



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Análisis de un sistema agrícola basado en la tecnología: La  
Milpa Sustentable y aprovechamiento energético de sus  
residuos en la comunidad de Plan de Escobas Huautla de  
Jiménez, Oaxaca**

**TESIS**

Que para obtener el título de

**Ingeniero Eléctrico Electrónico**

**P R E S E N T A**

José Zynhué Miranda Gamboa

**DIRECTOR DE TESIS**

Dr. Gabriel León de los Santos



**Ciudad Universitaria, Cd. MX. 2022**

<b>Índice General</b>	<b>pagina</b>
I. Introducción . . . . .	3
II. Problemática . . . . .	6
III. Propuesta . . . . .	7
IV. Objetivo General . . . . .	8
V. Objetivos Particulares . . . . .	8
<b>Capítulo 1 Energía</b>	
1.1 Introducción . . . . .	9
1.2 Energía, desarrollo y medio ambiente . . . . .	9
1.3 Energía renovable de la biomasa . . . . .	12
1.3.1 La biomasa como energía renovable . . . . .	13
1.4 Tecnologías para la generación eléctrica . . . . .	14
1.5 Tecnologías de interés para uso de la biomasa . . . . .	15
1.6 Proceso de cogeneración y gasificación . . . . .	15
1.6.1 Gasificadores de lecho fijo . . . . .	17
1.6.1.1 Gasificadores de lecho fijo Up draft . . . . .	17
1.6.1.2 Gasificadores de lecho fijo Down draft . . . . .	18
1.6.1.3 Gasificadores de lecho fijo Cross draft . . . . .	19
1.6.2 Gasificadores de lecho fluido . . . . .	20
1.6.2.1 Gasificadores de lecho fluido Burbujeante . . . . .	20
1.6.2.2 Gasificadores de lecho fluido circulante . . . . .	21
1.6.3 Gasificadores por corriente de arrastre . . . . .	22
1.6.4 Tecnologías emergentes . . . . .	24
1.6.4.1 Gasificador compacto “UNIQUE” . . . . .	24
1.6.4.2 Combinación de pirolisis y gasificación . . . . .	25
1.6.4.3 Combinación de la gasificación y la combustión . . . . .	26
1.6.4.4 Gasificación por plasma . . . . .	27
1.6.4.5 Gasificación en agua súper crítica . . . . .	28
1.7 Marco legal . . . . .	28
1.7.1 Generación distribuida . . . . .	28
1.7.2 Ley Federal de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticas . . . . .	30
1.8 Conclusión capítulo 1 . . . . .	31
<b>Capítulo 2 (“La Milpa Sustentable”)</b>	
2.1 Introducción . . . . .	32
2.2 El maíz y La Milpa Sustentable . . . . .	32
2.2.1 El cultivo del maíz . . . . .	34
2.2.2 La Milpa Sustentable . . . . .	35
2.2.3 El maíz como cultivo energético. . . . .	36
2.4 La comunidad de Plan de Escobas, Huautla de Jiménez, Oaxaca . . . . .	37
2.5 El cultivo y producción del maíz, La Milpa Sustentable en la comunidad . . . . .	40
2.5.1 Consumo de agua por kg de maíz . . . . .	40
2.6 Rendimiento cultivo tradicional . . . . .	41
2.7 Rendimiento del sitio implementando La Milpa Sustentable . . . . .	42
2.9 Conclusión capítulo 2 . . . . .	45

<b>Capítulo 3 Propuesta de planta con base a cogeneración y gasificación</b>	
3.1 Introducción . . . . .	46
3.2 Diseño conceptual y propuesta operativa del sistema energético en base a gasificación y La Milpa Sustentable . . . . .	46
3.3 Esquema de producción de biomasa . . . . .	46
3.4 Requerimientos y datos de operación . . . . .	47
3.5 Modelado y evaluación de la Propuesta operativa . . . . .	48
3.6 Resumen de resultados de parámetros de desempeño técnico y energético 63. . . . .	52
3.7 Usos del calor resultante . . . . .	54
3.8 Conclusión capítulo 3 . . . . .	59
<b>Capítulo 4 Análisis económico y financiero</b>	
4.1 Introducción . . . . .	60
4.2 Análisis económico y financiero incluyendo ingresos por energía, CELs y energía térmica . . . . .	61
4.2.1 Ingresos por energía térmica . . . . .	61
4.3. Costos de inversión inicial . . . . .	62
4.4. Ingresos por CELS . . . . .	62
4.5 Costos de operación y mantenimiento . . . . .	62
4.6 Caso 1 Energía eléctrica PML y Precio de mercado para los residuos de biomasa . . . . .	63
4.7 Caso 2 Medición Neta y Precio de mercado para los residuos de biomasa . . . . .	65
4.8 Conclusiones capítulo 4 . . . . .	67
<b>Capítulo 5 Impacto social y ambiental</b>	
5.1 Introducción . . . . .	68
5.2 Impacto en la comunidad. . . . .	69
5.3 Fenómenos ambientales del cultivo energético . . . . .	69
5.4 Impacto en la etapa de gasificación . . . . .	70
5.5 Conclusiones capítulo 5 . . . . .	70
<b>Capítulo 6 Conclusiones Generales</b>	71
VI. Índice de figuras . . . . .	74
VII. Índice de tablas . . . . .	75
VIII. Índice de ecuaciones . . . . .	76
IX. Índice de anexos . . . . .	77
X. Glosario de términos . . . . .	77
XI. Bibliografía. . . . .	78
XII. Bibliografía complementaria . . . . .	80
Anexos . . . . .	81

## **I. Introducción**

En la actualidad se ha consolidado el cuidado del medio ambiente, en los sectores social, industrial y gubernamental, sin duda por los cambios registrados en el clima durante los últimos 40 años, y su aceleración en los últimos 15 años, esto ya no puede ser negado por nadie en este planeta, derivado de las situaciones extremas y peligrosas en los cambios de los patrones del clima en lluvias, temperaturas, sequías, etc.

El calentamiento global de la atmósfera, es un proceso paulatino que siempre ha existido y es natural. Sin embargo, en la actualidad suele conocerse como cambio climático al producido por la acción humana que ha acelerado su cambio en los últimos 200 años.

El calentamiento global está asociado al efecto invernadero, que es un fenómeno producido por la combustión de hidrocarburos principalmente, que emiten gases que componen la atmósfera terrestre, la cual retiene parte de la energía emitida por el suelo tras haber sido calentado por la radiación del Sol.

En referencia a la sustentabilidad y sostenibilidad, el concepto suele utilizarse como sinónimo de sostenible en el ámbito de la ecología; un proceso sustentable o sostenible es aquel que se puede mantener en el tiempo por sí mismo, sin ayuda exterior y sin que se produzca la escasez de los recursos existentes.

El desarrollo sustentable, pretende satisfacer las necesidades actuales sin comprometer las posibilidades de las generaciones futuras; para lograr el desarrollo sustentable, los recursos renovables no deben utilizarse a un ritmo superior al de su generación, mientras que los recursos no renovables deben usarse con moderación hasta que puedan ser reemplazados por recursos renovables.

A estos conceptos hoy por hoy se suma para dar unas bases más sólidas de desarrollo para las sociedades, un ejemplo es el de la Economía Circular, que no es nuevo, solo que con el enfoque moderno integra los conceptos referentes para buscar reducir al mínimo los residuos producidos en las actividades humanas al buscar, el aprovechamiento integral del 100% de los recursos extraídos de la naturaleza.

El impulso dado al desarrollo de la tecnología asociada al aprovechamiento de las energías renovables a partir de la década de los sesenta, ha permitido que diversas tecnologías en fase experimental se conviertan en un producto capaz de competir en el mercado y ganar terreno en otras alternativas que operen en vez de los combustibles fósiles, por ejemplo, paneles solares, turbinas eólicas y procesos de gasificación.

Por el lado de las formas de obtener energía eléctrica, se ha venido masificando la generación distribuida en su modalidad de autoabastecimiento, que es la utilización de energía eléctrica para la satisfacción de las necesidades propias del permisionario o del conjunto de copropietarios o socios.

La cogeneración es una tecnología puntera que produce electricidad y agua caliente para calefacción al mismo tiempo en plantas que queman gas natural, por ejemplo. La cogeneración resulta en un uso más eficiente de los recursos de manera que se reducen las emisiones de CO<sub>2</sub> de forma significativa y los residuos energéticos.

Se emplea el término biomasa para denominar a una fuente de energía renovable, que se basa principalmente en la utilización de materia orgánica vegetal de origen diverso como maderas de árboles de crecimiento rápido, desechos de la industria maderera, cosechas azucareras, cosechas almidonadas, cosechas aceiteras, desechos agrícolas; así mismo también se emplean desechos municipales y de la industria alimenticia, que en ocasiones pueden incluir desechos de origen animal, y se entiende por bioenergía a la energía que se obtiene a partir de la biomasa.

La disponibilidad de biomasa varía de región a región, de acuerdo con el clima, el tipo de suelo, la geografía, la densidad de la población, las actividades productivas, etc.; por eso, los correspondientes aspectos de infraestructura, manejo y recolección de material deben adaptarse a las condiciones específicas del proceso en el que se deseen explotar. En estos casos una tecnología que se puede utilizar para procesar los residuos de biomasa es la gasificación.

Durante el proceso de diseño de una planta de gasificación, lo primero que se realiza es el dimensionamiento del potencial de biomasa de la zona y en función de esa cantidad se establecen las capacidades de la planta de generación de energía eléctrica.

Este trabajo se plantea de manera inversa al proceso regular de diseño, es decir, se establece primero la capacidad de generación eléctrica, esto debido a que se desea maximizar el beneficio económico que ofrece el marco regulatorio vigente en México para acceder a los beneficios del uso de la red eléctrica como banco de baterías y/o para maximizar la venta de energía eléctrica a la red eléctrica, recordando que esto es válido para sistemas de menor capacidad a 500 kW eléctricos; y después se consideran las condiciones del lugar para estipular las dimensiones del cultivo energético necesario para operar una planta de gasificación con las capacidades deseadas.

El marco social del proyecto se aborda desde una perspectiva multidisciplinaria, cuyo elemento central es el desarrollo de la sociedad por medio de una propuesta y las posibles alternativas que podría brindar a los agricultores en comunidades marginadas.

En primera instancia se plantea la existencia de una relación en este tipo de proyectos energéticos - productivos – sociales, relacionando la energía eléctrica y el desarrollo de las comunidades; este cambio se da por una acción innovadora y complementaria en la forma de pensar y concebir los cultivos, el auto consumo y las condiciones de desarrollo de las comunidades en cuatro dimensiones: 1) primera, tienen que ver con asimilar que es posible pasar de un cultivo básico que opera en función de si se siembra en auto consumo y vender o intercambiar el resto por otros productos; 2) un cambio en la forma de cultivar y hacer producir a la tierra, esto es, introducir nuevas formas más de cultivar, en este caso los métodos derivados de la técnica de la Milpa Sustentable; 3) hacer que las actividades de las comunidades incrementen valor agregado a los productos del campo, es decir, no solo sembrar para auto consumo y/o venta de excedentes, sino transformar los productos en la misma comunidad, por

ejemplo, ya no únicamente solo vender el maíz o el frijol, sino procesarlos en harinas, u otros productos de consumo final; y por último 4) conocer y aceptar que la posible materialización de estos proyectos de carácter social - económico y sus beneficios no siempre deben pasar por los subsidios o donaciones o ayuda internacionales, sino que sí están bien concebidos, evaluados y planeados pueden ser implementados con esquemas de financiamiento que pueden ser aprobados, si se demuestra que son viables, rentables y sostenibles tan solo por los beneficios económicos, y a esos beneficios se le puede agregar el valor no monetizado de las virtudes sociales y ambientales que conllevan para las comunidades en regiones marginadas del país; sirviendo de ejemplo de esquemas ideológicos en otros lugares del país.

Este trabajo en segunda instancia plantea, la posibilidad de maximizar los beneficios energéticos, económicos, ambientales y sociales, para ello requiere en su planteamiento evaluar cómo deberían ser los procesos productivos. Así se plantea evaluar qué sistema de cultivo aumenta la producción y es más eficiente, después plantea aprovechar los residuos de biomasa para generar electricidad para auto consumo y para venta a la red eléctrica, asimismo aprovechar los residuos energéticos de calor del procesos eléctrico para hacer cogeneración y producir vapor y agua caliente, haciendo que el sistema en auto consumo eléctrico aproveche 100% de la energía térmica generada, y con esta última incorporando y dimensionando, la capacidad de una instalación productora de harinas de maíz nixtamalizada y harina de frijol para su industrialización. Con esto se pretende implementar los principios de la economía circular, en los procesos integrados e integrando los en la comunidad, administrándolos, operándolos y manteniéndolos.

El análisis para el cultivo sustentable se basa en un caso práctico ya experimentado, basado en la producción de maíz bajo la tecnología de “La Milpa Sustentable”, determinando con mayor claridad el potencial energético que tendría la comunidad y los impactos que pueda generar en lo social y ambiental.

En análisis para procesar energéticamente los residuos caracteriza la planta de gasificación de lecho fluidizado burbujeante, describiendo el proceso y sus condiciones termodinámicas, el dimensionamiento de equipos, los parámetros de desempeño, y la memoria de cálculo necesaria y requerida, propias de la etapa de diseño.

Por último, se analiza la dinámica económica y su rentabilidad, así como algunos impactos económicos, sociales y ambientales.

## II. Problemática

Las pruebas de causalidad de Grainger [1], muestra que existe un complejo vínculo entre la dinámica social, la economía agrícola y el sector energético, con el resto de los sectores económicos, esto se traduce en una causalidad bidireccional, ello sugiere que las implementaciones técnicas impactarán en dinámicas sociales, permitiendo un abanico de posibles acciones que podemos implementar desde el ámbito técnico, para reducir la pobreza e incrementar el desarrollo en la comunidad.

En México hay 70.9 millones de pobres, cantidad que representa al 56.7% de la población [2], las alternativas que hay para reducir el índice de marginación y pobreza radica principalmente en el ámbito político-social que se ha dado a lo largo de la historia del país, cuyas acciones mayormente han sido aportaciones económicas, delegando implementaciones técnicas a segundo plano.

Considerando la agenda nacional del año 2009 y los resultados de sus políticas se analizaron los resultados en los que dio poca importancia a las necesidades de las poblaciones más pobres, como facilitar el acceso a servicios energéticos adecuados para la satisfacción de necesidades primarias o actividades productivas, Esto con base en la información en la estructura del artículo “Contribución de los servicios energéticos a los Objetivos de Desarrollo del Milenio y a la mitigación de la pobreza en América Latina y el Caribe” [3], la cual denotó sus prioridades de planificación nacional, que se focalizaron en aspectos de crecimiento macroeconómico, como el incremento de la capacidad de generación y distribución de energía eléctrica a gran escala, el abastecimiento, la infraestructura para generación y distribución, la transición hacia un sistema propio más sostenible en el país.

El rol de la energía en la provisión de servicios básicos, como acceso al agua estuvo prácticamente ausente, solo se menciona el rol de la energía para el riego, pero nunca se hace la relación con el acceso a agua potable, a pesar de ser una de las metas de los objetivos de desarrollo mundial **ODM**.

El nexo entre la energía y la reducción del hambre o la seguridad alimentaria está apenas reconocido, los nexos entre la energía y los diferentes aspectos sociales como educación, salud, género etc., son la mayor debilidad de los documentos estudiados, prácticamente no son mencionados. Se dedujo que, de ser objeto central de la agenda política, sería de esperar que los documentos analizados en el estudio realizado por la Comisión Económica Para América Latina (**CEPAL**), presentarán precisos indicadores de la carencia de servicios energéticos, así como una clara descripción de la situación-problema.

Se definen a una persona en situación de pobreza cuando, tiene al menos una carencia social de los seis indicadores de rezago, ya sea educativo, acceso a servicios de salud, acceso a la seguridad social, calidad en espacios de vivienda, servicios básicos en la vivienda, acceso a la alimentación y/o su ingreso es insuficiente para adquirir los bienes y servicios que requiere para satisfacer sus necesidades alimentarias y no alimentarias. Se define por pobreza extrema a una persona cuando tiene tres o más carencias de las seis definidas, considerando que las personas en esta situación disponen de un ingreso tan bajo que, aún si lo dedicase por completo a la adquisición de alimentos, no podría adquirir los nutrientes necesarios para tener una vida sana [4].

Las mediciones hechas del año 2008-2018, resultado de las políticas públicas del año 2009, indican que, en México en el año 2018, por lo menos 21.1 millones de personas en zonas agrícolas, tenían rezago educativo, 20.2 millones no tienen acceso a los servicios de salud, 71.7 millones no tienen seguro social, 25.5 millones experimenta hambruna, 13.8 millones de persona no tienen una casa digna, 24.7 millones de personas no tienen acceso a servicios básicos y a la vivienda, ver Figura 1.1 [4].

