh]	Venta en Intermedio [kWh]	Venta en Punta [kWh]	Energía a la venta [kWh]	Ingresos por venta [USD]	Ingresos por CELs [USD]	Costos Fijos de O&M [USD]	Costos variables de O&M [USD]	Costos totales de O&M [USD]	Costos Resid forest [USD]	Costo Resid forest [USD]
1	2020	0.880	316	308.4	2,435,981	2,377,201	58,780	44,515	2,332,686	0.950	84	81.9	699,048	681,572	681,572	753,565	2,009,505	251,188	3,014,258	232,255	65,923	7,292	8,272	5,901	51,284	225,430
2	2021	0.880	316	308.4	2,434,763	2,376,013	58,750	44,515	2,331,498	0.950	84	81.9	698,698	681,231	681,231	753,182	2,008,486	251,061	3,012,729	241,392	68,517	7,419	8,412	6,004	52,180	235,894
3	2022	0.879	316	308.4	2,433,545	2,374,825	58,721	44,515	2,330,310	0.949	84	81.9	698,349	680,890	680,890	752,800	2,007,467	250,933	3,011,200	250,889	71,213	7,549	8,555	6,109	53,092	246,797
4	2023	0.879	316	308.4	2,432,329	2,373,637	58,691	44,515	2,329,122	0.949	84	81.9	698,000	680,550	680,550	752,418	2,006,448	250,806	3,009,672	260,760	74,014	7,681	8,700	6,216	54,020	258,158
5	2024	0.878	316	308.4	2,431,112	2,372,450	58,662	44,515	2,327,935	0.948	84	81.9	697,651	680,210	680,210	752,036	2,005,430	250,679	3,008,145	271,019	76,926	7,815	8,847	6,324	54,964	269,994
6	2025	0.878	316	308.4	2,429,897	2,371,264	58,633	44,515	2,326,749	0.948	84	81.9	697,302	679,870	679,870	751,655	2,004,412	250,552	3,006,619	281,681	79,953	7,951	8,998	6,435	55,924	282,326
7	2026	0.877	316	308.4	2,428,682	2,370,079	58,603	44,515	2,325,564	0.947	84	81.9	696,953	679,530	679,530	751,273	2,003,395	250,424	3,005,093	292,763	83,098	8,090	9,150	6,547	56,901	295,172
8	2027	0.877	316	308.4	2,427,468	2,368,893	58,574	44,515	2,324,378	0.947	84	81.9	696,605	679,190	679,190	750,892	2,002,379	250,297	3,003,568	304,281	86,367	8,232	9,305	6,662	57,896	308,554
9	2028	0.876	316	308.4	2,426,254	2,367,709	58,545	44,515	2,323,194	0.946	84	81.9	696,257	678,850	678,850	750,511	2,001,363	250,170	3,002,044	316,252	89,765	8,376	9,463	6,778	58,908	322,493
10	2029	0.876	316	308.4	2,425,041	2,366,525	58,516	44,515	2,322,010	0.946	84	81.9	695,909	678,511	678,511	750,130	2,000,347	250,043	3,000,521	328,694	93,297	8,522	9,624	6,897	59,937	337,102
11	2030	0.876	316	308.4	2,423,828	2,365,342	58,486	44,515	2,320,827	0.945	84	81.9	695,561	678,172	678,172	749,750	1,999,332	249,917	2,998,999	341,626	96,967	8,671	9,787	7,017	60,984	352,134
12	2031	0.875	316	308.4	2,422,616	2,364,159	58,457	44,515	2,319,644	0.945	84	81.9	695,213	677,833	677,833	749,369	1,998,318	249,790	2,997,477	355,066	100,782	8,822	9,953	7,140	62,050	367,883
13	2032	0.875	316	308.4	2,421,405	2,362,977	58,428	44,515	2,318,462	0.944	84	81.9	694,865	677,494	677,494	748,989	1,997,304	249,663	2,995,956	369,035	104,747	8,977	10,122	7,264	63,134	384,285
14	2033	0.874	316	308.4	2,420,194	2,361,796	58,399	44,515	2,317,281	0.944	84	81.9	694,518	677,155	677,155	748,609	1,996,290	249,536	2,994,436	383,554	108,868	9,133	10,294	7,391	64,238	401,366
15	2034	0.874	316	308.4	2,418,984	2,360,615	58,369	44,515	2,316,100	0.943	84	81.9	694,171	676,816	676,816	748,229	1,995,277	249,410	2,992,916	398,644	113,151	9,293	10,468	7,521	65,360	419,153
16	2035	0.873	316	308.4	2,417,775	2,359,434	58,340	44,515	2,314,919	0.943	84	81.9	693,823	676,478	676,478	747,849	1,994,265	249,283	2,991,397	414,238	117,603	9,455	10,646	7,652	66,502	437,675
17	2036	0.873	316	308.4	2,416,566	2,358,255	58,311	44,515	2,313,740	0.942	84	81.9	693,477	676,140	676,140	747,470	1,993,253	249,157	2,989,879	430,628	122,230	9,621	10,827	7,786	67,664	456,961
18	2037	0.873	316	308.4	2,415,358	2,357,076	58,282	44,515	2,312,561	0.942	84	81.9	693,130	675,802	675,802	747,091	1,992,241	249,030	2,988,362	447,570	127,039	9,789	11,010	7,922	68,847	477,041
19	2038	0.872	316	308.4	2,414,150	2,355,897	58,253	44,515	2,311,382	0.941	84	81.9	692,783	675,464	675,464	746,711	1,991,230	248,904	2,986,846	465,179	132,037	9,960	11,197	8,060	70,050	497,948
20	2039	0.872	316	308.4	2,412,943	2,354,719	58,224	44,515	2,310,204	0.941	84	81.9	692,437	675,126	675,126	746,333	1,990,220	248,778	2,985,330	483,480	137,231	10,134	11,387	8,201	71,274	519,715