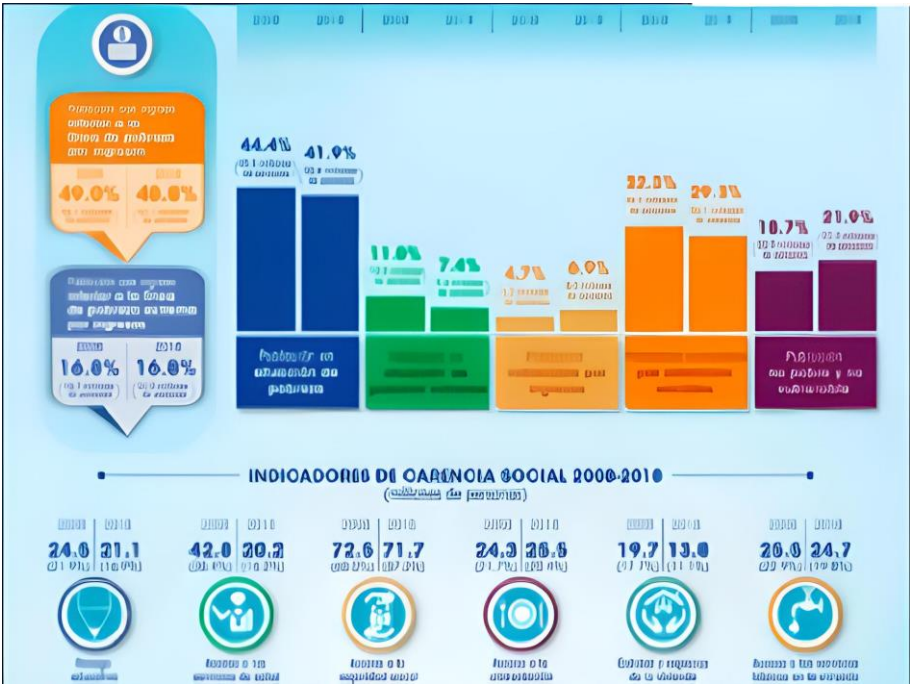


Figura 1.1: Medición de pobreza 2008- 2018

**III. Propuesta**

Dentro del marco energético, en México presenta un objetivo de aumentar al 35% la generación de energía eléctrica de fuentes limpias para el año 2034, permitiendo un nicho para el mercado de minoristas energéticos, que pretenda la generación de energía eléctrica.

Planteamos como una alternativa, concatenar la producción agrícola a la generación de energía eléctrica, en un esquema de cogeneración con la tecnología de gasificación de rastrojo de maíz, incrementando la eficiencia de la cadena productiva de alimento, el consumo de agua y el uso de la energía, con una propuesta piloto en la comunidad de Plan de Escobas Huautla de Jiménez, Oaxaca.

Planteando una opción más para el cumplimiento de la meta en generación de energías limpias, creando empleos, incrementando el bienestar social, reduciendo los índices de pobreza y dotando de características macroeconómicas la dinámica de la población rural.



La propuesta radica en relacionar el sector energético con la comunidad indígena, y el mercado minorista por medio de la generación distribuida, con una planta de gasificación de rastrojo de maíz, bajo el esquema de cogeneración. Para ello se pretende incrementar la producción de maíz y su rastrojo, con la implementación de la tecnología “La Milpa Sustentable” (descarga cero), el rastrojo producido será procesados en un gasificador de lecho fluido burbujeante, generando energía eléctrica y energía térmica, para finalmente producir harina de frijol y maíz nixtamalizado, con el calor resultante de cogeneración y la energía eléctrica generada.

#### **IV. Objetivo General**

Proponer y evaluar la operación de un sistema energético que integre el uso de recursos renovables, con base en biomasa producida en un cultivo de maíz bajo la tecnología “La Milpa Sustentable” y el cultivo tradicional, para proveer requerimientos eléctricos, térmicos y alimenticios en auto abastecimiento, en la comunidad de Plan de Escobas Oaxaca.

Considerando el uso de procesos sustentables de cultivo y aprovechamiento energético enfocado a la generación de energía eléctrica a través de la cogeneración y su uso en generar de productos de la comunidad con valor agregado, que permita el desarrollo de ésta, que sea rentable, sustentable, sostenible y en economía circular, para que contribuya y promueva la reconstrucción del tejido social, reduzca la migración, fomente la soberanía alimentaria e incremente el uso responsable de los recursos naturales.

#### **V. Objetivos Particulares**

- Identificar la relación que existe entre energía, desarrollo y sociedad, y el uso de tecnologías que permitan implementar acciones en favor de estos.
- Determinar el potencial energético de la comunidad y dimensionar la capacidad de esta para producir biomasa como combustible.
- Dimensionar la planta de interés según las condiciones de la localidad.
- Determinar la rentabilidad de la planta.
- Describir los posibles efectos sociales, económicos y ambientales asociados a la implementación de la planta.

## Capítulo 1. Energía

### 1.1 Introducción

Se ha dedicado mucho esfuerzo en estudiar los diferentes fenómenos energéticos, dando como resultado, múltiples procesos, equipos y tecnologías, que promueven su aprovechamiento, permitiendo, crecer, desarrollarse y modificar el entorno. Por desgracia las transformaciones que se realizaron sobre éste, no han sido completamente favorables, dando pie a interrogantes sobre la energía, su uso y generación, iniciando una discusión global en la que cada nación, pueblo y persona asume una postura según su visión.

México se ha manifestado a favor de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, buscando una transición energética, hacia fuentes de energía renovables, motivando implementar procesos de generación más amigables con el entorno.

### 1.2 Energía, desarrollo y medio ambiente

Determinar la relación que existe entre energía, desarrollo y medio ambiente es complejo, debido a la falta de un indicador oficial y directo, que permita dimensionar este fenómeno.

En la actualidad, el desarrollo de una nación se mide por el índice de desarrollo humano (**IDH**) y el producto interno bruto (**PIB**), estos reflejan la esperanza de vida en el momento del nacimiento, el nivel de educación y el valor agregado a la producción de una nación, en la Figura 1.2 se muestra el IDH mundial [5]

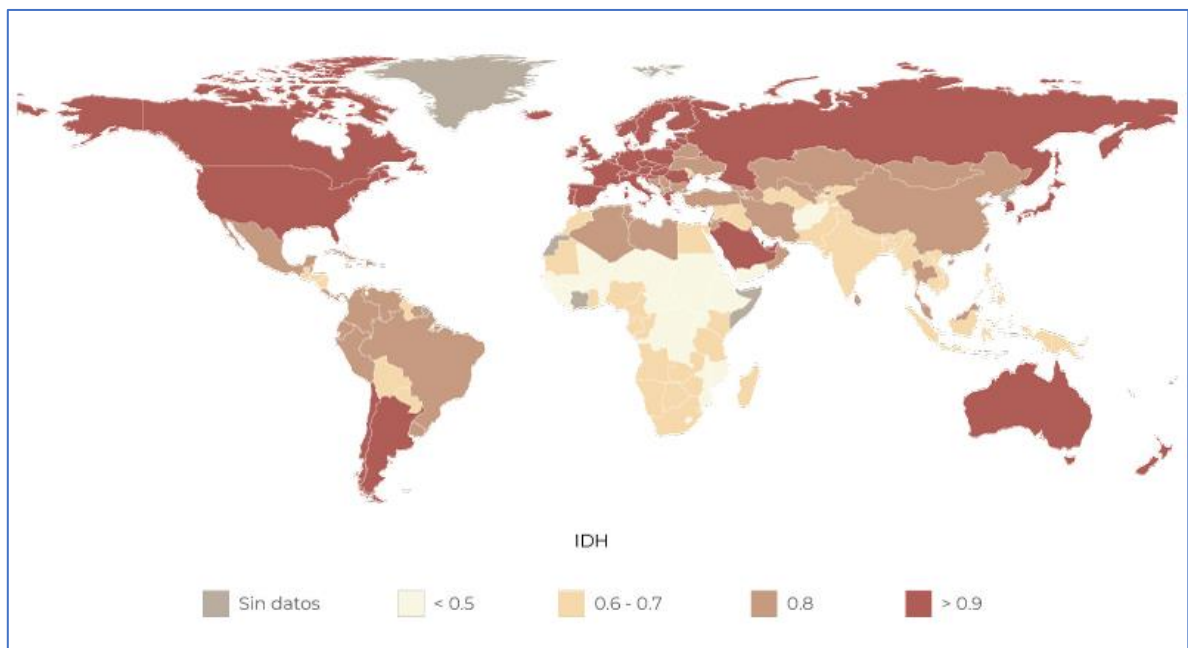


Figura 1.2 IDH Mundial en 2015 de 0.717

En el artículo “La energía como fuente de crecimiento y desarrollo en la perspectiva del fin de la era de los combustibles fósiles” [6], nos muestra un análisis estadístico en un marco internacional, que relaciona un IDH por encima del 0.7 a un consumo de energía superior a  $800 \left[ \frac{\text{kg de petróleo}}{\text{habitante}} \right]$ , véase la Figura 1.3 [7], lo que indica cuanta energía se necesita para mantener el estilo de vida actual.

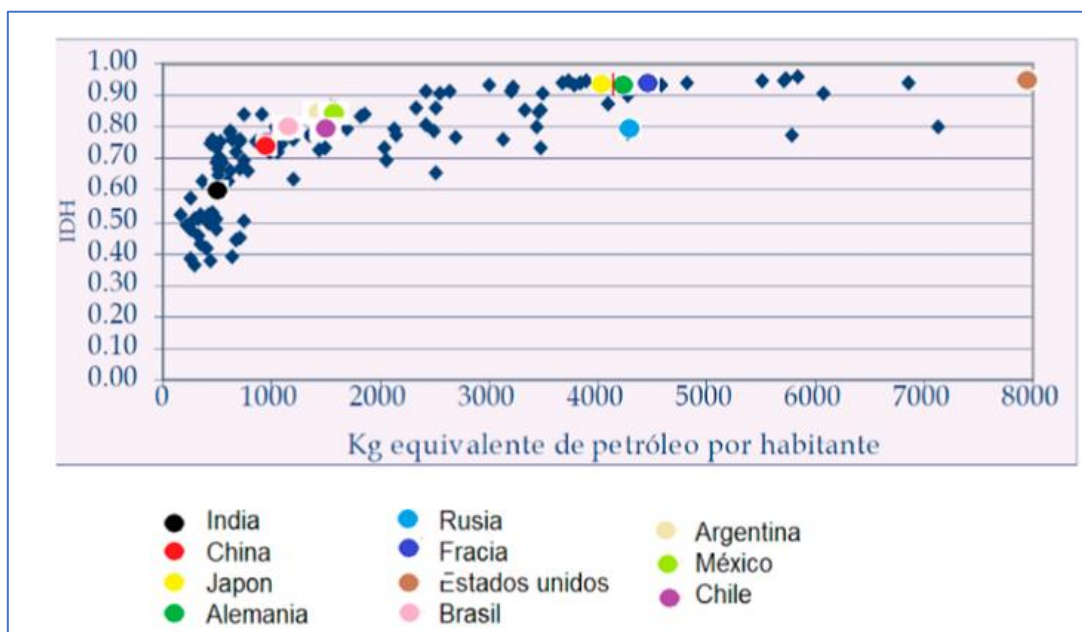


Figura1.3: Relación entre el consumo de energía y el índice desarrollo humano.

De acuerdo al comunicado de la CEPAL [7], indica que a nivel global el PIB real per cápita promedio, para todos los 196 países participantes, fue de aproximadamente 16.596 dólares en 2017, con el nivel más alto encontrado en América del Norte y el más bajo en África. Alrededor de tres cuartas partes de la población mundial vive en economías con un gasto per cápita inferior al promedio mundial, lo que significa que la riqueza no se distribuye homogéneamente, llegando a existir grandes variaciones, tal es el caso de Haití con un Consumo Individual Corriente (AIC) de 1.96 dólares, en comparación con los 37.781 dólares de las islas caimán.

José Goldemberg afirma, que no hay una relación mecánica de causa efecto entre el consumo de energía, el crecimiento económico y el desarrollo humano. El punto de divergencia yace en el instrumento con lo que se mide al desarrollo, es por ello que conviene subrayar que el consumo de energía debe ser analizado como consecuencia y al mismo tiempo factor del desarrollo y de crecimiento [6].

Por otro lado, la huella ecológica es un indicador que permite determinar cuánto espacio terrestre y marino se necesita para producir todos los recursos y bienes que se consumen, así como la superficie para absorber los desechos que se generan, usando la tecnología actual [8], indicador que tiene una gran importancia al incorporar el factor ambiental al análisis.

Al cruzar los tres parámetros de interés, la huella ecológica [9], véase la Figura 1.4, el PIB y el IDH figura 1.5 [10], en un mismo año (2012), nos damos cuenta que cada ser humano en promedio tiene un IDH de 0.55 (medio-bajo) y requiere 2.7 ha de espacio, lo que significa que es insostenible el estilo de vida que estamos llevando, debido a que nuestro planeta sólo es capaz de otorgar a cada uno de sus habitantes cerca de 1.8 ha [11], aunado a una acumulación de la riqueza disgregada, percibiéndose un estilo de vida general, insatisfactorio.

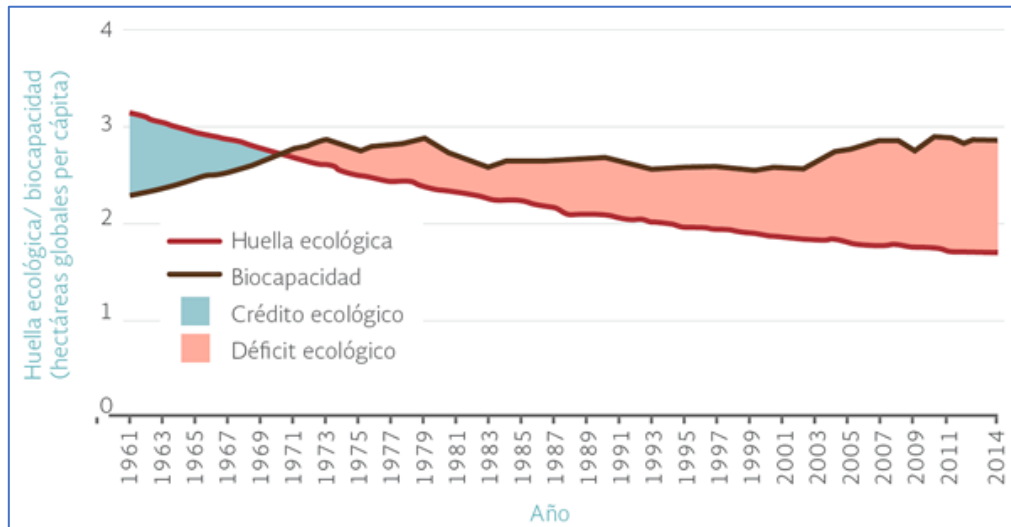


Figura 1.4: Huella ecológica y bio-capacidad global per-cápita 1961-2014

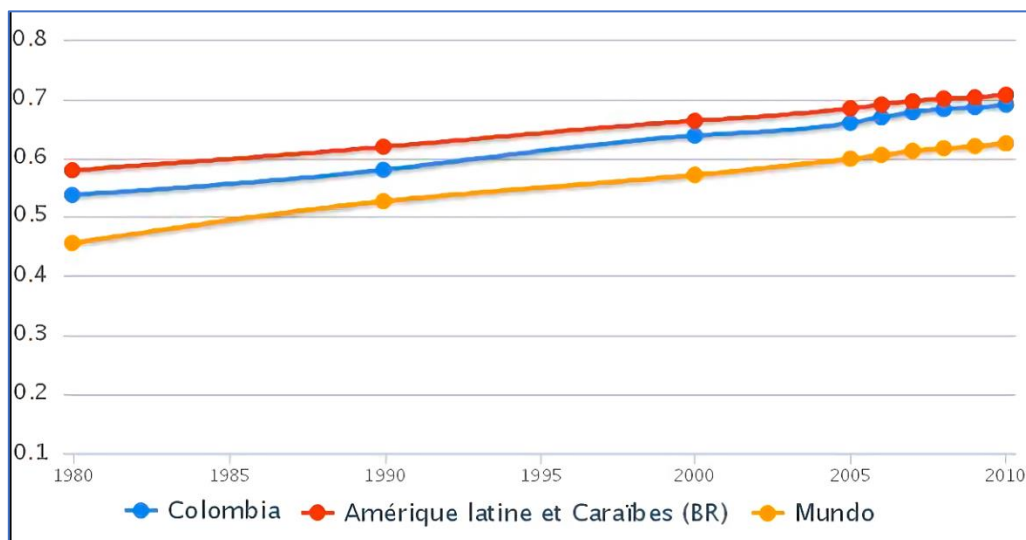


Figura 1.5: IDH promedio mundial 1980-2010

Franco Romero asegura que hay alternativas, con las que se puede obtener un mismo nivel de desarrollo humano con diferentes niveles de ingreso. Por ejemplo, una población con buen alojamiento, en buena salud, educada, que vive en un entorno culturalmente estimulante, representa un factor favorable para la productividad de la economía [3], incrementando el PIB. Como idea general estamos de acuerdo con Robert Solo, que propone que el desarrollo puede ser percibido como una “gracia del cielo” o inducido por diversos factores, por ejemplo, la política económica, condiciones sociales favorables o la reconstrucción después de una catástrofe

natural [3], de manera que, al resolver problemáticas implementando nuevas técnicas, generará diversas maneras de hacer lo mismo, creando un abanico de posibilidades, lo que permitirá escoger la más sencilla

El implementar y desarrollar nuevas tecnologías, promoverá el verdadero desarrollo de la sociedad, permitiendo tener un buen alojamiento, buena salud, educación, un entorno estimulante etc., y así contribuir con la reducción de la pobreza.

### 1.3 Energía renovable de la biomasa

La ley de transición energética en su artículo 3 fracción 16 define a las energías renovables como aquellas cuya fuente reside en fenómenos de la naturaleza, procesos o materiales susceptibles de ser transformados en energía aprovechable por el ser humano, que se regeneran naturalmente, por lo que se encuentran disponibles de forma continua o periódica y que al ser generadas no liberan emisiones contaminantes [12].

México tiene una capacidad de generación de energía eléctrica convencional instalada, véase figura 1.6, de 52,331 MW, de energía limpia de 21 110.05 MW, que representa el 28.74% y una generación de energía convencional de 254 496 GW, que representa el 83.08% y una generación de energía limpia de  $51\,845.32 \left[ \frac{GW}{anual} \right]$  correspondiente al 16.92% [13] del total, denotando que aún tenemos mucho por hacer en materia de transición energética, consultar tabla 1.1.

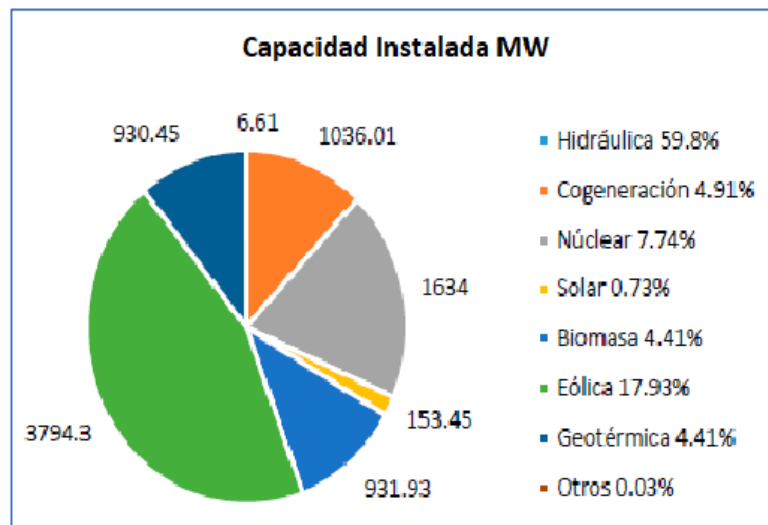


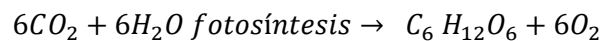
Figura1.6: Capacidad Instalada de Energía eléctrica limpia frente a la convencional

Tabla 1.1: Potencial de generación de energías renovables

Energía	Capacidad Instalable MW	Generación GWh/año	Emisiones de CO <sub>2</sub> Evitables Mt/añual
Solar Fijo	1171881	2121803	963299
Solar seguimiento	837537	2077997	943411
Eólica	583200	1486713	674967
Geotérmica	174	1373	623
Biomasa	1097	7694	3493

### 1.3.1 La biomasa como energía renovable

La biomasa es obtenida de la materia orgánica constitutiva de las plantas, la formación de esta se da a partir de la energía solar, la cual se lleva a cabo por las plantas que absorben la radiación del sol, minerales y agua, durante este proceso de fotosíntesis las plantas hidrolizan el agua para obtener electrones y protones que usan en la conversión del CO<sub>2</sub> en glucosa CH<sub>m</sub>O<sub>n</sub>, liberando oxígeno; Anualmente transforma cerca de 4000 EJ cíclicamente.



El uso de biomasa como combustible es rentable ambientalmente, este es un proceso neutral con respecto al carbono, ya que no contribuye al aumento de los gases de efecto invernadero, en la que las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera es igual a la que se fija en la biomasa durante su crecimiento.

La biomasa se caracteriza por tener un bajo contenido de carbono, un elevado contenido de oxígeno y compuestos volátiles [14]. El poder calorífico de la biomasa depende mucho del tipo de biomasa considerada, de su humedad y se puede dar en base seca o en base húmeda.

## 1.4 Tecnologías para la generación eléctrica

Las diversas tecnologías utilizadas para la generación de energía eléctrica comparten los principios. En términos generales, consiste en transformar alguna clase de energía primaria, ya sea química, mecánica, térmica o radiante, entre otras, a energía eléctrica, que se produce en alternadores, generadores, células fotovoltaicas o celdas electroquímicas, debido a un proceso químico, físico, electromagnético o fotoeléctrico.

Para simplificar la clasificación de las tecnologías utilizadas en la generación de energía, se considera según los equipos utilizados para generar energía eléctrica, en la Tabla 1.2 se pueden observar solo aquellas con tecnologías de mayor madures [15].

Tabla 1.2: Tecnologías para la generación de energía eléctrica

Tecnologías	Energía Primaria	Potencia MW	Rendimiento Eléctrico 1 %
Motor alternativo	gas natural, diésel, biogás, propano	0.08-20	28-42% (gas natural), 30-50% (diésel), 80-85% (cogeneración)
Turbina de gas	gas natural, biogás, propano	0.25-500	25-60%, 70-90% (cogeneración)
Mini hidráulica	Agua	0.01-10	80-90%
Eólica	Viento	0.005-5	43%
Solar térmica	Sol	0.0002-200	13-21%
Fotovoltaica	Sol	<0.001-0.1	14%
Biomasa	Biomasa		32%
Micro turbina	gas natural, hidrógeno, propano, biogás	0.025-0.4	25-30% hasta 85% (cogeneración)
Pila combustible	gas natural, metano, propano, hidrógeno	0.001 -0.0 11	35-65% Hasta 85% (cogeneración)

## 1.5 Tecnologías de interés para uso de la biomasa

En un sentido general, la conversión termoquímica de la biomasa se refiere a la reacción química mediante la cual se libera energía directamente, o se convierte la biomasa en un combustible gaseoso o líquido. Por tanto, comprenden básicamente la combustión directa, gasificación, pirólisis y licuefacción, encontrándose esta última aún en etapa de desarrollo, véase figura 1.7 [13].

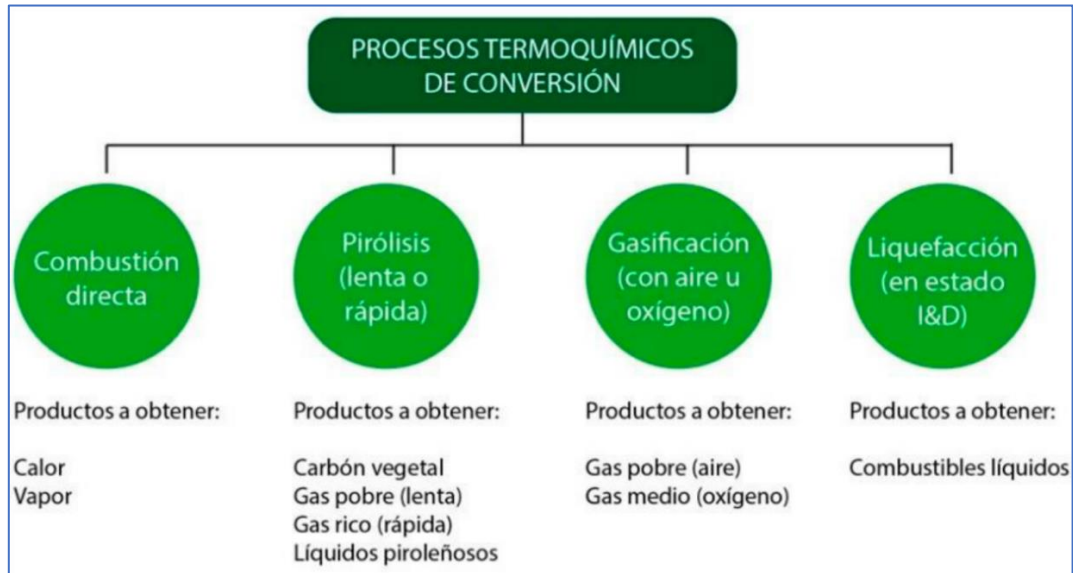


Figura1.7: Procesos termoquímicos de conversión

## 1.6 Proceso de cogeneración y gasificación.

Una de las formas de aprovechar con mayor eficiencia el combustible es la cogeneración de energía, al permitir partir de una misma cantidad de energía primaria obtener dos resultados industrialmente aprovechables. Este proceso no es desconocido pues desde hace siglos se viene utilizando, sobre todo en el sector azucarero, aunque otras ramas de la industria también cogeneran.

La cogeneración se define como la producción secuencial de energía eléctrica y/o mecánica y de energía térmica aprovechable en los procesos industriales a partir de una misma fuente de energía primaria [16], es hoy una de las mejores alternativas como método de conservación de energía para la industria, acorde con las políticas de globalización, políticas económicas, regionales e internacionales, orientadas a lograr un desarrollo sostenible.

La gasificación es un proceso llevado a cabo en un gasificador en el que se produce la transformación de una materia prima en estado sólido o líquido en un gas con un poder calorífico moderado, gracias a la aplicación de calor, de un agente gasificante y bajo unos niveles de oxígeno restringidos.



Actualmente existen diversas tecnologías disponibles a escala comercial. Dichas tecnologías se pueden clasificar En primer lugar, en función del agente gasificante, los cuales pueden ser, Gasificador con aire: se introduce aire caliente en el gasificador, generando un gas pobre con un poder calorífico no mayor del 25 % del poder calorífico del gas natural, Gasificador con oxígeno: el gas de síntesis formado tiene más calidad que el formado en el caso anterior, al no producirse dilución debido a la presencia de nitrógeno en el aire, y su poder calorífico se encontrará aproximadamente entre el 25% y el 40% del poder calorífico del gas natural, Gasificador con vapor de agua: el gas formado se encuentra enriquecido en hidrógeno y en monóxido de carbono, y se destina fundamentalmente para la síntesis de compuestos, como el amoníaco, el metanol, etc., Gasificador con hidrógeno, el gas generado tiene un poder calorífico importante y se puede destinar a las mismas aplicaciones que el gas natural [17].

En segundo lugar, en función de la fuente de la que provenga el calor necesario para llevar a cabo la combustión, gasificador directo: el calor proviene de la combustión parcial de la propia biomasa que se va a gasificar y gasificador indirecto, el calor requerido proviene de otra fuente energética, por medio de un intercambiador e incluso de un proceso indirecto, como podría ser la separación de las zonas de gasificación y de combustión [17].

En tercer lugar, Atendiendo a la presión a la que trabajan los gasificadores, estos pueden ser, gasificadores atmosféricos que trabajan a la presión atmosféricas o gasificadores presurizados que realizan la gasificación a una determinada presión [17].

Y por último en función del modo de contacto de las partículas de materia prima con el medio gasificante estos pueden ser [16].

Gasificadores de lecho fijo:	Gasificadores de lecho fluido:	Gasificadores de flujo por arrastre con:
- Up draft	Burbujeante	alimentación superior
- Down draft	Circulante	alimentación lateral
- Cross draft		

## 1.6.1 Gasificadores de lecho fijo

La característica principal de un gasificador de lecho fijo, es que el combustible es sostenido sobre una parrilla. Uno de los mayores beneficios de este tipo de gasificadores es su bajo costo y la posibilidad de construirlos en tamaños pequeños.

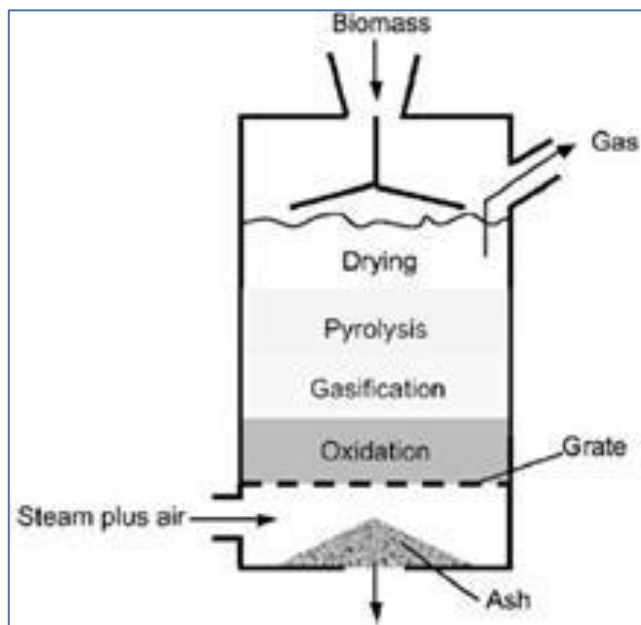
En los gasificadores de lecho fijo, la mezcla y la transferencia de calor, a lo largo del equipo son pobres, lo que lleva a una distribución no uniforme de la temperatura y la composición del gas en la sección transversal del gasificadores. Por este motivo, la materia prima empleada en este tipo de gasificadores tiene como requisito la no tendencia a la aglomeración [16].

### 1.6.1.1 Gasificadores de lecho fijo “up draft”

Los gasificadores de tipo up draft o contra corriente tienen uno de los diseños más sencillos de todos los Gasificadores. El medio gasificante entra al equipo por la parte inferior, recorre la parrilla en donde se encuentra a las cenizas, y sigue viajando hacia la zona superior, donde sale del gasificador.

Por otra parte, la materia prima se introduce en la zona superior y se mueve hacia la inferior experimentando secado, pirolisis, gasificación y oxidación. El resto de combustible, ya convertido en cenizas, atraviesa la parrilla y se deposita en el fondo del gasificador, donde puede ser eliminado posteriormente.

Este tipo de Gasificadores son apropiados para materia prima con altos contenidos en cenizas, elevado porcentaje de humedad y baja volatilidad ver figura 1.8 [18].



• Figura 1.8. Gasificador tipo “up draft”.

### 1.6.1.2 Gasificadores de lecho fijo “Down draft”

En este tipo de equipos, el medio gasificante y el combustible viajan en sentido concurrente. En las figuras 1.9 y 1.10, se muestran dos configuraciones diferentes de Gasificadores down draft.

La materia prima se introduce por la parte superior y se mueve hacia la parte inferior, hasta que las cenizas que quedan atraviesan la parrilla. El gas se introduce a través de una serie de inyectores, que se encuentran situados por encima de la zona de combustión y alrededor del perímetro del equipo.

El gas pasa por la zona en donde se encuentran las cenizas, que está a alta temperatura y en donde el alquitrán que todavía contiene encuentra condiciones favorables para su craqueo, lo que implica que este tipo de Gasificadores tengan una producción de alquitrán muy baja.

Debido a la baja producción de alquitrán, los Gasificadores de tipo “down draft” son apropiados para motores de combustión interna ya que éstos requieren un gas más limpio, ver figura 1.9 y 1.10, [18].

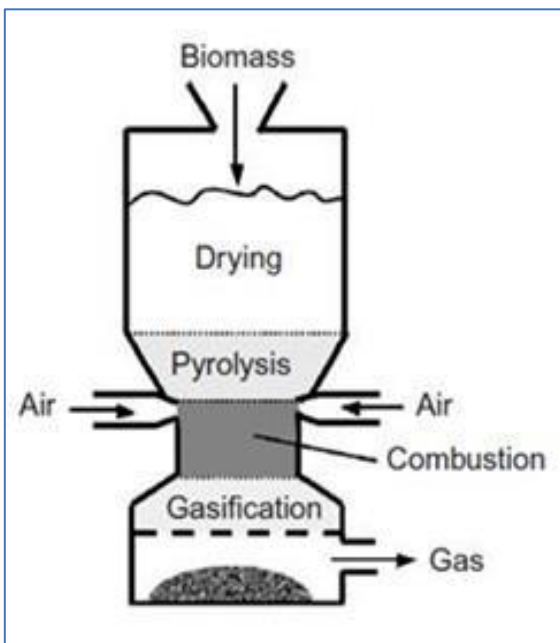


Figura 1.9. Gasificadores tipo “down draft”, “Throated”

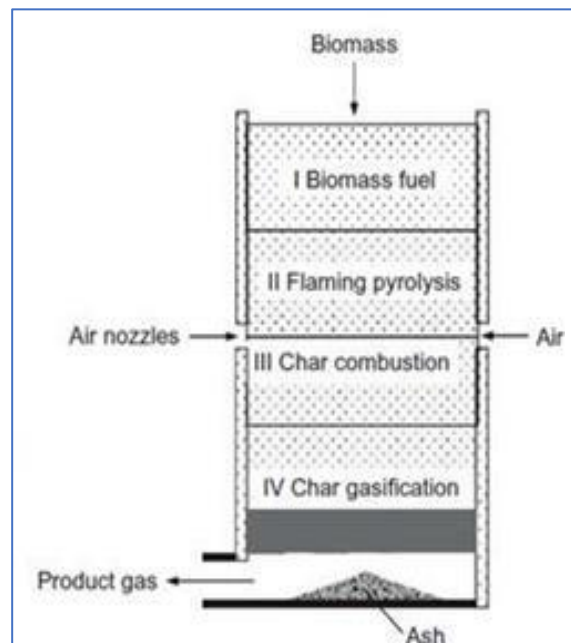


Figura 1.10. Gasificadores tipo “down draft”, “throatless”

### 1.6.1.3 Gasificador de lecho fijo tipo “Cross draft”

En este tipo de Gasificadores el combustible se introduce por la parte superior, y viaja hacia la parte inferior. El medio gasificante se inyecta a alta velocidad desde el lateral del reactor, saliendo el gas de síntesis, por el lateral opuesto.

Este tipo de Gasificadores son apropiados para unidades de pequeña escala. Pueden soportar combustibles con alto contenido de humedad, pero no alto contenido en cenizas o alquitranes.

De entre las ventajas de esta configuración destacan, una zona de reacción pequeña, lo que permite un menor tiempo de respuesta, el tiempo de puesta en marcha es inferior con respecto a otros Gasificadores de lecho fijo, requiere un sistema de limpieza sencillo, pueden presentar un diseño compacto, véase figura 1.11 [18].

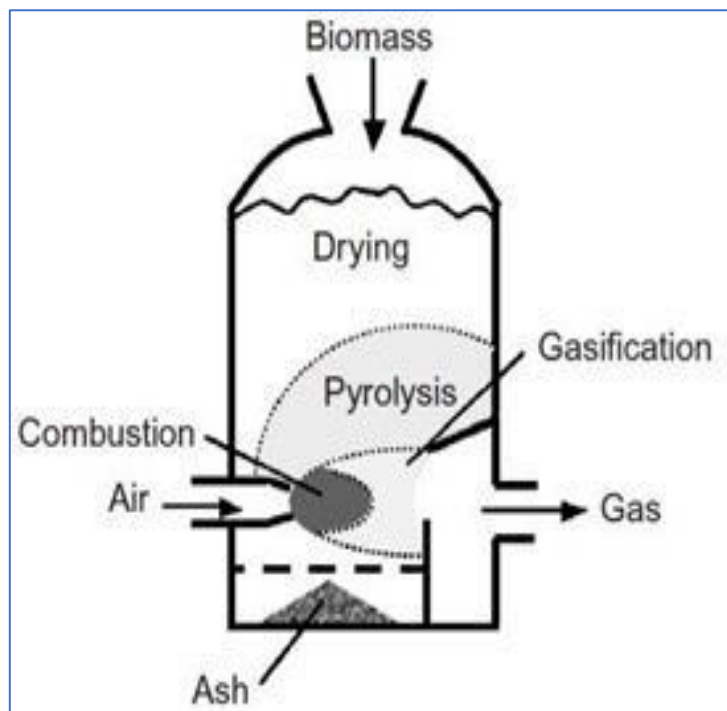


Figura 1.11: Gasificador tipo “Cross draft”.