Anexo 10. Flujo de efectivo calculado para e escenario 2

n	Año	Planta de generación con gasificación						Micro central hidroeléctrica					Cogeneración con gasificador mas hidroeléctrica				CHP con gasificación		Hidroelect	Resid forest	Resultado					
		Factor de Planta	Potencia bruta [kW]	Potencia neta [kW]	Generación Bruta [kWh]	Generación Neta [kWh]	Consumo auxiliares [kWh]	Consumo de la finca [kWh]	Excedente cogeneración [kWh]	Factor de Planta	Potencia Bruta [kW]	Potencia Neta [kW]	Generación Bruta [kWh]	Generación Neta [kWh]	Excedente microhidro [kWh]	Venta en Base [kWh]	Venta en Intermedio [kWh]	Venta en Punta [kWh]	Energía a la venta [kWh]	Ingresos por venta [USD]	Ingresos por CELs [USD]	Costos Fijos de O&M [USD]	Costos variables de O&M [USD]	Costos totales de O&M [USD]	Costos Resid forest [USD]	Costo Resid forest [USD]
1	2020	0.620	316	308.4	1,716,259	1,674,846	41,413	44,515	1,630,331	0.950	84	81.9	699,048	681,572	679,812	169,953	1,891,736	248,455	2,310,143	180,392	50,524	7,292	8,828	5,901	31,074	180,822
2	2021	0.620	316	308.4	1,715,401	1,674,009	41,392	44,515	1,629,494	0.950	84	81.9	698,698	681,231	679,471	169,868	1,890,770	248,328	2,308,965	187,488	52,512	7,419	8,927	6,004	31,617	189,033
3	2022	0.619	316	308.4	1,714,543	1,673,172	41,371	44,515	1,628,657	0.949	84	81.9	698,349	680,890	679,131	169,783	1,889,804	248,201	2,307,788	194,864	54,577	7,549	9,027	6,109	32,169	197,587
4	2023	0.619	316	308.4	1,713,686	1,672,335	41,351	44,515	1,627,820	0.949	84	81.9	698,000	680,550	678,790	169,698	1,888,839	248,074	2,306,611	202,530	56,724	7,681	9,129	6,216	32,731	206,497
5	2024	0.619	316	308.4	1,712,829	1,671,499	41,330	44,515	1,626,984	0.948	84	81.9	697,651	680,210	678,450	169,612	1,887,874	247,947	2,305,434	210,497	58,956	7,815	9,233	6,324	33,303	215,777
6	2025	0.618	316	308.4	1,711,973	1,670,663	41,309	44,515	1,626,148	0.948	84	81.9	697,302	679,870	678,110	169,527	1,886,910	247,821	2,304,258	218,778	61,275	7,951	9,339	6,435	33,885	225,443
7	2026	0.618	316	308.4	1,711,117	1,669,828	41,289	44,515	1,625,313	0.947	84	81.9	696,953	679,530	677,770	169,442	1,885,946	247,694	2,303,082	227,385	63,686	8,090	9,447	6,547	34,478	235,509
8	2027	0.618	316	308.4	1,710,261	1,668,993	41,268	44,515	1,624,478	0.947	84	81.9	696,605	679,190	677,430	169,358	1,884,983	247,568	2,301,908	236,330	66,191	8,232	9,556	6,662	35,080	245,992
9	2028	0.618	316	308.4	1,709,406	1,668,159	41,248	44,515	1,623,644	0.946	84	81.9	696,257	678,850	677,091	169,273	1,884,020	247,441	2,300,734	245,627	68,795	8,376	9,667	6,778	35,693	256,908
10	2029	0.617	316	308.4	1,708,551	1,667,325	41,227	44,515	1,622,810	0.946	84	81.9	695,909	678,511	676,751	169,188	1,883,058	247,315	2,299,561	255,290	71,501	8,522	9,780	6,897	36,317	268,276
11	2030	0.617	316	308.4	1,707,697	1,666,491	41,206	44,515	1,621,976	0.945	84	81.9	695,561	678,172	676,412	169,103	1,882,096	247,188	2,298,388	265,333	74,314	8,671	9,896	7,017	36,951	280,112
12	2031	0.617	316	308.4	1,706,843	1,665,658	41,186	44,515	1,621,143	0.944	84	81.9	695,213	677,833	676,073	169,018	1,881,135	247,062	2,297,215	275,771	77,238	8,822	10,013	7,140	37,597	292,437
13	2032	0.616	316	308.4	1,705,990	1,664,825	41,165	44,515	1,620,310	0.944	84	81.9	694,865	677,494	675,734	168,933	1,880,174	246,936	2,296,044	286,620	80,276	8,977	10,131	7,264	38,254	305,269
14	2033	0.616	316	308.4	1,705,137	1,663,992	41,145	44,515	1,619,477	0.944	84	81.9	694,518	677,155	675,395	168,849	1,879,214	246,810	2,294,873	297,895	83,434	9,133	10,252	7,391	38,923	318,630
15	2034	0.616	316	308.4	1,704,284	1,663,160	41,124	44,515	1,618,645	0.943	84	81.9	694,171	676,816	675,057	168,764	1,878,254	246,684	2,293,702	309,614	86,717	9,293	10,376	7,521	39,603	332,539
16	2035	0.615	316	308.4	1,703,432	1,662,329	41,103	44,515	1,617,814	0.943	84	81.9	693,823	676,478	674,718	168,680	1,877,295	246,558	2,292,532	321,794	90,128	9,455	10,501	7,652	40,295	347,019
17	2036	0.615	316	308.4	1,702,580	1,661,498	41,083	44,515	1,616,983	0.942	84	81.9	693,477	676,140	674,380	168,595	1,876,336	246,432	2,291,363	334,454	93,674	9,621	10,628	7,786	40,999	362,094
18	2037	0.6																								

Anexo 11. Evaluación económica y financiera de Escenario 1

Durante construcción		
Concepto	Interés	Monto [USD]
Construcción	3%	62,580
Comisión	1%	20,860
Compromiso	0.5%	10,430

TREMA	15%
Apalancamiento	80%
Monto de apalancamiento [USD]	2,086,007
Capital propio [USD]	521,502
Tasa de interés de Financiamiento	12.0%
Pagos anuales	10
Monto de pagos anuales [USD]	369,190

Capital propio más intereses de construcción [USD] 615,372

n	Año	Evaluación económica			Evaluación Financiera					
		Flujo Neto Anual [USD]	Inversión inicial [USD]	Flujo Neto sin Pagos [USD]	Interés [USD]	Amortización [USD]	Pago [USD]	Saldo [USD]	Resultado Neto Pagos F [USD]	Flujo Neto con Pagos F [USD]
0	2019		2,607,508	-2607508						
1	2020	225,430		-2,382,078	250,321	118,869	369,190	1,967,137	594,620	-759,132
2	2021	235,894		-2,146,184	236,056	133,134	369,190	1,834,004	605,084	-892,428
3	2022	246,797		-1,899,387	220,080	149,110	369,190	1,684,894	615,988	-1,014,821
4	2023	258,158		-1,641,229	202,187	167,003	369,190	1,517,891	627,348	-1,125,853
5	2024	269,994		-1,371,235	182,147	187,043	369,190	1,330,848	639,185	-1,225,049
6	2025	282,326		-1,088,909	159,702	209,488	369,190	1,121,359	651,516	-1,311,913
7	2026	295,172		-793,737	134,563	234,627	369,190	886,732	664,362	-1,385,932
8	2027	308,554		-485,183	106,408	262,782	369,190	623,950	677,744	-1,446,568
9	2028	322,493		-162,690	74,874	294,316	369,190	329,634	691,683	-1,493,265
10	2029	337,012		174,321	39,556	329,634	369,190	0	706,202	-1,525,444
11	2030	352,134		526,455					352,134	-1,173,310
12	2031	367,883		894,338					367,883	-805,427
13	2032	384,285		1,278,624					384,285	-421,141
14	2033	401,366		1,679,990					401,366	-19,775
15	2034	419,153		2,099,143					419,153	399,378
16	2035	437,675		2,536,818					437,675	837,053
17	2036	456,961		2,993,778					456,961	1,294,013
18	2037	477,041		3,470,819					477,041	1,771,054
19	2038	497,948		3,968,767					497,948	2,269,002
20	2039	519,715		4,488,482					519,715	2,788,717

Anexo 12. Evaluación económica y financiera de Escenario 2

Durante construcción		
Concepto	Interés	Monto [USD]
Construcción	3%	62,580
Comisión	1%	20,860
Compromiso	0.5%	10,430

TREMA	15%
Apalancamiento	80%
Monto de apalancamiento [USD]	2,086,007
Capital propio [USD]	521,502
Tasa de interés de Financiamiento	12.0%
Pagos anuales	10
Monto de pagos anuales [USD]	369,190