## 1.6.2 Gasificadores de lecho fluido

La principal característica de estos equipos es que el combustible se encuentra en estado fluidizado. Esto se lleva a cabo mediante el paso del medio gasificante a través del combustible a una velocidad determinada, diseñada para mantener las partículas en estado de suspensión.

Estos equipos presentan una buena capacidad de mezcla, lo que conduce a una temperatura homogénea. Los Gasificadores de lecho fluido pueden ser subclasificados en lecho fluido burbujeante y circulante [18].

### 1.6.2.1 Gasificadores de lecho fluido burbujeante

En un gasificador de lecho fluido burbujeante, figura 1.12 [18], el combustible que se introduce en el reactor es fluidizado por el medio gasificante con bajas velocidades del aire de fluidización. Se caracterizan porque la mayor parte de los sólidos permanecen en el lecho.

El agente gasificante se puede inyectar en dos etapas, la primera para generar las condiciones apropiadas para mantener el lecho en estado burbujeante y la segunda para facilitar la gasificación en sí misma. El gas sale por la parte superior del gasificador, pasando por un separador de polvo que limpia el gas y devuelve las partículas de combustible no gasificadas al reactor [18].

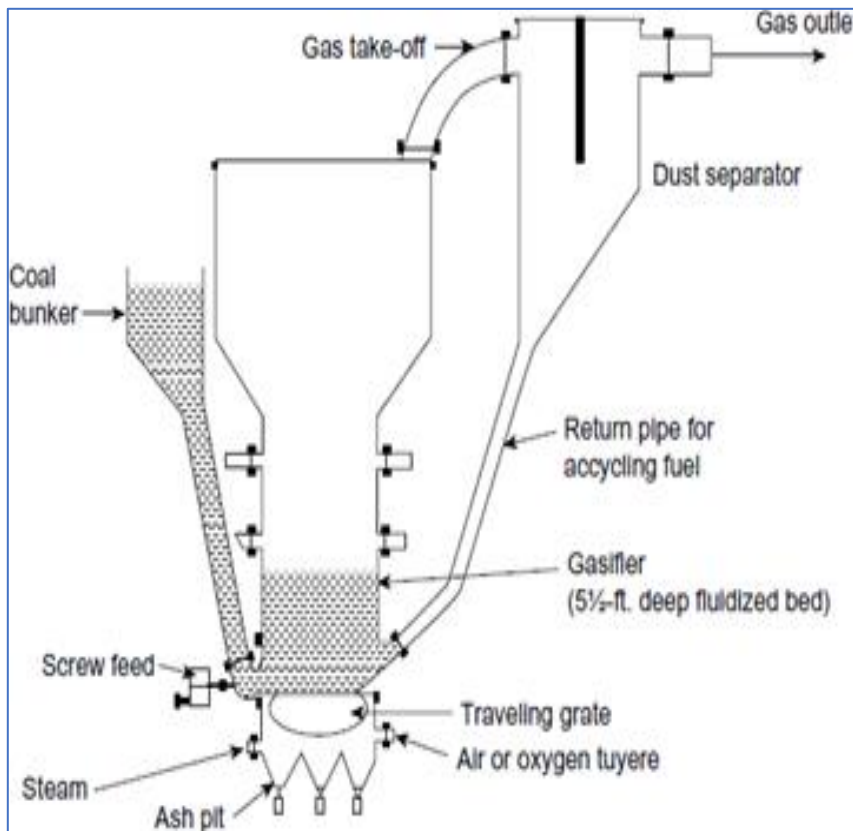


Figura 1.12: Gasificador de lecho fluido burbujeante.

### 1.6.2.2 Gasificadores de lecho fluido circulante

Este tipo de Gasificadores se componen de un reactor gasificador, un ciclón y un elemento de recirculación de combustible. El combustible se alimenta al reactor donde se fluidifica mediante un determinado agente, el conjunto viaja hasta el ciclón, que separa los gases de las partículas de combustible restantes. El combustible recogido en el ciclón se recircula al reactor y la ceniza formada se retira del fondo del reactor véase figura 1.13 [18].

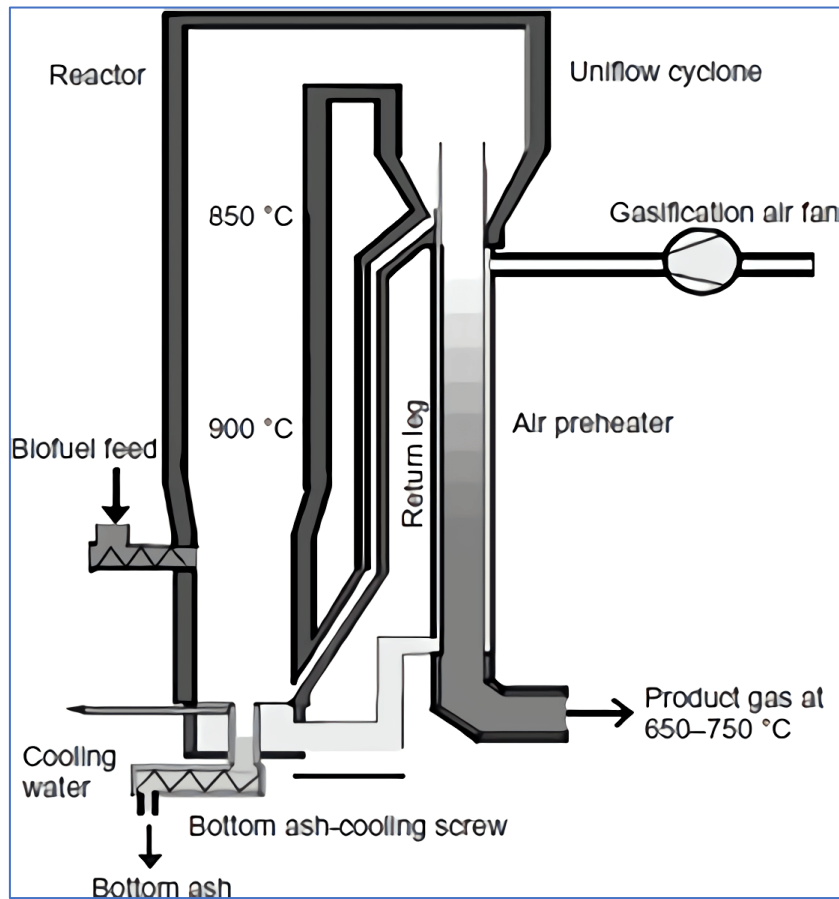


Figura 1.13: Gasificador de lecho fluido circulante.

### 1.6.3 Gasificadores por corriente de arrastre

Los Gasificadores de flujo por arrastre son comunes en la gasificación del carbón, coque de petróleo y residuos generados en las refinerías. En los Gasificadores de flujo por arrastre, el agente gasificante y el combustible viajan en sentido concurrente, figura 1.14[18].

Un inyector introduce tanto el combustible como el medio gasificante a alta velocidad, produciendo así una zona de recirculación cerca del punto de inyección.

La reacción de combustión se produce cerca del punto de entrada y consume la mayor parte del oxígeno de tal manera que los productos de esta combustión se someten a reacciones de gasificación.

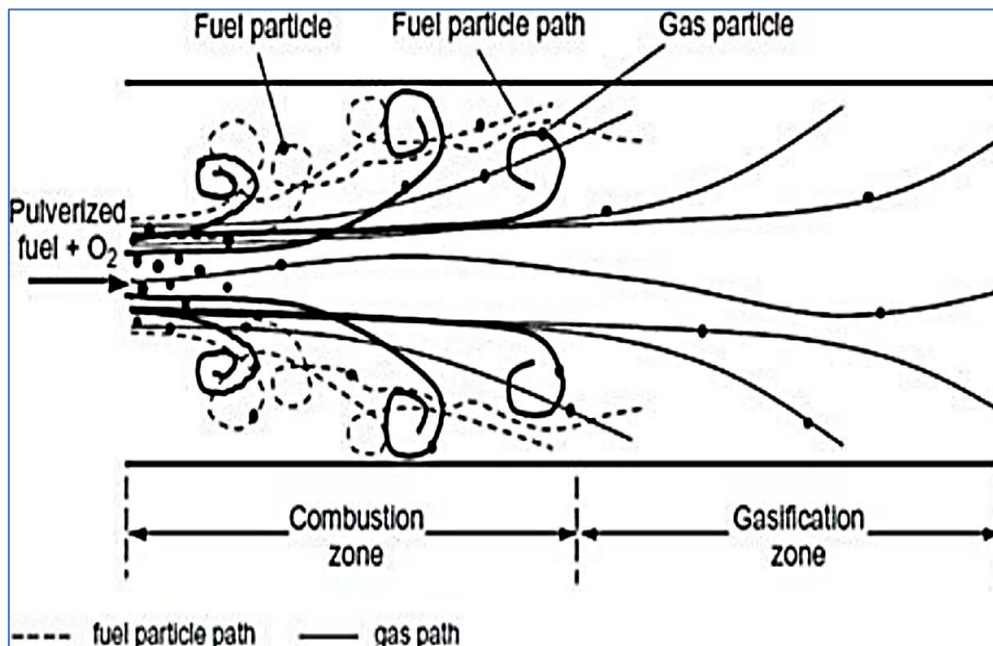


Figura 1.14: Contacto sólido-gas en un gasificador de corriente de arrastre.

El tiempo de residencia en este tipo de Gasificadores es muy bajo, por lo que el combustible necesita ser introducido en forma de partículas muy finas, lo que incrementa el consumo de energía en la molienda. No son recomendados para combustibles con gran contenido en humedad o cenizas. No obstante, presentan una serie de ventajas frente a otros equipos como su baja producción de alquitranes, que la ceniza se produce en forma de escoria y que presenta un alto grado de conversión del carbono presente [18].

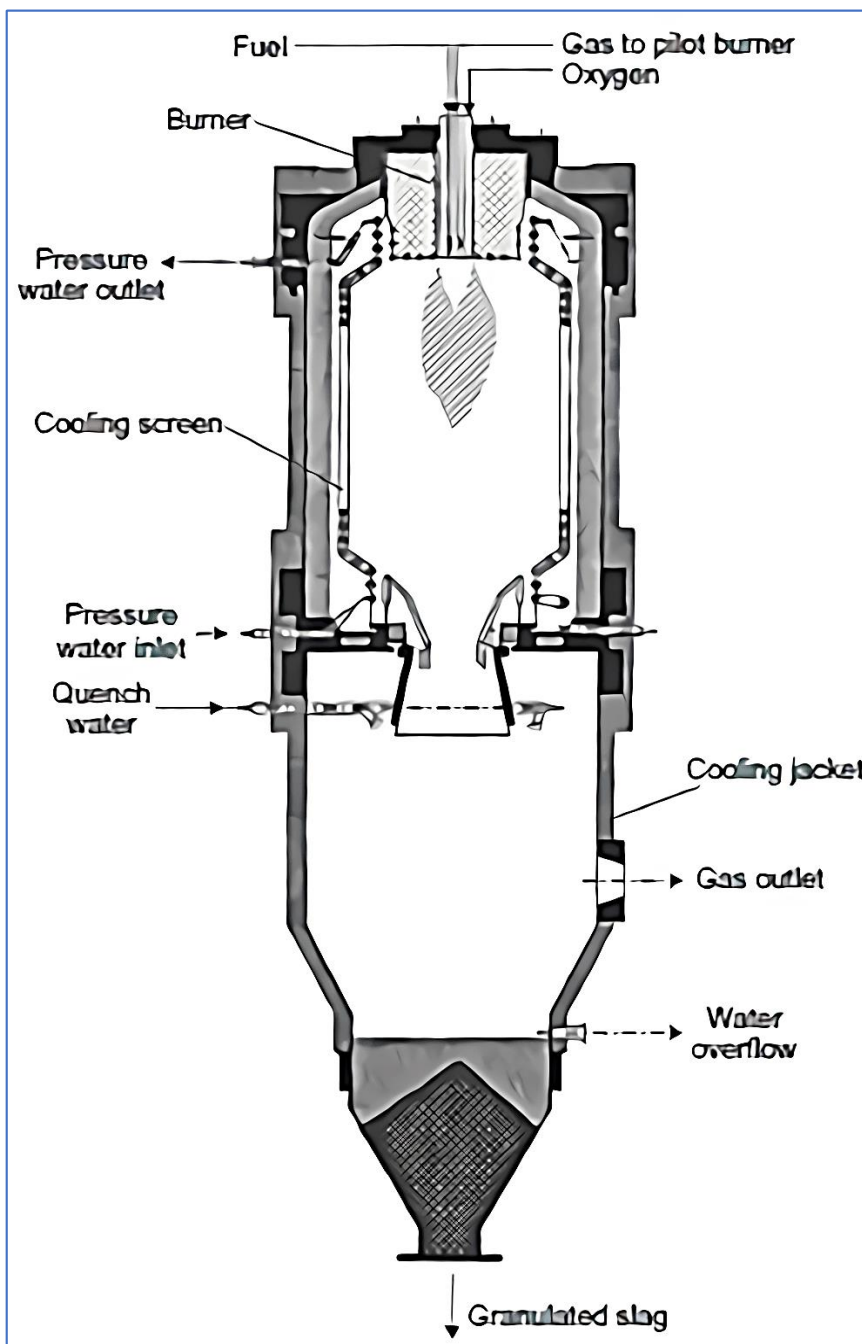


Figura 1.15: Gasificador de corriente de arrastre con alimentación superior .



## 1.6.4 Tecnologías emergentes

En esta sección se presentan algunas de las tecnologías propuestas para la mejora del proceso de gasificación. Algunos de los objetivos de estas nuevas tecnologías son:

- Maximizar el rendimiento del gas de síntesis.
- Optimizar la calidad del syngas.
- Incrementar la pureza del syngas.
- Incrementar la eficiencia global del proceso.
- Incrementar la viabilidad económica.

### 1.6.4.1 Gasificador compacto “Unique”

El gasificador compacto “UNIQUE”, figura 1.16, unifica la gasificación, la limpieza y el acondicionamiento del gas en un único equipo. Este concepto pretende reducir la inversión en energía en la limpieza y el acondicionamiento del syngas. Esto permite que las plantas de gasificación sean más compactas, simples, eficientes y económicas.

La disposición de este equipo incluye una serie de elementos filtrantes catalíticos integrados en el “freeboard” de un gasificador de lecho fluido. El objetivo de esto es eliminar las partículas y los elementos traza, así como convertir el alquitrán restante.

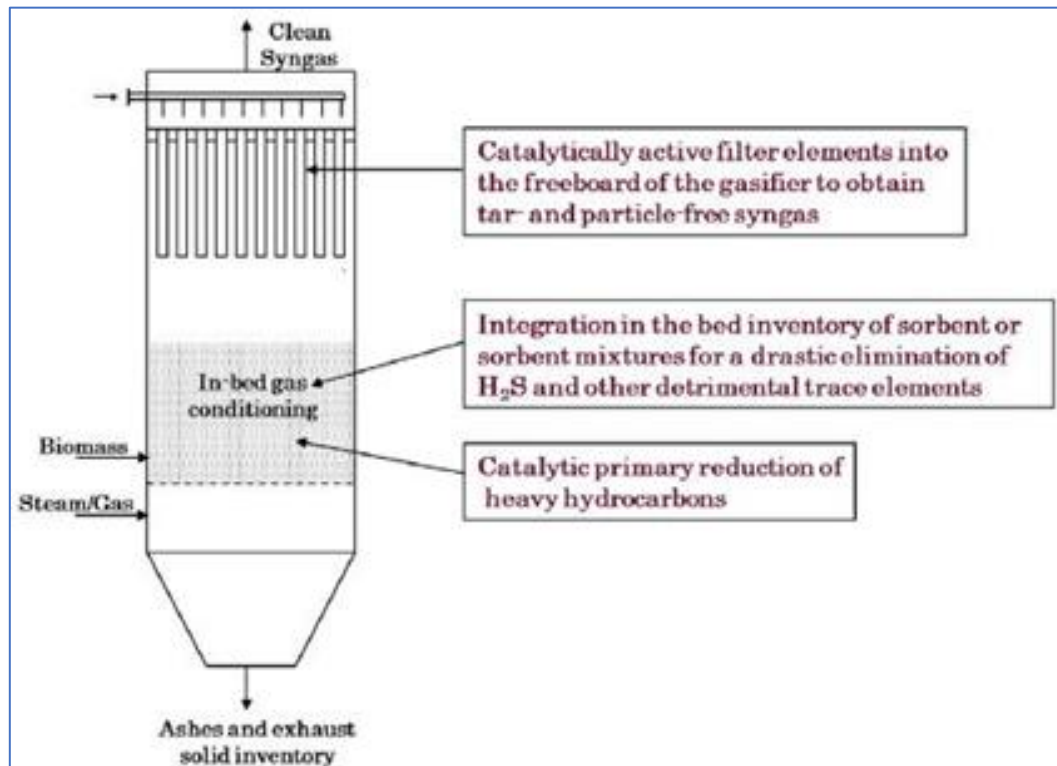


Figura 1.16. Gasificador compacto “UNIQUE”.

### 1.6.4.2 Combinación de la pirólisis y gasificación

En esta tecnología los procesos de pirólisis y gasificación son separados con el objetivo de controlar y optimizar cada proceso de forma más específica. De esta forma, se consigue una alta pureza de gas con bajos niveles de alquitrán manteniendo una alta eficiencia del proceso.

El principal problema de esta tecnología, es que la complejidad de la gasificación aumenta al combinar dos reactores diferentes. No obstante, esto se equilibra con un sistema de limpieza de gas más sencillo.