Capital propio mas intereses de construcción [USD] 615,372

n	Año	Evaluación económica			Evaluación Financiera					
		Flujo Neto Anual [USD]	Inversión inicial [USD]	Flujo Neto sin Pagos [USD]	Interés [USD]	Amortización [USD]	Pago [USD]	Saldo [USD]	Resultado Neto Pagos F [USD]	Flujo Neto con Pagos F [USD]
0	2019		2,607,508	-2607508						
1	2020	225,430		-2,382,078	250,321	118,869	369,190	1,967,137	594,620	-759,132
2	2021	235,894		-2,146,184	236,056	133,134	369,190	1,834,004	605,084	-892,428
3	2022	246,797		-1,899,387	220,080	149,110	369,190	1,684,894	615,988	-1,014,821
4	2023	258,158		-1,641,229	202,187	167,003	369,190	1,517,891	627,348	-1,125,853
5	2024	269,994		-1,371,235	182,147	187,043	369,190	1,330,848	639,185	-1,225,049
6	2025	282,326		-1,088,909	159,702	209,488	369,190	1,121,359	651,516	-1,311,913
7	2026	295,172		-793,737	134,563	234,627	369,190	886,732	664,362	-1,385,932
8	2027	308,554		-485,183	106,408	262,782	369,190	623,950	677,744	-1,446,568
9	2028	322,493		-162,690	74,874	294,316	369,190	329,634	691,683	-1,493,265
10	2029	337,012		174,321	39,556	329,634	369,190	0	706,202	-1,525,444
11	2030	352,134		526,455					352,134	-1,173,310
12	2031	367,883		894,338					367,883	-805,427
13	2032	384,285		1,278,624					384,285	-421,141
14	2033	401,366		1,679,990					401,366	-19,775
15	2034	419,153		2,099,143					419,153	399,378
16	2035	437,675		2,536,818					437,675	837,053
17	2036	456,961		2,993,778					456,961	1,294,013
18	2037	477,041		3,470,819					477,041	1,771,054
19	2038	497,948		3,968,767					497,948	2,269,002
20	2039	519,715		4,488,482					519,715	2,788,717

Anexo 13. Analisis de sensibilidad de la evaluación económica para el Escenario 1

Indicador	Caso base	Precio de los CELs		Inversión Inicial		Costo de residuos forestales (CRF)		Combinado (+)20%CEL (-)30%Inver (-)50%CRF
		(+)10%	(+)20%	(-)20%	(-)30%	(-)30%	(-)50%	
VPN en 2020 [USD]	-\$770,466.85	-\$718,768.13	-\$667,069.42	-\$248,965.18	\$11,785.65	-\$664,404.83	-\$593,696.82	\$291,953.11
AE [USD]	-\$123,090.92	-\$114,831.45	-\$106,571.99	-\$39,775.04	\$1,882.89	-\$106,146.29	-\$94,849.88	\$46,642.86
B/C	0.705	0.724	0.744	0.881	1.006	0.745	0.772	1.160
TIR [%]	10%	10%	11%	13%	15.10%	11%	11%	17%
TIRM [%]	13%	13%	13%	14%	15.04%	13%	14%	16%
PR [años]	9.992	9.818	9.654	7.748	7.126	9.620	8.390	6.456

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 14. Analisis de sensibilidad de la evaluación financiera para el Escenario 1

Indicador	Caso base	Precio de los CELs		Inversión Inicial		Costo de residuos forestales (CRF)		Tasa de financiamiento		Apalancamiento		Combinado (+)20%CEL (-)30%Inver (-)50%CRF
		(+)10%	(+)20%	(-)20%	(-)30%	(-)30%	(-)50%	(-) 10%	(-) 20%	(+) 10%	(-) 10%	
VPN en 2020 [USD]	\$3,074,549.44	\$3,126,248	\$3,177,947	\$2,827,048	\$2,703,297	\$3,180,611	\$3,251,319	\$2,984,470	\$2,896,314	\$3,459,051	\$2,690,048	\$2,983,465
AE [USD]	\$491,194.54	\$499,454	\$507,713	\$451,653	\$431,883	\$508,139	\$519,436	\$476,803	\$462,719	\$552,623	\$429,766	\$476,643
B/C	5.996	6.080	6.164	6.743	7.276	6.169	6.284	5.850	5.707	9.312	4.302	7.926
TIR [%]	98%	99%	101%	108%	115%	101%	103%	96%	93%	153%	70%	124%
TIRM [%]	26%	26%	26%	27%	27%	26%	26%	26%	25%	29%	24%	28%
PR [años]	14.047	13.767	13.501	11.992	10.964	13.494	13.152	13.619	13.200	14.453	13.642	8.963

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 15. Analisis de sensibilidad de la evaluación económica para el Escenario 2

Indicador	Caso base	Precio de los CELs		Inversión Inicial		Costo de residuos forestales (CRF)		Combinado (+)20%CEL (-)30%Inver (-)50%CRF
		(+)10%	(+)20%	(-)20%	(-)30%	(-)30%	(-)50%	
VPN en 2020 [USD]	- \$1,141,862.32	-\$1,102,240.82	-\$1,062,619.31	-\$620,360.66	-\$359,609.82	-\$1,077,597.49	-\$1,034,754.26	-\$173,258.75
AE [USD]	-\$182,425.60	-\$176,095.61	-\$169,765.62	-\$99,109.73	-\$57,451.79	-\$172,158.56	-\$165,313.86	-\$27,680.07
B/C	0.562	0.577	0.592	0.703	0.803	0.587	0.603	0.905
TIR [%]	7%	8%	8%	10%	12%	8%	8%	14%
TIRM [%]	12%	12%	12%	13%	14%	12%	12%	14%
PR [años]	11.562	11.354	10.157	9.994	8.209	10.221	10.006	7.533

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 16. Analisis de sensibilidad de la evaluación financiera para el Escenario 2

Indicador	Caso base	Precio de los CELs		Inversión Inicial		Costo de residuos forestales (CRF)		Tasa de financiamiento		Apalancamiento		Combinado (+)20%CEL (-)30%Inver (-)50%CRF
		(+)10%	(+)20%	(-)20%	(-)30%	(-)30%	(-)50%	(-) 10%	(-) 20%	(+) 10%	(-) 10%	
VPN en 2020 [USD]	2,703,153	\$2,742,775	\$2,782,397	\$2,455,652	\$2,331,902	\$2,767,419	\$2,810,262	\$2,613,075	\$2,524,918	\$3,087,656	\$2,318,652	\$2,518,253
AE [USD]	431,859	\$438,190	\$444,520	\$392,319	\$372,548	\$442,127	\$448,972	\$417,469	\$403,385	\$493,288	\$370,431	\$402,320
B/C	5.393	5.457	5.521	5.988	6.413	5.497	5.567	5.246	5.103	8.419	3.846	6.846
TIR [%]	91%	92%	93%	98%	104%	92%	93%	88%	85%	142%	64%	110%
TIRM [%]	25%	25%	25%	26%	26%	25%	25%	25%	25%	28%	23%	27%
PR [años]	16.673	16.336	15.015	14.083	12.788	16.156	15.830	16.134	15.605	17.184	16.162	11.751

Fuente: Elaboración propia.

Referencias

- [1] Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura, «Panorama agroalimentario,» 2016. [En línea]. Available: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/200636/Panorama_Agroalimentario_Caf_2016.pdf. [Último acceso: Noviembre 2018].
- [2] D. Arenas, Artist, *Propuesta de diseño de un proceso para la generación de energía eléctrica a partir de los residuos de la producción de café*. [Art]. Pontificia Universidad Javeriana, 2009.
- [3] R. Rathinavelu y G. Graziosi, «Posibles usos alternativos de los residuos y subproductos del café,» 17 Agosto 2005. [En línea]. Available: <http://www.ico.org/documents/ed1967c.pdf>.
- [4] J. C. Schallenberg Rodríguez, G. Piernavieja Izquierdo, C. Hernández Rodríguez, P. Unamunzaga Falcón, R. García Déniz, M. DíazTorres, D. Cabrera Pérez, G. Martel Rodríguez, J. Pardilla Fariña y V. Subiela Ortin, *Energías renovables y eficiencia energética*, España: InstitutoTecnológico de Canarias, 2008.
- [5] REN21, «Situación global de las energías renovables,» 2018. [En línea]. Available: <http://www.idma.cl/2018/06/06/situacion-global-de-las-energias-renovables/>.
- [6] Deloitte, «2018: Este es el panorama del sector de energías renovables en México,» 28 Junio 2018. [En línea]. Available: <https://www2.deloitte.com/mx/es/pages/dnoticias/articulos/panorama-energias-renovables-en-mexico.html#>.
- [7] M. Conde y Z. Ramos, Artists, *Diseño de un calentador de placa de calor para calentamiento de agua para uso domestico*. [Art]. Universidad Nacional Autónoma de México, 2014.
- [8] E. Martinez, Artist, *Análisis técnico y económico de la energía eólica*. [Art]. Universidad Nacional Autónoma de México, 2013.
- [9] M. Alcaraz, Artist, *Repotenciación de centrales hidroeléctricas: una alternativa para aumentar la capacidad de generación de energía eléctrica*. [Art]. Universidad Nacional Autónoma de México, 2011.
- [10] J. Dagá, Artist, *Aprovechamiento hidroeléctrico de las mareas y su posible desarrollo en Chile*. [Art]. Universidad de Chile, 2008.
- [11] G. Arias y A. Acevedo, Artists, *Estado actual de la producción geotérmica en Colombia*. [Art]. Universidad Nacional Abierta y a Distancia, 2017.
- [12] O. García y M. Sosa, Artists, *Generación de energía eléctrica a través de la biomasa*. [Art]. Instituto Politécnico Nacional, 2010.