En las siguientes líneas, se indican dos formas de combinar el proceso de pirólisis y la gasificación en una unidad. El proceso que se muestra en la Figura 1.17 corresponde a un modelo de gasificador denominado "Viking" que ha sido desarrollado por la Danish Technical University

En este equipo, la pirólisis y gasificación se realizan de forma secuencial. La pirólisis tiene lugar en un reactor tipo tornillo sin fin, siendo los productos de pirólisis dirigidos a un gasificador de lecho fijo tipo "down draft". El aire se inyecta entre las zonas de pirólisis y gasificación, con el objetivo de permitir la combustión parcial [18].

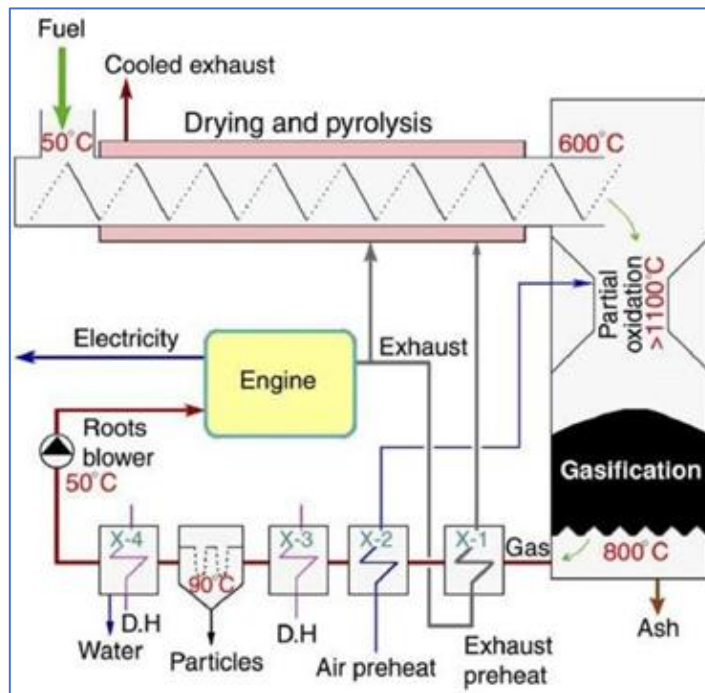


Figura 1.17: Esquema de un gasificador tipo "Viking".

Realización de la pirólisis y la gasificación en lugares diferentes, este concepto fue desarrollado por el Instituto Tecnológico de Karlsruhe. En este proceso, la pirólisis es llevada a cabo en pequeñas plantas en las cuales la materia prima se encuentra cercana. El producto del proceso es un lodo muy concentrado que tienen 10 veces más densidad energética que la materia prima.

### 1.6.4.3 Combinación de la gasificación y la combustión

En este concepto los procesos de gasificación y combustión se separan con el objetivo de incrementar la eficiencia total del proceso y de minimizar la concentración en alquitranes. Esto permite obtener un syngas de alta calidad, ya que no está diluido por el nitrógeno como en los Gasificadores convencionales., véase figura 1.18 [18].

Este sistema se puede llevar a cabo en un doble reactor de lecho, en el cual la gasificación y la combustión se ejecutan en dos reactores diferentes. La combustión se realiza en un reactor de lecho fluido circulante rápido, mientras que la gasificación se realiza en un reactor de lecho fluido burbujeante. El gasificador intercambia con el combustor las partículas de combustible que no han podido ser gasificadas. En la parte superior del combustor, un ciclón separa los gases de combustión de las partículas, devolviéndole éstas al gasificador.

El gas que sale del combustor contiene el nitrógeno presente en el aire ambiente, sin embargo, en el gasificador se emplea vapor como agente gasificante, lo que da como resultado un gas de síntesis con un contenido en nitrógeno mínimo.

Al comparar este sistema con las plantas de gasificación tradicionales, tiene la ventaja de que la calidad del gas obtenido es mayor, aunque la complejidad de operación de estas plantas también incrementa [17].

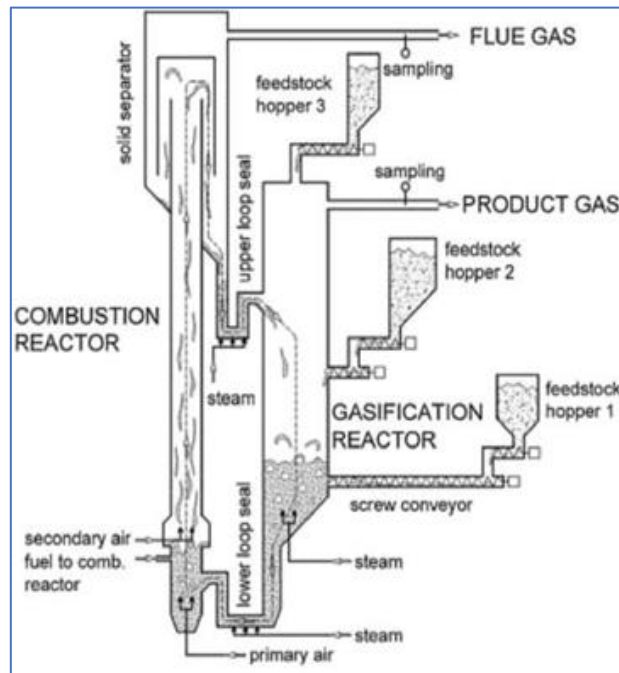


Figura 1.18: Sistema gasificador con una cámara de combustión y otra de gasificación.

#### 1.6.4.4 Gasificación por plasma

La gasificación mediante plasma, véase Figura 1.19, [18] ha despertado mucho interés principalmente debido a las altas temperaturas que estos reactores pueden alcanzar. Estas temperaturas permiten la descomposición de cualquier material carbonáceo en sus constituyentes elementales. Además, posibilita que los alquitranes producidos se craqueen y que las dioxinas y furanos sean destruidas.

En esta tecnología, las partes inorgánicas que no pueden ser gasificadas se recuperan en el fondo del reactor, en forma de escoria vitrificada. Por estos motivos, la gasificación plasma es especialmente apropiada para residuos sólidos urbanos y residuos de polímeros [18].

El calor necesario para la gasificación se produce mediante una antorcha de plasma, en la cual se crea un arco eléctrico de alto voltaje entre dos electrodos.

Como ventajas de la gasificación por plasma se pueden destacar la producción de un gas de síntesis de alta calidad; con alto contenido en CO e hidrógeno, bajo contenido en CO<sub>2</sub>, baja concentración de alquitranes, alto poder calorífico y, además, el reactor no se ve afectado por el tamaño de las partículas o la estructura de la materia prima.

Las desventajas son su alto consumo de energía eléctrica, que lleva a una baja eficiencia del proceso y unos costes de inversión altos [14.2].

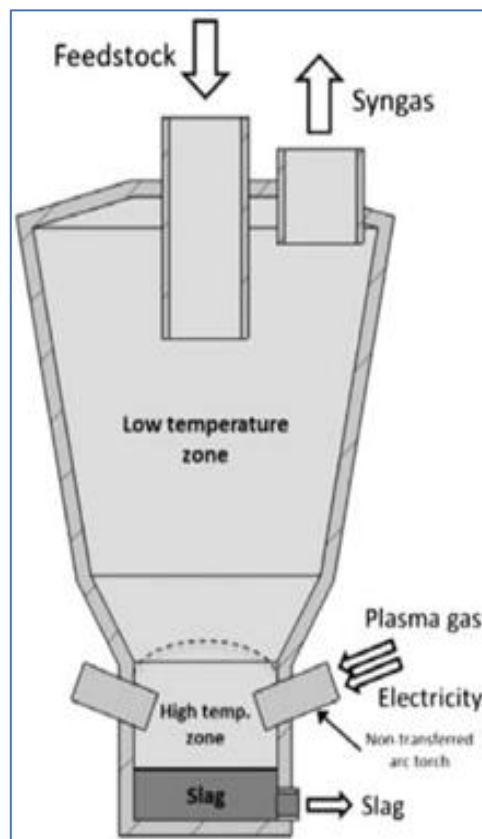


Figura 1.19: Esquema de un gasificador de plasma.

#### **1.6.4.5 Gasificación en agua super crítica**

Este concepto se basa en las propiedades del agua supercrítica como disolvente y reactante. La solubilidad de los materiales orgánicos aumenta y la de los materiales inorgánicos disminuye bajo estas condiciones. Además, la formación de alquitranes es inhibida con esta tecnología.

Las principales ventajas de la gasificación en agua supercrítica son: la materia prima se puede tratar sin necesidad de realizar un secado previo, producción de un gas rico en hidrógeno, alta eficiencia de gasificación y baja formación de alquitranes. La principal desventaja es el costo de los materiales, que tienen que ser capaces de resistir estas condiciones, soportando la corrosión, la alta presión y la alta temperatura. Otra desventaja es la gran cantidad de energía que se necesita para calentar el agua hasta condiciones supercríticas, aunque este problema encuentra una solución parcial en el uso de catalizadores apropiados [18].

### **1.7 Marco legal**

Existen dos directrices legales que marcan las pautas necesarias para formalizar la planta de gasificación, la primera está relacionada con la interconexión del sistema de generación y en segundo lugar con la regulación de la biomasa que se utilizará como combustible.

#### **1.7.1 Generación distribuida**

La Comisión Reguladora de Energía, pone a disposición toda la información relacionada a la instrumentación y el marco regulatorio de Generación Distribuida (**GD**); mismos que incluyen: los modelos de contrato, la metodología de cálculo de contraprestación, las especificaciones técnicas y generales aplicables a las centrales eléctricas de generación distribuida y generación limpia distribuidas, etc.

La Secretaría de Energía emite el Manual de Interconexión de Centrales de Generación con Capacidad menor a 0.5 MW[19], el cual desarrolla con mayor detalle, los requerimientos y especificaciones técnicas y cualquier otra disposición que resulte aplicable para la interconexión de Centrales Eléctricas con capacidad menor a 0.5 MW. Este continuará vigente en tanto la CRE no emita nuevas disposiciones y apruebe las especificaciones técnicas elaboradas y propuestas por el CENACE.

Cabe destacar 4 elementos centrales de este manual que permiten exponer el proceso de interconexión. En primer lugar, el modelo de contrato que hace referencia al tipo de actividad que tendrán los generadores, Net Billing, Net Metering y abasto aislado.

*“ 2.3.2 [10]. Medición neta, Net Metering ó Venta de excedentes de la energía eléctrica: Se refiere a la generación de energía eléctrica que excede la satisfacción de las necesidades de los Centros de Carga, y que es inyectada a las Redes Generales de Distribución para ser vendida” [19] .*

*“ 2.3.3 [10]. Venta total o Net Billing de energía eléctrica: Se refiere a la generación de energía eléctrica que es entregada en su totalidad a las Redes Generales de Distribución para su venta” [19].*

*“2.3.4 [10]. Abasto aislado o PML Venta de energía eléctrica de los Generadores Exentos: Sólo podrán vender energía eléctrica y Productos Asociados a través de un Suministrador o dedicar su producción al Abasto Aislado” [19].*

Se entiende por Abasto Aislado la generación o importación de energía eléctrica para la satisfacción de necesidades propias o para la exportación, sin transmitir dicha energía por la Red Nacional de Transmisión o por las Redes Generales de Distribución.

Podrán vender energía eléctrica a un Usuario final, siempre y cuando la energía eléctrica se genere a partir de Generación Distribuida dentro de las instalaciones del Usuario Final o podrán suministrar necesidades de uno o varios Centros de Carga bajo esquemas de medición neta que emita la CRE.

Podrán vender energía eléctrica a través de un Suministrador de Servicios Básicos, para lo cual, la CRE emitirá los modelos de contrato y metodologías de cálculo, criterios y bases para determinar y actualizar las contraprestaciones aplicables.

Podrán vender energía eléctrica y Productos Asociados a través de un Suministrador de Servicios Calificados, siempre y cuando las Centrales Eléctricas no compartan equipo de medición con el Centro de Carga de un Usuario de Suministro Básico.

En segundo lugar, es necesario clasificar el tipo de central generadora que se planea, para seleccionar la tarifa y la topología adecuada según sus características técnicas, en nuestro caso se clasifica como MT2 [19], que es una interconexión en Media Tensión, con una capacidad de Generación Neta mayor que 250 kW y menor que 500 kW.

Como tercer énfasis tenemos el procedimiento administrativo para la interconexión de Centrales Eléctricas con capacidad menor a 0.5 MW

Por último, se tiene esquemas para la interconexión de centrales eléctricas con capacidad menor a 0.5 MW, que dependerá según la actividad de los generadores, en la tabla 1.3 podemos observar los diferentes tipos de conexiones que se requieren según para las actividades de la generación.

Tabla 1.3 Esquemas de interconexión para Centrales Eléctricas con capacidad menor a 0.5 MW

Clasificación de central Eléctrica	Utilización de la Energía Eléctrica Producida	Esquema de interconexión Circuito
Mt2	Consumo de Centros de Carga	3
Mt2	Ventas de Excedentes	6
Mt2	Venta Total	9

### 1.7.2 Ley Federal de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos

Un tema fundamental en el debate es el uso de alimentos para la producción de combustibles, ante el grave riesgo sobre la seguridad alimentaria que esto supone, la ley debería proteger a todos los productos que la ley de Desarrollo Rural Sustentable considera como básicos y estratégicos para la seguridad y la soberanía alimentaria.

La Ley de Bioenergéticas sólo restringe el uso del maíz para este fin en tanto no haya excedentes en la producción nacional.

Observaciones hechas a la Ley de Desarrollo Rural Sustentable.

1. El anteproyecto de reglamento borra el candado, al permitir la producción de combustible con maíz importado, encareciendo los alimentos en otros lugares de producción de origen.
2. No existe en el reglamento ninguna restricción que impida sustituir superficies destinadas a maíz por otros productos alimenticios para la producción de agro combustibles.
3. Los impactos energéticos y ambientales de la producción de etanol a partir de granos básicos son negativos porque: a) aumenta la dependencia de combustibles fósiles para producir etanol y b) la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero es muy pobre e incluso negativa. c) el cambio de uso de suelo asociado al incremento en las zonas de cultivo impacta negativamente al medio ambiente.
4. Los temas de transparencia y participación ciudadana son inexistentes en el reglamento, no sólo no hay instancias de participación ciudadana, sino que se oculta la información relativa a los permisos de uso de granos, al establecer que la información relativa a los permisos será clasificada.

5. El medio ambiente, la cobertura forestal y la biodiversidad quedan en fuerte riesgo, establece que los cultivos relacionados con la producción de bioenergéticos deben desarrollarse en zonas con uso agrícola o pecuario, en tierras de baja rentabilidad o en tierras marginales o de abandono. No obstante, en ninguna ley vigente existe el concepto de tierras marginales o de abandono, por lo que su definición queda a la interpretación o al arbitrio de la autoridad en turno.

6. En lo relativo a la vigilancia y sanción, no se les otorga ninguna atribución a las instancias pertinentes, como la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA). El reglamento carece de mecanismos e instrumentos que permitan garantizar que la producción de insumos para agro combustibles se lleve a cabo sin impactar el suelo, el agua, la biodiversidad y sin provocar el cambio de uso de suelo. Se omite el requisito de manifestación de impacto ambiental en la etapa de producción de insumos, que debiera exigirse al menos para la inserción de especies exóticas o invasoras en ecosistemas forestales (palma africana y *Jatropha*, entre otras).

### **1.8 Conclusión capítulo 1**

Para satisfacer las necesidades de desarrollo en una sociedad, no existe una única solución, es necesario establecer acciones dentro de las fronteras que delimitan las leyes, las posibilidades tecnológicas. Para nuestro caso la política pública son las que promueven e impulsan acciones a favor del desarrollo de la comunidad, siendo reguladas por la normativa de CFE y la ley de los bioenergéticos.

Después de analizar las alternativas tecnológicas y sus parámetros técnicos económicos, así como el marco regulatorio, se optó por utilizar el gasificador de fluido burbujeante como base del diseño de la planta de gasificación, al ser la opción más adecuada para nuestro propósito, con el que se pretende diseñar una implementación de tecnologías a favor del desarrollo de la comunidad, la preservación del medio ambiente y la reducción de los índices de pobreza.



## **Capítulo 2. La Milpa Sustentable**

### **2.1 Introducción**

El maíz es un cultivo representativo de México, debido a su gran importancia económica, social y cultural, es uno de los cereales más importantes del mundo, suministra elementos nutritivos a los seres humanos y animales. Es ampliamente difundido y aceptado, por ello se plantea como cultivo energético dentro de la respectiva normatividad.

El maíz se originó en una parte restringida de México, los tipos más desarrollados emigraron posteriormente hacia otros sitios de América, surgió aproximadamente entre los años 8 000 y 600 años A.C en Mesoamérica (México y Guatemala), probablemente a lo largo del acantilado occidental de México Central o del Sur, a 500 km de la Ciudad de México [20].

Se registran 59 variedades criollas de maíz en México. En 2012 se publicó en el Diario Oficial de la Federación el acuerdo por el que se determinan centros de origen y centros de diversidad genética del maíz, estableciendo como tal a los Estados de Baja California, Baja California Sur, Chihuahua, Coahuila, Nuevo León, Tamaulipas, Sinaloa y Sonora.

México ocupa el 8° lugar en producción mundial de maíz, en 2017 exportó a 17 países, en términos de valor, principalmente a Venezuela 58%, Kenia 33% y Estados Unidos 4%, entre otros 6%, lo que nos ubica como el 10° Exportador mundial de maíz grano [21].

En México el rendimiento del maíz no es mayor de 3 toneladas por hectárea promedio, con un cultivo tradicional. Como refiere las cifras de la SAGARPA, no es suficiente para cubrir el consumo nacional, por tal motivo México importa de EU miles de toneladas de maíz, lo que genera un fenómeno complejo que deteriora la dinámica económica del sector agrario.