- [13] Novelec, «Sistemas de aprovechamiento de la biomasa,» 3 Agosto 2017. [En línea]. Available: <https://blog.gruponovelec.com/energias-renovables/sistemas-aprovechamiento-la-biomasa/>.
- [14] J. Carrasco Garcia, «Combustión directa de la biomasa,» 2008. [En línea]. Available: http://api.eoi.es/api_v1_dev.php/fedora/asset/eoi:45279/componente45278.pdf. [Último acceso: 2019].
- [15] S. Jiménez, «Energía 2012,» 2012. [En línea]. Available: <http://www.energia2012.es/sites/default/files/Combusti%C3%B3n%20de%20biomasa.pdf>. [Último acceso: 2019].
- [16] I. Corona Zúñiga, Biodigestores, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, 2007.
- [17] B. Campos Cuní, «Metodología para determinar los parámetros de diseño y construcción de biodigestores para el sector cooperativo y campesino,» *Ciencias Técnicas Agropecuarias*, vol. 20, nº 2, 2011.
- [18] L. S. Moreno Arciniegas y F. E. Rodríguez Corredor, Factibilidad de producción de gas de síntesis a partir de la gasificación de asfaltenos, Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas, 2009.
- [19] R. J. Macías Naranjo, Escalado de reactores de gasificación en lecho fluidizado, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, 2015.
- [20] F. Ramiro, Artist, *Estudio de viabilidad y diseño de una planta de cogeneración para una industria cárnica*. [Art]. Universidades Carlos III de Madrid Escuela Politécnica superior, 2009.
- [21] R. Argemi, «Cogeneración. La eficiencia es fundamental,» Octubre 2016. [En línea]. Available: https://www.futureenergyweb.es/pdf/articulos/2016-10/FuturEnergy_Oct16-71-74.pdf. [Último acceso: Noviembre 2018].
- [22] Wartsila, «Motor de combustión para la generación de energía: Introducción,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.wartsila.com/energy/learning-center/technical-comparisons/combustion-engine-for-power-generation-introduction>. [Último acceso: Abril 2019].
- [23] Area tecnología, «Motores de gas,» Area tecnología, [En línea]. Available: <https://www.areatecnologia.com/motores-de-gas.htm>. [Último acceso: Abril 2019].
- [24] M. Y. Rafael Morales y A. Hernández Guzmán, «Caracterización de un motor de combustión interna con dos tipos de combustible,» 2014. [En línea]. Available: <https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt417.pdf>. [Último acceso: Abril 2019].

- [25] Plantas de cogeneración, «Las plantas de cogeneración,» Renovec, 2013. [En línea]. Available: <http://www.plantasdecogeneracion.com/index.php/las-plantas-de-cogeneracion>. [Último acceso: Noviembre 2018].
- [26] Renovetec, «Tipos de turbinas de vapor,» Renovec, 2010. [En línea]. Available: <http://www.renovetec.com/tiposturbinasvapor.html>. [Último acceso: Noviembre 2018].
- [27] Netvalue forensic, «Cogeneración y ciclos combinados,» Netvalue forensic, 2014. [En línea]. Available: http://www.netvalueforensic.com/forensic/sectores-regulados/cogeneracion-ciclos-combinados?doing_wp_cron. [Último acceso: Noviembre 2018].
- [28] H. Parra, Artist, *Prospectivas de la cogeneración con gasificación de combustibles residuales en México*. [Art]. Universidad Nacional Autónoma de México, 2010.
- [29] Energy Information Administration, «Natural gas,» 13 Febrero 2019. [En línea]. Available: <https://www.eia.gov/dnav/ng/hist/rngwhhdM.htm>. [Último acceso: 13 Febrero 2019].
- [30] Instituto del Café de Costa Rica, «Guía Técnica para el cultivo del café,» Junio 2011. [En línea]. Available: <http://www.icafe.cr/wp-content/uploads/cicafe/documentos/GUIA-TECNICA-V10.pdf>. [Último acceso: Octubre 2018].
- [31] Café de Colombia, «Post cosecha,» Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, 2010. [En línea]. Available: http://www.cafedecolombia.com/particulares/es/sobre_el_cafe/el_cafe/post-cosecha/. [Último acceso: Noviembre 2018].
- [32] C. González, J. Sanz y C. Oliveros, «Control de caudal y temperatura de aire en el secado mecánico de café,» *Cenicafé*, pp. 281-296, 2010.
- [33] Mocay, «El proceso del tueste del café, paso a paso,» 9 Febrero 2017. [En línea]. Available: <https://www.mocay.com/blog/como-se-tuesta-el-cafe/>.
- [34] N. Granado, «Que maquinas necesita una finca de café,» 12 Diciembre 2016. [En línea]. Available: <http://www.cafekinetik.net/maquinaria-finca-cafe/>. [Último acceso: Noviembre 2018].
- [35] Super user, «Marco legal aplicable a la cogeneración,» 30 Octubre 2015. [En línea]. Available: <https://www.e-xxi.com/index.php/15-e-xxi-blog/101-marco-legal-aplicable-a-la-cogeneracion>.
- [36] México, Congreso de la República, Ley del servicio público de energía eléctrica, Ciudad de México: Diario Oficial de la Federación, 2014.
- [37] México, Congreso de la República, Ley para el Aprovechamiento de las Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética, Ciudad de México: Diario Oficial de la Federación, 2013.

- [38] México, Congreso de la República, Ley de Transición Energética, Ciudad de México: Diario Oficial de la Federación, 2015.
- [39] México, Congreso de la República, Ley General de Cambio Climático, Ciudad de México: Diario Oficial de la Federación, 2018.
- [40] México, Congreso de la República, Ley de los Órganos Reguladores Coordinados en Materia Energética, Ciudad de México: Diario Oficial de la Federación, 2014.
- [41] México, Congreso de la República, Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos, Ciudad de México: Diario Oficial de la Federación, 2008.
- [42] México, Congreso de la República, Ley de Inversión Extranjera, Ciudad de México: Diario Oficial de la Federación, 2018.
- [43] C. d. I. R. México, Ley de Desarrollo Rural Sustentable, Ciudad de México: Diario Oficial de la Federación, 2018.
- [44] México, Congreso de la República, Ley de Asociaciones Público Privadas, Ciudad de México: Diario Oficial de la Federación, 2018.
- [45] México, Congreso de la República, Ley General del Equilibrio Ecológico y la protección al ambiente, Ciudad de México: Diario Oficial de la Federación, 2015.
- [46] México, Congreso de la República, Ley de la Industria Eléctrica, Ciudad de México: Diario Oficial de la Federación, 2014.
- [47] CRE Comisión Reguladora de Energía, «Preguntas Frecuentes sobre los Certificados de Energías Limpias,» 18 Agosto 2016. [En línea]. Available: <https://www.gob.mx/cre/articulos/preguntas-frecuentes-sobre-los-certificados-de-energias-limpias>.
- [48] SADER Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, «México, onceavo productor mundial de café,» 2 Marzo 2018. [En línea]. Available: <https://www.gob.mx/sader/es/articulos/mexico-onceavo-productor-mundial-de-cafe>.
- [49] Mycoffeebox, «Productores de café en Chiapas,» 2017. [En línea]. Available: <https://mycoffeebox.com/productores-de-cafe-en-chiapas/>. [Último acceso: Noviembre 2018].
- [50] Finca Nuevo México, «Finca Nuevo México,» Enero 2019. [En línea]. Available: <https://fincanuevomexico.com/>. [Último acceso: Enero 2019].
- [51] Anacafé, Guía técnica de caficultura, Anacafé Asociación Nacional del café, 2006.
- [52] J. Wong, S. Guyot, R. Rodríguez, G. Gutiérrez, J. Contreras, G. Saucedo y C. Aguilar, «Alternativas actuales para el manejo sustentable de los residuos,» Diciembre 2013. [En

- línea]. Available: <http://www.posgradoeinvestigacion.uadec.mx/AQM/No.%2010/6.html>. [Último acceso: Enero 2019].
- [53] N. Rodríguez Valencia, «Manejo de residuos en la industria cafetera,» 2000. [En línea]. Available: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/acodal/xxx.pdf>. [Último acceso: Febrero 2019].
- [54] N. Rodríguez y D. Zambrano, Los subproductos del café: fuente de energía renovable, Cenicafe Centro Nacional de Investigaciones de café, 2010.
- [55] Goggle, «Goggle Earth,» Goggle, Enero 2019. [En línea]. Available: <https://www.google.es/earth/versions/>. [Último acceso: Enero 2019].
- [56] Y. Cengel y M. Boles, Termodinámica, McGRAW-HILL, 2009.
- [57] Weather Spark, «El clima promedio en Pijijiapan México,» Weather Spark, Abril 2019. [En línea]. Available: <https://es.weatherspark.com/y/9980/Clima-promedio-en-Pijijiapan-M%C3%A9xico-durante-todo-el-a%C3%B1o>. [Último acceso: Abril 2019].
- [58] J. B. Meledéz diaz, A. E. Rodríguez Urrutia y G. A. Urrutia Cortéz, Implementación de la tecnología de la gasificación para operar en los beneficio de café, Universidad Centroamericana, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, 2006.
- [59] Ankur Scientific, «Gasificadores Ankur,» Ankur Scientific, 2019. [En línea]. Available: <https://www.ankurscientific.com/ankur-gasifiers-biomass-Combo.html#prettyPhoto>. [Último acceso: Julio 2019].
- [60] T. G. Obernberger Ingwald, «Cost assessment of selected decentralised CHP applications based on biomass combustion and biomass gasification,» *Proceedings of the 16th European Biomass Conference & Exhibition*, 2008.
- [61] N. Proenza Pérez, D. Travieso Pedroso, J. Santana Antunes, E. Blanco Machin, J. Luz Silveira y E. Eduardo Tuna, «Análisis termoeconómico de un sistema de cogeneración utilizando un gasificador concurrente (imbert) de nuevo tipo acoplado a un motor de combustión interna,» Noviembre 2013. [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/publication/314133739_Analisis_termoeconomico_de_un_sistema_de_cogeneracion_utilizando_un_gasificador_concurrente_Imbert_de_nuevo_tipo_acoplado_a_un_motor_de_combustion_interna. [Último acceso: Junio 2019].
- [62] E. Martínez, W. Vicente y M. Salinas-Vázquez, «Simulación de un Sistema de Gasificación Integrado a un Ciclo Combinado,» *Información Tecnológica*, vol. 17, nº 6, pp. 141-146, 2006.
- [63] Cogenera México, «Motores de combustión interna,» 2012. [En línea]. Available: <http://www.cogeneramexico.org.mx/menu.php?m=77>. [Último acceso: Abril 2019].