### **2.2 El maíz y La Milpa Sustentable**

El maíz es una planta domesticada, es incapaz de reproducirse sin la intervención del humano, altamente especializada, sumamente voraz y de una gran importancia como cultivo energético,

El maíz, es una planta hermafrodita, lo que significa que produce flores masculinas y femeninas separadas en la misma planta; esto determina además que su polinización sea fundamentalmente cruzada. La panoja (flor masculina) produce polen, mientras que la mazorca (flor femenina) produce los óvulos que se convierten en la semilla.

El maíz tiene un sistema radicular fibroso, consiste de dos sistemas de raíces, el primero, está presente en el embrión y el segundo, raíces advenedizas que se originan del tallo después de la germinación Consultar figura 2.1 [22].

Tiene un sistema caulinar (tallo) con pocos macollos (nódulos), de los que se desarrollan las hojas naciendo en los nudos de forma alternada.

Las mazorcas, es una espiga cubierta por hojas, que servirán como reserva. En la parte superior de la planta se encuentre la espiga central con algunas ramificaciones laterales y es donde se producirán los granos de polen [23].

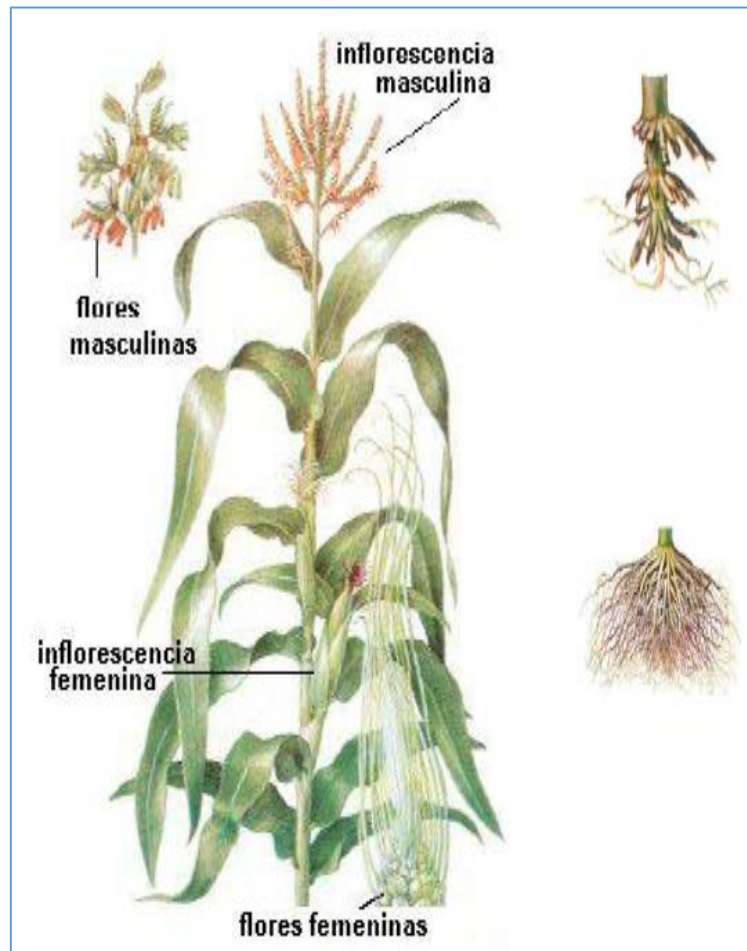


Figura: 2.1 Fenología del maíz [22]

El desarrollo de la planta consiste en una sucesión de etapas y fases definidas en un orden riguroso, correspondiendo a la germinación de la semilla hasta la floración y formación del fruto.

El sistema para clasificación de estas etapas o estadíos, es utilizado por la Universidad de Iowa, este se presenta a continuación y divide el desarrollo de la planta en vegetativo y reproductivo, las subdivisiones del estado vegetativo son designadas como V1, hasta V(n), siendo (n) la última hoja antes del panojamiento (VT) que se dará según el tipo de maíz sembrado [24]. Los estados reproductivos, van de R1 hasta R6 según el grado de madures del grano, véase figura 2.2 [25].



Figura 2.2: Crecimiento y desarrollo del maíz

### 2.2.1 El cultivo del maíz

El cultivo de maíz es una labor antiquísima, en todas las regiones que se llevan a cabo esta actividad se realiza el mismo proceso y es conocido como siembra tradicional.

#### Preparación del terreno

La preparación del terreno es el paso previo a la siembra. Se realiza la labor de arado para que el terreno quede suelto y sea capaz de tener cierta capacidad de absorción de agua sin encharcamientos. Se pretende que el terreno quede esponjoso, sobre todo la capa superficial donde se va a producir la siembra.

También se efectúan labores con arado de vertedera con una profundidad de labor de 30 a 40 cm. En estas operaciones los terrenos deben quedar limpios de restos de plantas (rastros).

#### Siembra

Antes de efectuar la siembra se seleccionan aquellas semillas resistentes a enfermedades, virosis y plagas, se realiza desde abril hasta principios de junio. Se siembra "a golpes", con dos o tres semillas en cada hoyo a una profundidad de 5 cm.

#### Fertilización

El maíz necesita para su desarrollo unas cantidades de elementos minerales. Las carencias en la planta se manifiestan cuando algún nutriente mineral en defecto o exceso: Se recomienda un abonado de suelo rico en fósforo y potasio. En cantidades de 0.3 kg de fósforo en 100 kg de abonado. También un aporte de nitrógeno en mayor cantidad sobre todo en época de crecimiento vegetativo. El abonado se efectúa según las características de la zona de plantación, por lo que no se sigue un abonado riguroso en todas las zonas por igual. No obstante, se aplica un abonado muy flojo en la primera época de desarrollo de la planta hasta que la planta tenga un número de hojas de 6 a 8.

## **Aclareo**

Es una labor de cultivo que se realiza cuando la planta ha alcanzado un tamaño próximo a los 25 o 30 cm y consiste en ir dejando una sola planta por golpe y se van eliminando las restantes. Además, se deben romper los alrededores endurecidos de la planta para que las raíces superficiales se desarrollen.

## **Recolección**

Para la recolección de las mazorcas de maíz se aconseja que no exista humedad en las mismas, más bien secas. Puede recolectarse la cosecha de maíz de forma manual o mecanizada donde además de recoger la mazorca se desgrana la misma.

## **Almacenamiento**

Para la conservación del grano de maíz se requiere un contenido en humedad del 35 al 45%. Para grano de maíz destinado al ganado éste debe tener un cierto contenido en humedad y se conserva en contenedores, previamente enfriando y secando el grano.

Para el maíz dulce las condiciones de conservación son de 0 grados y una humedad relativa de 85 a 90 %. Para las mazorcas en fresco se eliminan las hojas que la envuelven y se envasan en bandejas recubiertas por una fina película de plástico [26].

### **2.2.2 La Milpa Sustentable**

#### **Introducción**

“La Milpa Sustentable” es una propuesta del Ing. Eduardo León Garza, proyecto que se desarrolla en el seno de la UNAM, en primera instancia, se gestionó como servicio social con el Grupo de Servicio Social con Aplicación Directa a la Sociedad, de la Facultad de Ingeniería, UNAM.

La Milpa Sustentable es un sistema agroalimentario que integra la tecnología de Cero Descarga, retoma principios de la agricultura de precisión, emula prácticas de rotación de cultivos e implementa ecotecnias, para dar paso a una producción programada y más eficiente que el cultivo tradicional. “La Milpa Sustentable” es un elemento innovador que se incorpora para la generación de biomasa

La Cero Descarga consiste en recircular y reducir el consumo de agua que se utiliza durante el cultivo de interés, esto se logra al implementar en una bolsa negra, una maceta con válvula (cabeza de botella), lo que permite almacenar y regula la cantidad de humedad a muy bajo precio.

De manera pragmática podemos decir que “La Milpa Sustentable” es el cultivo de maíz, frijol chile o calabaza en una misma maceta, la cual tendremos que regar según lo demande la planta, y asimismo recuperar el exceso de líquidos con los que volveremos a regar la planta, para evitar el lavamiento de nutrientes [27].

Esta tecnología se ha aplicado en diferentes estados de la república, Puebla, Tlaxcala, Hidalgo y Estado de México, variando las condiciones de humedad, el tipo de semilla, logrando incrementar la productividad de un cultivo, consultar figura 2.3.



Figura 2.3: Cultivo La Milpa Sustentable, en diferentes estados de desarrollo

Fuente: Elaboración Propia

En el anexo 6 se puede analizar varios indicadores y datos de interés respecto al dimensionamiento y resultados del cultivo energético, así como en el anexo 7 se puede observar un esquema de cultivo diseñado para el correcto funcionamiento de la planta de cogeneración con base en la tecnología de La Milpa Sustentable.

### **2.2.3 El maíz como cultivo energético**

Regularmente los cultivos energéticos son cultivos de plantas de crecimiento rápido, destinadas para la obtención de energía o como materia prima para la obtención de otras sustancias combustibles. Entre los cultivos energéticos destinados a la producción de biomasa se suelen distinguir:

Cultivos productores de biomasa lignocelulosa, apropiados para producir calor mediante combustión directa en calderas, lo que permite utilizarlos en desecación y en generación de vapor.

Cultivos de semillas oleaginosas: básicamente son cultivos de colza, soja y girasoles destinados a la obtención de aceites vegetales aptos para ser usados como carburantes en el sector de la automoción, y conocidos comúnmente como biocarburantes [28].

El rastrojo de maíz como cultivo energético es de gran interés al ser una planta muy eficiente en la producción de biomasa. De una semilla con un peso aproximado de 300 mg se obtiene en un lapso de dos y medio meses una planta de más de dos metros de altura y de alrededor de 70 dm<sup>2</sup> de área foliar según la especie y otros factores, a los 4.5 meses la planta puede alcanzar en condiciones óptimas de cultivo, un peso de 1000 veces superior a la semilla que le dio origen. Aproximadamente la mitad de su peso corresponde a órganos reproductivos, lo que la transforma en uno de los cultivos de mayor rendimiento en grano por superficie [29].

El maíz supera ampliamente a otros cultivos, como por ejemplo girasol y soja en producción total de biomasa. Esta alta capacidad de producción se debe entre otros factores, a una elevada tasa fotosintética, a un bajo valor energético de la materia seca producida, así como a una adecuada estructura de cultivo.

#### **2.4 La comunidad de Plan de Escobas, Huautla de Jiménez, Oaxaca**

Plan de Escobas, Figura 2.7, es un pueblo originario, caracterizado por el INEGI con muy alto grado de marginación [30], se encuentra localizado a 5.3 km del Municipio de Huautla de Jiménez en el Estado de Oaxaca, en la sierra mazateca, colinda con los poblados de Plan de Joya a 1.643 km al noroeste, Peña Verde a 1 km al suroeste y a 1.5 km al sureste con el poblado de Cerro Ocote véase, figura 2.8 , todas ellas comunicadas por caminos de terracería y asfalto, geolocalización tabla 2.5.



Figura 2.4: Centro de la comunidad Plan de Escobas

Autor: Benno Wolfgang miembro del grupo espeleológico universitario, asociación de montañismo UNAM



Figura 2.5 Geolocalización

Tabla 2.1 Localización

Localización	
Latitud	18.170556
Longitud	-96.81417
Altitud m.s.n.m	1864

El clima en la comunidad, consultar tabla 2.6 [31], es adecuado para la siembra del maíz durante todo el año, sin embargo, no hay abasto de agua para el riego del campo. La cantidad de lluvia que experimenta la zona es abundante, lo que permite el almacenamiento de este recurso para su uso a lo largo del año, siendo esto ya un hábito de la comunidad.

Tabla 2.2 Datos Climatológicos

Clima	
Lluvia media anual	1151 - 1620 mm
Lluvia máxima	150 - 200 mm
Temperatura máxima	26 - 28 °C
Temperatura mínima	14 - 16 °C
Temperatura media anual	20 - 22 °C

Fecha de consulta: julio 2020 [31]

El último levantamiento de la población tabla 2.7[31], realizado en el 2015 indica que asciende a 259 personas, la presencia en la población varía ya que existe una movilidad relativamente constante, siendo los adultos en edad productiva los que se desplazan por temporadas a las diferentes ciudades por motivos laborales.

Tabla 2.3 Población

Población Total años	Cantidad
De 0 a 14	35
De 15 a 29	63
De 30 a 59	129
De 60 y más	32

Fecha de consulta: julio 2020[31]

Los productos básicos que componen la dieta de los pobladores son maíz y frijol, existen abasto de alimento ver tabla 2.8 [31] y otros productos como la papa, quelites, habas, chayotes, ejotes, huevo, mandarina, chile, pollo, puerco, res, todo en auto consumo, además de existir recolecta de productos del monte, los pobladores refieren aún es insuficiente para alcanzar la seguridad alimentaria.

La importancia que juega la tortilla para la alimentación de la población, es preponderante, por ello se destaca que la población solo cuenta con 2 molinos de nixtamal, no hay consumo de harina de maíz nixtamalizada ni tortillerías, lo que obliga a moler el maíz de forma tradicional.

Tabla 2.4 Abastos de alimentos

Abasto de alimentos	
Frijol	Sí
Maíz	Sí
Harina o tortillas de maíz	No
Harina o pan de trigo	No
Arroz	Sí
Leche	No
Huevo	Sí
Carne de res o de puerco	No
Pollo	No
Pescado	No

En la Tabla 2.9[31] se observa los múltiples indicadores de marginación que manifiesta la población, realizados por el INEGI en el año 2015.



Tabla 2.5 Disponibilidad de servicios

Disponibilidad de Servicios									
Alumbrado público	x	Espacios culturales y recreativos		Red pública de drenaje	x	Transporte público	si	Telecomunicaciones	x
Cobertura del alumbrado público	x	Plaza o Jardín público	x	Limpieza de áreas públicas	x	Transporte público	x	Teléfono público	x
Agua entubada	x	Cancha deportiva	si	Recolección de basura domiciliaria	x	Autobús	x	Internet público	x
Abastecimiento de agua entubada	x	Parque con juegos infantiles	x	Clínica o centro de salud	Sí	Micro, combi o taxi colectivo	x	Señal de teléfono celular	x
Red de agua entubada	x	Biblioteca	x	Partera o comadrona	si	Camión de redilas o troca	x	Servicio de envío y recepción de dinero	x
Fuente de abastecimiento de agua	x	Casa de la cultura	x	Promotor de salud	Sí	Taxi libre o de sitio	x	Servicio de televisión de paga	x
Agua potable	x	Salón de usos múltiples	x	Curandero	si	Bicitaxi o mototaxi	x	calles con recubrimiento	x

## 2.5 El cultivo y producción del maíz, La Milpa Sustentable en la comunidad

Existen múltiples tecnologías que incrementan el rendimiento de un cultivo, estas pueden ser, el mejoramiento genético, la hibridación, implementación de fertilizantes, uso de pesticidas, herbicidas, control y promoción del riego, cultivos asociados, cultivo en invernaderos, automatización de procesos, uso de diferentes maquinarias, etc., pero los factores que más interviene en el rendimiento de un cultivo son, las condiciones climáticas, la riqueza de suelo y la disponibilidad de agua.

### 2.5.1 Consumo de agua por kg de maíz

En la zona de Huautla de Jiménez, existe una lluvia media anual de 1385.5 mm y un rendimiento de grano maíz de 1.3 kg/ha [32], se calcula que fueron necesarios 10653 L de agua para producir 1 kg de grano de maíz.

$$\text{Disponibilidad de lluvia} = 1385.5 \left[ \frac{\text{mm}}{\text{anual}} \right] = 1385 \left[ \frac{\text{L}}{\text{m}^2 \text{ anual}} \right] \quad 2.1$$

$$\text{Consumo litros por kilo} = \frac{\left( 1385 \left[ \frac{\text{L}}{\text{m}^2 \text{ año}} \right] \right) \left( 10\,000 \left[ \frac{\text{m}^2}{\text{ha}} \right] \right)}{\left( 1.3 \left[ \frac{\text{ton}}{\text{ha}} \right] \right) \left( 1000 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{ton}} \right] \right)} = 10653 \left[ \frac{\text{L}}{\text{kg}} \right]$$

La cantidad de agua necesaria para producir 1 kg de grano de maíz, con la tecnología de La Milpa Sustentable, es de 1374.62 L, la metodología utilizada para determinar esta cantidad, no considera la capacidad de recircular el agua, por lo que podemos decir que esta es la cantidad máxima de agua que utiliza esta tecnología. 2.2

Para producir 1 kg de grano de maíz, se requiere alrededor de 545 litros de agua [33], las diferencias de litros de agua por kilogramo de maíz que se mencionan, radican en la manera de aprovechar el agua disponible, siendo la tecnología de riego por inundación la que más impacta el ambiente, al consumir agua que proviene de otras zonas la cual es necesario bombear.

## 2.6 Rendimiento del cultivo tradicional

Plan de Escobas no cuenta con una base de datos oficial o historial de producción de la comunidad, para determinar el rendimiento de la comunidad se estableció con base en la información de los pobladores y más concretamente con el maestro Bernardino González que determinó un rendimiento de 6 toneladas por hectárea de rastrojo seco entre maíz y frijol, 850 kilogramos de maíz por hectárea y 230 kilogramos de frijol por hectárea.

Para determinar, la producción de maíz en la comunidad, se cuantifica el área de los terrenos aledaños a esta y se multiplica por el rendimiento de este ver figura 2.9.

Debido a la cercanía con las otras comunidades, hay terrenos de cultivo que no se sabe con certeza a cuál de las comunidades pertenece. En total se establece una cantidad de 42 hectáreas.



Figura 2.6 Terrenos de cultivo cercanos a la comunidad.

El proceso de recolección de la biomasa, contempla la cosecha tradicional que consiste en, esperar que el cultivo de maíz y frijol se seque, se recolecta la mazorca y se desgrana, teniendo dos productos, el grano que se utilizará para auto consumo y el resto de la planta que será el alimento de los animales, en el caso de frijol se recolectan las matas, se apalean para liberar el

grano de sus vainas, teniendo 2 productos, granos de frijol y rastrojo de frijol que dejan que se reincorpore al suelo o es utilizado como alimento para animales.