- [64] D. González Zúñiga, Análisis conceptual de una planta de cogeneración en el campus Monterrey, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Campus Monterrey, 2000.
- [65] Weather-Atlas, «Previsión meteorológica y clima mensual San Cristóbal de las Casas, México,» 2019. [En línea]. [Último acceso: Abril 2019].
- [66] International Renewable Energy Agency (IRENA), «Renewable energy technologies: cost analysis series. Biomass for power generation,» Junio 2012. [En línea]. Available: https://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/RE_Technologies_Cost_Analysis-BIOMASS.pdf. [Último acceso: Abril 2019].
- [67] International Renewable Energy Agency (IRENA), «Renewable energy technologies: cost analysis series. Hydropower,» Junio 2012. [En línea]. Available: https://www.irena.org/documentdownloads/publications/re_technologies_cost_analysis-hydropower.pdf. [Último acceso: Abril 2019].
- [68] International Atomic Energy Agency (IAEA), Net energy analysis of different electricity generation systems, Vienna, Austria: IAEA, 1994.
- [69] N. E. Zavala Soriano, Artist, *Análisis de opción de repotenciación de la central eléctrica Acajutla El Salvador*. [Art]. Universidad Nacional Autónoma de México, 2018.
- [70] G. León de los Santos, Notas de sistemas avanzados de generación de potencia, México: Facultad de Ingeniería UNAM.
- [71] Global-rates, «Inflación Estados Unidos - índice de precios al consumo (IPC),» Global-rates, 2019. [En línea]. Available: <https://es.global-rates.com/estadisticas-economicas/inflacion/indice-de-precios-al-consumo/ipc/estados-unidos.aspx>. [Último acceso: Septiembre 2019].
- [72] Inflation.eu, «Inflación histórica México - inflación IPC,» Inflation.eu, 2019. [En línea]. Available: <https://es.inflation.eu/tasas-de-inflacion/mexico/inflacion-historica/ipc-inflacion-mexico.aspx>. [Último acceso: Septiembre 2019].
- [73] D. I. Mercado Rivera y O. A. García Hidalgo, Artists, *Escenarios de Financiamiento de un proyecto de eficiencia energética, caso de estudio: Hotel Mision Tlaxcala*. [Art]. Universidad Autónoma de México, Facultad de Ingeniería., 2016.
- [74] MILENIO, «Precio del dólar hoy 30 de agosto de 2019,» MILENIO, 30 Agosto 2019. [En línea]. Available: <https://www.milenio.com/negocios/precio-dolar-viernes-30-agosto-2019-tipo-cambio>. [Último acceso: Octubre 2019].
- [75] Comisión Reguladora de Energía, Disposiciones administrativas de carácter general, los modelos de contrato, la metodología de cálculo de contraprestación y las especificaciones

técnicas generales, aplicables a las centrales eléctricas de generación distribuida y generación limpia, Ciudad de México: Diario Oficial de la Federación, 2017.

- [76] Centro Nacional de Control de Energía, «Diagramas Unifilares del Sistema Eléctrico Nacional,» 2018. [En línea]. [Último acceso: 2019].
- [77] Comisión Regulatoria de Energía, «Tarifa H-M,» 2013. [En línea]. Available: https://app.cfe.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/Tarifas/tarifas_negocio.asp?Tarifa=HM&Anio=2013&mes=8. [Último acceso: 2019].
- [78] Centro Nacional de Control de Energía, «Historia de Precios de Energía Marginales Locales,» Septiembre 2019. [En línea]. Available: https://www.cenace.gob.mx/SIM/VISTA/REPORTES/H_RepPreEnergiaSisMEM.aspx?N=9&opc=divCssPreEnergia&site=Precios%20de%20la%20energ%C3%ADa/Precios%20Marginales%20Locales/MTR/Mensuales&tipoArch=C&tipoUni=SIN&tipo=Mensuales&nombrenodop=Precios%20Marginales%20Lo. [Último acceso: Septiembre 2019].
- [79] CENACE, «Anuncian SENER y CENACE resultados preliminares de la Tercera Subasta de Largo Plazo,» 2017. [En línea]. Available: <https://www.gob.mx/cenace/prensa/anuncian-sener-y-cenace-resultados-preliminares-de-la-tercera-subasta-de-largo-plazo-141668>. [Último acceso: 2019].
- [80] Centro de Estudios para la Preparación y Evaluación Socioeconómica de Proyectos (CEPEP), «Indicadores de Rentabilidad,» 2017. [En línea]. Available: file:///C:/Users/juanm/Downloads/indicadores_rentabilidad.pdf. [Último acceso: 2019].