Se calcula que la cantidad total de biomasa disponible en la comunidad es de 252 toneladas de rastrojo gasificable por año.

$$\text{Rastrojo gasificable comunidad} = \left(6 \left[\frac{\text{ton}}{\text{ha}}\right]\right) (42 [\text{ha}]) = 252 [\text{ton}] \quad 2.3$$

## 2.7 Rendimiento del sitio implementando La Milpa Sustentable

Para determinar la producción de rastrojo en peso seco o combustible, se ha de calcular en 4 pasos, el primero es el cálculo de la biomasa de maíz en verde o fresco de 5.22 ha, considerando la semilla endémica, el segundo paso es el cálculo del peso de la biomasa en seco, en tercer lugar se ha de considerar el peso asociado a la raíz de la planta, ya que esta no se ha considerado y la tecnología de La Milpa Sustentable permite su aprovechamiento y por último se cuantifica el rastrojo del cultivo asociado, para si poder determinar la disponibilidad del combustible relacionado con La Milpa Sustentable , para finalmente considerar lo producido por la comunidad.

El área de cultivo corresponde a 5.22 ha de una posible ubicación del cultivo energético, considerando la densidad de siembra y la productividad del escenario considerado en el anexo 6 y 7 de nuestro estudio se tiene una cosecha de 646 toneladas de forraje en verde.

$$\begin{aligned} \text{Rastrojo de maiz verde LMS} &= \left(123.76 \left[\frac{\text{ton}}{\text{ha}}\right]\right) (5.22 [\text{ha}]) \quad 2.4 \\ &= 646 \text{ ton de forraje verde} \end{aligned}$$

Para determinar el cálculo del grano de maíz, observamos la semilla local, en la que cada elote produce 408 granos en promedio.

Utilizando la metodología [34] que indica como calcular el rendimiento de grano en un cultivo determinado. Se cuantifica el peso de 1000 granos de maíz. Para la comunidad de plan de escobas es 294 g, con la siguiente fórmula se determina la cantidad de maíz.

$$\begin{aligned} \text{rendimiento grano LMS} &= \quad 2.5 \\ &= \left(\frac{294 \text{ gramos}}{1000 \text{ granos}}\right) \left(408 \left[\frac{\text{granos}}{\text{elotes}}\right]\right) \left(140\,000 \left[\frac{\text{elotes}}{\text{ha}}\right]\right) (5.22 [\text{ha}]) \left(\frac{1 [\text{ton}]}{1\,000\,000 [\text{gramos}]}\right) \\ &= 87.7 [\text{ton de grano}] \end{aligned}$$

La segunda transformación para estipular el peso en seco, corresponde al secado de la biomasa, se acude a la figura 2.10 y a la tabla 2.10 de transformación [35] que indica según el estado de desarrollo relativo del cultivo y el tipo de maíz, la cantidad de materia seca que representa y el ajuste necesario para su cálculo.

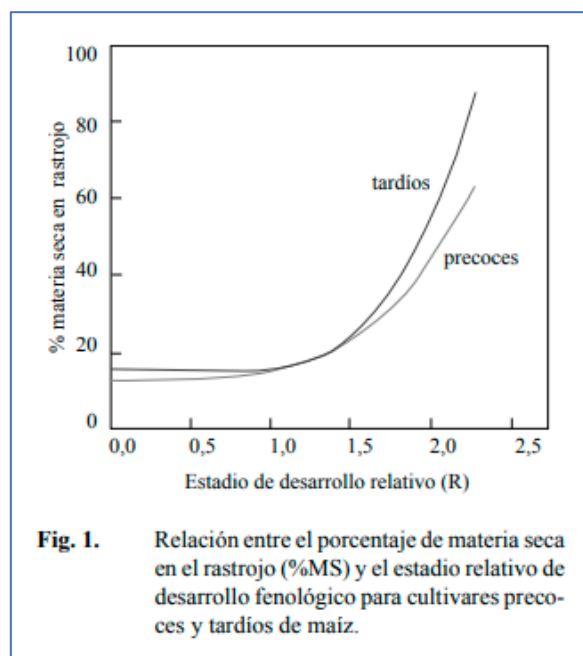


Figura 2.7: Relación porcentaje de materia seca del maíz

Tabla 2.6: Ajuste de materia seca, por concepto de mazorca

Estado relativo desarrollo fenológico	incremento % materia seca
1.2	0
1.3	1
1.4	2
1.5	3
1.6	4
1.7	5
1.8	6
1.9	7
2	6
2.1	6
2.2	6
2.3	5
2.4	5
2.5	4
10	8

$$\begin{aligned}
 \text{Peso rastrojo en seco} &= (90\% \text{ forraje} + 6\% \text{ mazorca})(646 \text{ [ton]}) = \\
 &= 620 \text{ ton rastrojo en seco}
 \end{aligned}$$

2.6

Para determinar las componentes de la planta, se aborda la tabla 2.11 [36], con la que se calcula la biomasa asociada a las raíces para su aprovechamiento.

Tabla 2.7 Composición porcentual de las partes de la planta de maíz en base seca

Composición en base seca del maíz		
Partes de la planta	porcentaje %	biomasa ton
grano	14	87.7
hoja	13	81.5
tallo	59	369.8
flor	1	6.3
olote	6	37.6
raíz	7	43.9

Fecha de consulta: septiembre 2021

Por último, se determina la cantidad de rastrojo o forraje seco del frijol endémico, con un valor en campo de 164 g de rastrojo seco por planta de frijol y una relación de 33 g de frijol por planta.

$$\begin{aligned}
 \text{Rastrojo frijol} &= \left(140 \times 10^3 \left[\frac{\text{plantas}}{\text{ha}}\right]\right) \left(0.164 \left[\frac{\text{kg}}{\text{plantas}}\right]\right) (5.22 [\text{ha}]) = & 2.7 \\
 &= 119\,851 [\text{kg}] \left[\frac{1 \text{ ton}}{1000 \text{ kg}}\right] = 119.9 [\text{ton rastrojo de frijol}]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Rendimiento de frijol LMS} &= \left(0.0276 \left[\frac{\text{kg frijol}}{\text{plantas}}\right]\right) \left(140 \times 10^3 \left[\frac{\text{plantas}}{\text{ha}}\right]\right) (5.22 [\text{ha}]) = & 2.8 \\
 &= 20\,170 \left[\frac{\text{kg de frijol}}{\text{ha}}\right] \left[\frac{\text{ton}}{1000 \text{ kg}}\right] = 20.17 \left[\frac{\text{ton de frijol}}{\text{ha}}\right]
 \end{aligned}$$

En resumen, se disponen de 252.25 toneladas de residuos por cultivo tradicional, más 119.9 por el cultivo del frijol vía La Milpa Sustentable, más 624.63 por el cultivo del maíz vía La Milpa sustentable. Para un total de 996.78 toneladas.

Con relación al consumo de agua y a los problemas de sequía. Plan de escobas está ubicado en una zona con una cantidad de lluvia promedio anual de 1385.9 mm, en la figura 2.12 podemos observar la distribución de la lluvia a lo largo de todo el año 2020 [37]. De lo que podemos concluir que la comunidad cuenta con abundante lluvia.

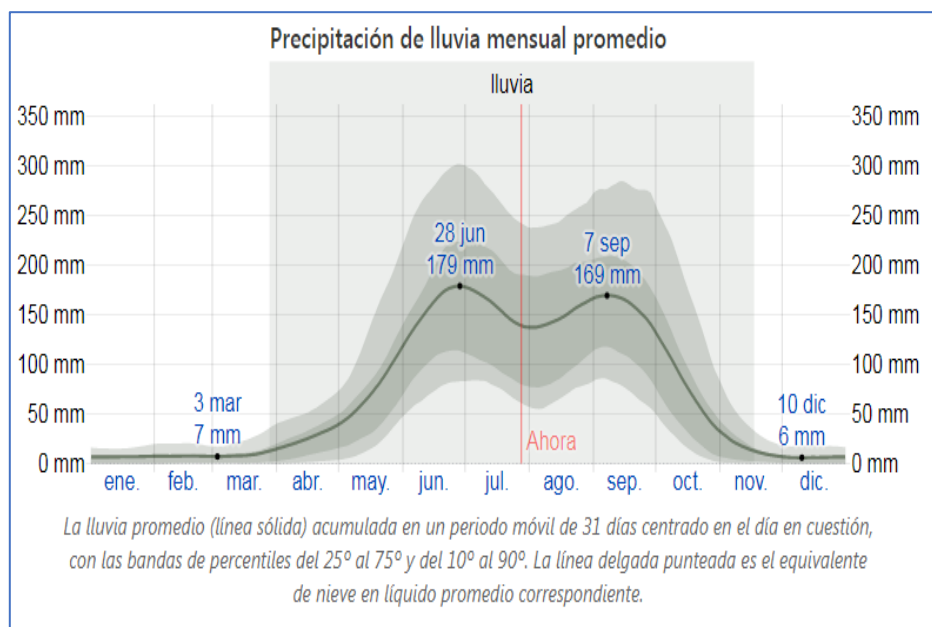


Figura 2.8: Distribución de lluvia en Oaxaca del año 2020

## 2.9 Conclusiones capítulo 2

Un elemento de gran interés en nuestro proceso de diseño de planta de gasificación, es el combustible que se utilizará; se estableció que fuera rastrojo de maíz, frijol, ya que son un cultivo que se ha explotado por cientos de años y es un común denominador en muchas poblaciones marginadas.

Para nuestro trabajo, la importancia del cultivo energético y la etapa de gasificación, se centra en que este último está dimensionado en función del gasto másico de la planta, diseñado para la comunidad de Plan de Escobas, en el que se aprovecha los productos derivados como maíz y frijol de un proceso y permite conceptualizar al rastrojo como producto principal y de igual valor a la producción de alimentos.

## **Capítulo 3 Propuesta de planta con base a cogeneración y gasificación**

### **3.1 Introducción**

Se realiza el análisis técnico de una planta de cogeneración con base en la tecnología de gasificación de lecho fluido burbujeante, que utiliza los rendimientos de La Milpa Sustentable aplicada a la comunidad de Plan de Escoba, como elemento para generar biomasa, además se implementa la producción de harinas de maíz y frijol, para aprovechar la cogeneración, en función de la capacidad y potencial de producción de la comunidad de Plan de Escoba Oaxaca.

### **3.2 Diseño conceptual y propuesta operativa del sistema energético en base a gasificación y La Milpa Sustentable**

Como primer parámetro de diseño se estableció la capacidad máxima de generación de energía eléctrica en la planta, definida en 499 kW de potencia de generación neta. La capacidad de generación bruta considera pérdidas de auto consumo y pérdidas debido a la altitud de la zona, sin embargo, no fue posible establecer los 499 kW de generación neta, debido a la relación que hay entre la capacidad nominal de los equipos de generación y el límite que permite la normatividad de CFE, así como las limitantes de la zona.

Una vez establecida la capacidad de generación eléctrica en 475 kW e netos, se determinó el potencial que tendría la zona seleccionada para generar biomasa y así establecer el gasto másico que tendría la planta, se optó por tener dos consideraciones, el gasto másico para un caso teórico, cuya planta tenga una potencia neta de 499 kW e y un caso particular cuya potencia sea la del sitio.

Con los resultados obtenidos se optó por utilizar las dimensiones del cultivo energético para el caso teórico, con los requerimientos del caso particular, logrando un margen operativo, que nos permitiría ajustar levemente el factor de planta, potencia de generación, gasto másico y sobre todo permite considerar la productividad del cultivo y las pérdidas debido a factores climatológicos principalmente.

Ya definidas las características de la planta y el cultivo energético, se procedió a dimensionar los alcances de consumo de vapor y los impactos económicos.

### **3.3 Esquema de producción de biomasa**

Para hacer uso del rastrojo de maíz es necesario acondicionarlo, primero se realiza la cosecha, se toma el elote, se desgrana y se conserva las hojas, además del elote, con relación al tallo, tradicionalmente se corta con el machete y se recupera la caña, sin embargo, para la tecnología de La Milpa Sustentable, se vierte el contenido de la maceta, liberando los terrones de las raíces, posteriormente se recupera la caña completa con raíces incluidas para llevarla a la etapa de gasificación.

Anteriormente se determinó la cantidad de biomasa disponible de 744.53 toneladas de rastrojo considerando el área del cultivo efectivo de 5.22 ha, con la tecnología de La Milpa Sustentable.

La producción de rastrojo de la comunidad bajo el esquema de temporal, se consideró en 252 toneladas dando un total de 996 toneladas de rastrojo seco al año, sin embargo, la disponibilidad de esta se da a lo largo del año, en función de los periodos de cosecha y desarrollo del cultivo.

En el anexo 7 podemos observar el esquema de cultivo simulado para el año 2020, este se divide en 25 secciones de trabajo de 2088 m<sup>2</sup>, lo que permitiría una cosecha de 2 lotes por semana durante 25 semanas del año, la disposición de residuos para combustible es de 29.76 toneladas de rastrojo a la semana.

La biomasa que aporta la comunidad, lo hace al final de la cosecha del temporal, considerando que es posible recolectar la siembra a lo largo de un mes.

### 3.4 Requerimientos y datos de operación

Para determinar el parámetro de diseño “gasto másico de combustible”, se realizaron 3 aproximaciones, que determinaron un valor de 0.0909 [  $\frac{Kg}{s}$  ] de rastrojo de maíz y frijol; La primera simulación relacionada el potencial energético de la comunidad, la segunda la potencia máxima de generación 499 kW y la tercera al caso de estudio de la comunidad Plan de Escobas.

Considerando el flujo másico de interés de 0.0909[  $\frac{Kg}{s}$  ] y un tiempo de operación de la planta de 12 horas al día se determina que el consumo de combustible haciende a 27.488 toneladas de rastrojo a la semana y la disponibilidad para el caso teórico es de 29.76 toneladas a la semana, de lo que se puede concluir, que hay posibilidad de operar casi 13 horas por día, sin embargo, considerando la lógica operativa, se fija un tiempo de trabajo de 12 horas de generación por día

$$\begin{aligned} \text{Gasto másico} &= \frac{29.7 \text{ toneladas}}{1 \text{ semana}} \left[ \frac{1 \text{ semana}}{7 \text{ días}} \right] \left[ \frac{1 \text{ día}}{12 \text{ horas}} \right] \left[ \frac{1 \text{ hora}}{60 \text{ minutos}} \right] \left[ \frac{1 \text{ minuto}}{60 \text{ segundos}} \right] & 3.1 \\ &= 0.09821 \left[ \frac{kg}{s} \right] \end{aligned}$$

En la literatura podemos observar diferentes valores de poder calorífico para el rastrojo de maíz según la fuente que se consulte, como ejemplo se tiene el valor de 17.965 [  $\frac{MJ}{kg}$  ] para un estudio en Colombia o de 18.4 [  $\frac{MJ}{kg}$  ] en E.U.A [38], sin embargo, el valor que se utilizará en la simulación es de 16.932 [  $\frac{MJ}{kg}$  ], que es un valor más conservador para modelar la planta.



### 3.5 Modelado y evaluación de la propuesta operativa

Se utilizó el software THERMOFLEX versión 30.0 para realizar la propuesta de planta, su modelo energético y su simulación, y determinar los balances de masa y energía. Así como sus parámetros de desempeño y flujos de energía útil.

La primera etapa es la del gasificador, véase figura 3.1, este se alimenta con una mezcla de biomasa a 25 grados centígrados, vapor de agua a 158.8 grados centígrados y aire a 23 grados centígrados que produce syngas a 950 grados centígrados y ceniza.

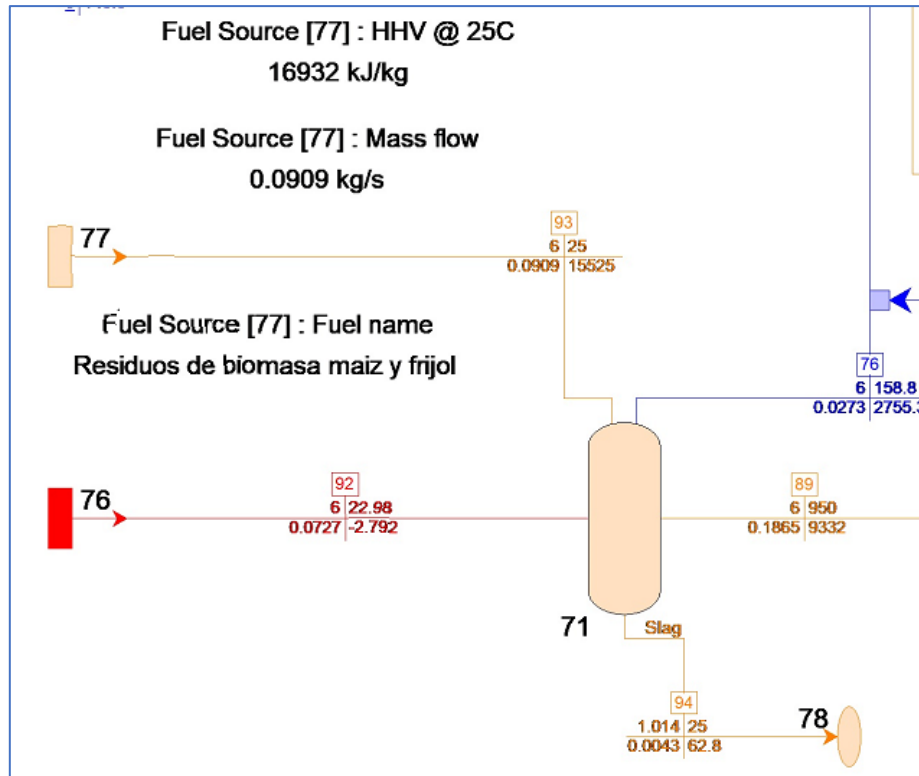


Figura 3.1 Gasificador  
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.1 Condiciones de operación del gasificador

Gasificador					
Estado	Sustancia	Presión [bar]	Temperatura [°C]	Flujo másico [kg/s]	Poder Calorífico [kJ/kg]
Entrada	Biomasa	6	25	0.0909	15525
Entrada	Aire	6	22.98	0.0727	-2.792
Entrada	Vapor	6	158.8	0.0273	2755.3
Salida	Syngas	6	950	0.1865	9332
Salida	Ceniza	1.014	25	0.0043	62.8

Fuente: Elaboración Propia

Después de producir el syngas, es necesario acondicionarlo, véase figura 3.2 para alimentar al motor generador, esto se logra con un filtro que lo libera de impurezas, un intercambiador de calor que reduce la temperatura de 950°C a 160°C, generando la primera recuperación de calor y vapor con el que se alimenta el gasificador y por último lavado del syngas.

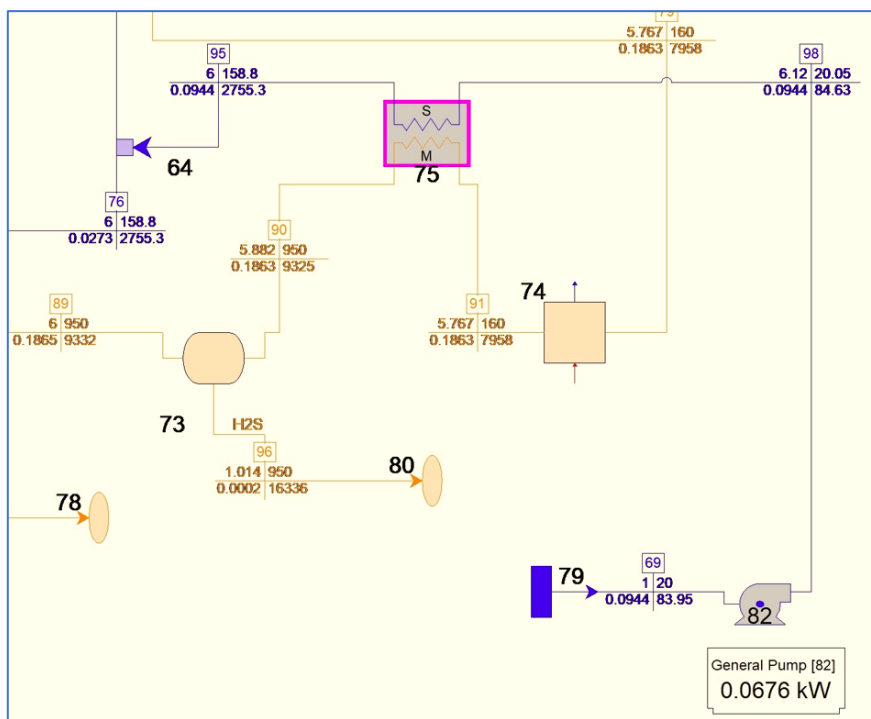


Figura 3.2 Acondicionamiento del combustible

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.2 Condiciones de operación del sistema de acondicionamiento del combustible.

Sistema de acondicionamiento de syngas					
Estado	Sustancia	Presión [bar]	Temperatura [°C]	Flujo másico [kg/s]	Poder Calorífico [kJ/kg]
Filtro					
Entrada	Syngás	6	950	0.1865	9332
Salida	Syngás	5.882	950	0.1863	9325
Salida	H2S	1.014	950	0.0002	16336
Intercambiador de calor					
Entrada	Syngás		950	0.1863	9325
Entrada	Agua	6.12	20.05	0.0944	84.63
Salida	Syngás	5.767	160	0.1863	7958
Salida	Agua	6	158.8	0.0944	2755.3
Lavado de combustible					
Entrada	Syngás	5.767	160	0.1863	7958
Salida	Syngás	5.767	160	0.1863	7958

Fuente: Elaboración Propia

Inmediatamente después el motor generador es alimentado con gas de síntesis (syngas) y aire para realizar la combustión, que genera la fuerza de trabajo necesaria para la generación de energía eléctrica, consúltese figura 3.3. Un elemento importante del motor de generación, es el sistema de refrigeración, este se conforma por una bomba, una torre de enfriamiento y un tanque de almacenamiento, que deben funcionar adecuadamente para evitar daños en el motor generador.

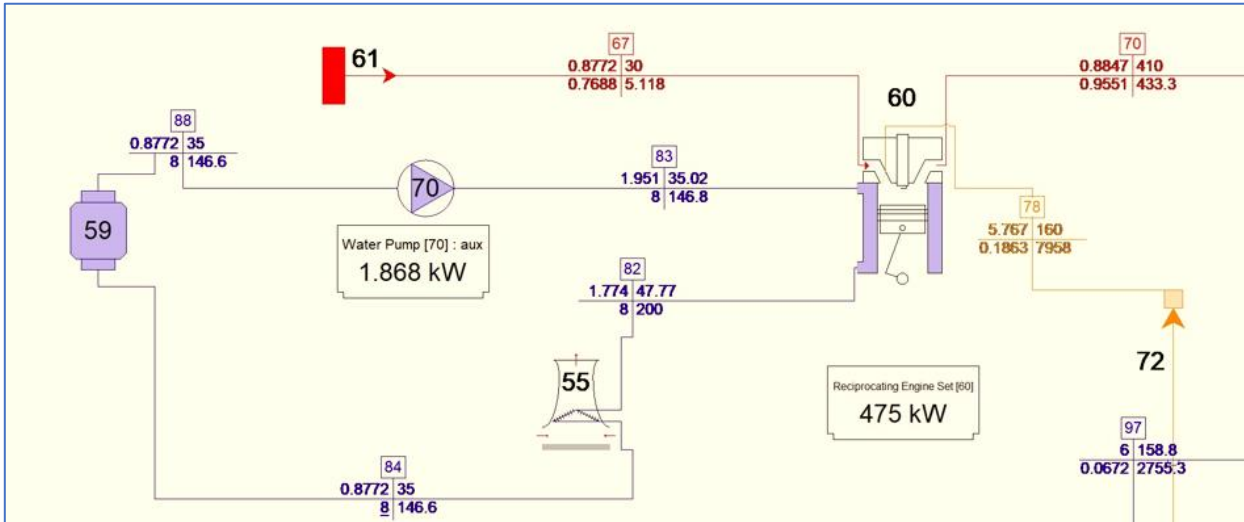


Figura 3.3 Generación de energía eléctrica.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.3 Condiciones de operación del sistema de generación de energía eléctrica.

Estado	Sustancia	Presión [bar]	Temperatura [°C]	Flujo másico [kg/s]	Poder Calorífico [kJ/kg]
<b>Motor generador</b>					
Entrada	Syngas	5.767	160	0.1863	7895
Entrada	Aire	0.8772	30	0.7688	5.118
Entrada	Agua	1.951	35.02	8	146.8
Salida	CO2	0.8847	410	0.9551	433.3
Salida	Agua	1.774	47.77	8	200

Fuente: Elaboración Propia

Los gases de combustión son procesados por el sistema de cogeneración, que recupera calor, la mayor cantidad de energía térmica proveniente del gas de combustión del motor generador por medio de un economizador que precalienta el agua y una bomba para recircular el líquido refrigerante.

La energía proveniente de este proceso se utiliza para la nixtamalización, cocción de frijol y deshidratación de alimentos que son parte de la planta.

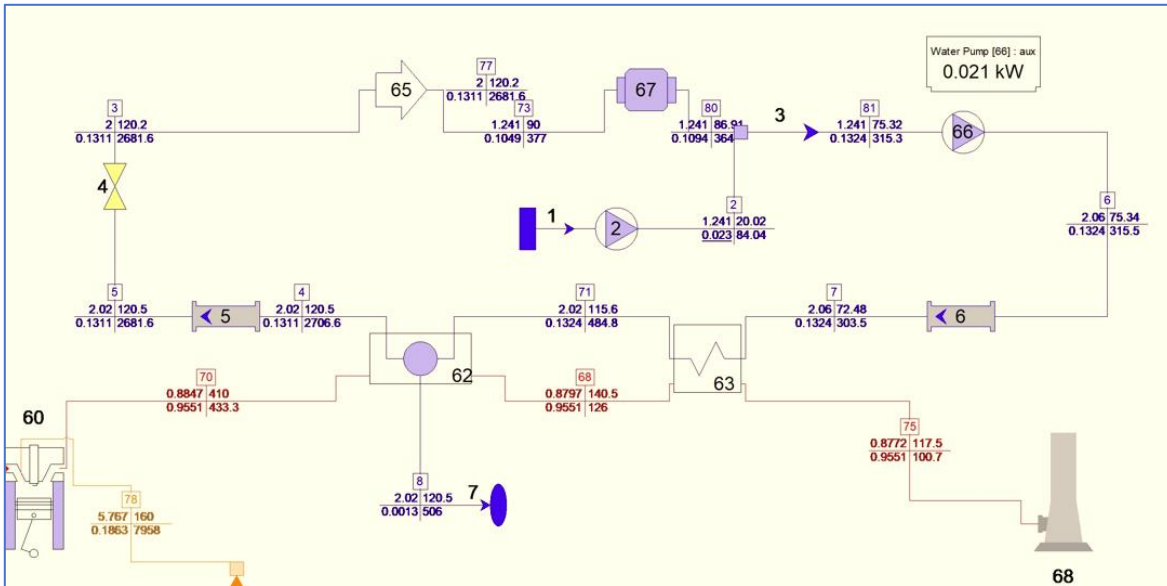


Figura 3.4 Sistema de cogeneración de energía.  
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.4 Condiciones de operación del sistema de cogeneración.

Estado	Sustancia	Presión [bar]	Temperatura [°C]	Flujo másico [kg/s]	Poder Calorífico [kJ/kg]
<b>Intercambiador de calor</b>					
Entrada	CO2	0.8847	410	0.9551	433.3
Entrada	Agua	2.02	115.6	0.1324	484.8
Salida	CO2	0.8797	140.5	0.9551	126
Salida	Agua	2.02	120.5	0.1311	2706.6
<b>Economizador</b>					
Entrada	CO2	0.8797	140.5	0.9551	126
Entrada	Agua	2.06	72.48	0.1324	303.5
Salida	CO2	0.8772	117.5	0.9551	100.7
Salida	Agua	2.02	115.6	0.1324	484.8
<b>Chimenea</b>					
Salida	CO2	0.8772	117.5	0.9551	100.7

Fuente: Elaboración Propia

### 3.6 Resumen de resultados de parámetros de desempeño técnico y energético

La información generada por la simulación, permite caracterizar y confirmar técnicamente los parámetros de operación de la planta y los principios de operación de esta, definiendo el funcionamiento de las diferentes áreas de operación.

La capacidad de placa de generación de la planta asciende a 525 kW eléctricos y 524.5 kW térmicos, esta tiene un auto consumo definido de 7 kW e, necesarios para la generación de energía eléctrica, asociados a los sistemas de bombeo principalmente, además se considera una pérdida de potencia de 43 kWe debido a la altitud de casi 2000 msnm teniendo como resultado una potencia bruta en sitio de 475 kWe y 497.1 kW térmicos.

$$\text{Potencia de diseño} = 525 \text{ [kW]} \quad 3.2$$

$$\begin{aligned} \text{Potencia bruta real} &= \text{potencia bruta de diseño} - \text{pérdidas por altitud} & 3.3 \\ &= 525 \text{ [kW]} - 50 \text{ [kW]} = 475 \text{ [kW]} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Potencia neta real} &= \text{Potencia bruta real} - \text{consumo propio} = (475 - 7.329) \text{ [kW]} = & 3.4 \\ &467.67 \text{ [kWe]} \end{aligned}$$

Si consideramos una disponibilidad del combustible de 996 toneladas al año y un gasto másico de 0.09 kg/s, con una operación de 12 horas por día de trabajo, se establece que tendrá 33.47 semanas de operación al año.

$$\begin{aligned} \text{tiempo de operación} &= \frac{\text{Disponibilidad del combustible}}{\text{gasto másico tiempo de operación}} & 3.5 \\ &= \frac{(996 \left[ \frac{\text{ton}}{\text{año}} \right]) \left( 1000 \left[ \frac{\text{kg}}{1 \text{ ton}} \right] \right)}{\left( 0.0984 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] \right) \left( 60 \left[ \frac{\text{s}}{\text{min}} \right] \right) \left( 60 \left[ \frac{\text{min}}{\text{hora}} \right] \right) \left( 12 \left[ \frac{\text{hora}}{\text{día}} \right] \right) \left( 7 \left[ \frac{\text{día}}{\text{semana}} \right] \right)} = \\ &= 33.47 \left[ \frac{\text{semana}}{\text{año}} \right] \end{aligned}$$

Después de analizar los resultados de la simulación, se observó que es posible incrementar el factor de planta. En una primera consideración se usó el valor de 0.31 (en sitio y por disponibilidad del combustible), de preservarlo se tendría un excedente de combustible; ajustando el valor y considerando los  $10826 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kWh}} \right]$  de la tasa de calor asociados a la altura del sitio y con la condición de consumir todo el combustible disponible.

Despejando el factor de planta de la ecuación de generación anual bruta que asciende 1.557 MWh y sustituyéndolo en la ecuación de consumo de combustible se obtiene un valor de 0.3746 de factor de planta.

$$\text{Generación anual bruta} = (\text{Potencia bruta})(\text{factor de planta})(8760 \text{ h}) \quad 3.6$$

$$\text{Factor de planta} = \frac{\text{generación anual bruta}}{(\text{Potencia bruta})(8760 \text{ h})} \quad 3.7$$

$$\text{Consumo de combustible} = \frac{(\text{Tasa de calor})(\text{generación anual bruta})}{\text{poder calorífico}} \quad 3.8$$

$$\frac{(\text{Consumo de combustible})(\text{poder calorífico})}{\text{Tasa de calor}} = \text{generación anual bruta} \quad 3.9$$

$$\text{generación anual bruta} = \frac{(996 \left[ \frac{\text{ton}}{\text{año}} \right]) (16932 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right])}{10601 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kWh}} \right]} = 1557.75 \text{ kWh}$$

$$\text{factor de planta} = \frac{1557.75 \left[ \frac{\text{kW}}{\text{h}} \right]}{(0.525 \text{ [MW]})(8760 \text{ [h]})} = 0.374 \quad 3.10$$

El tiempo de operación de la planta es de 3279 horas al año, considerando una base de 30 días por mes, se tiene que la planta podría operar 8.4 meses del año.

$$\text{Meses de operación} = (\text{factor de planta})(\text{año}) = \quad 3.11$$

$$= 0.374 \left[ \frac{8760 \text{ h}}{\text{año}} \right] \left[ \frac{1 \text{ día}}{12 \text{ h}} \right] \left[ \frac{1 \text{ mes}}{30 \text{ día}} \right] = 9.1 \frac{\text{mes}}{\text{año}}$$

Como se ha mencionado antes el factor de planta está sujeto a la disponibilidad del combustible, en la Figura 3.4 observamos un esquema de consumo y disponibilidad de combustible que permitiría un factor de planta de 0.374, también se puede consultar en el anexo 5.

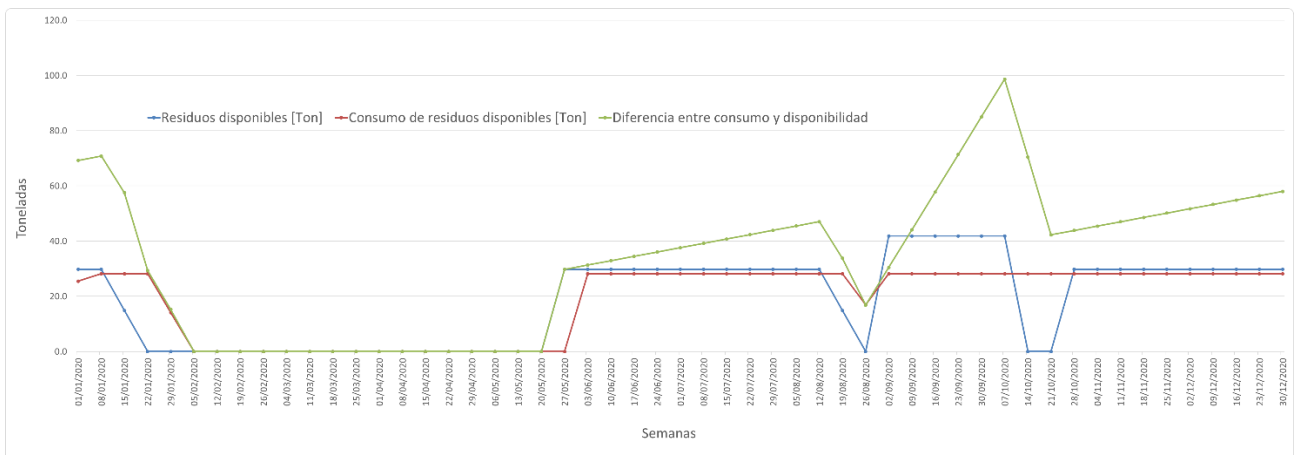


Figura 3.5 Disponibilidad de combustible  
Fuente: Elaboración Propia

Con estos datos es posible cuantificar la generación anual bruta de 1406.5 MWh, la generación anual neta en 1384.59 MWh y el auto consumo de 21.9 kWh anual, lo que permitiría poner a la venta 1362.7 MWh al año.

$$\begin{aligned} \text{Generación anual bruta} &= [\text{Potencia bruta}][\text{factor de planta}][\text{horas del año}] & 3.12 \\ &= (0.475 \text{ MW})(0.374)(8760\text{h}) = 1556.214 [\text{MWh}] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Generación anual neta} &= (\text{Potencia neta})(\text{factor de planta})(\text{horas del año}) & 3.13 \\ &= 0.469 \text{ MW}(0.374)(8760\text{h}) = 1536 [\text{MWh}] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Auto consumo} &= \text{Generación anual bruta} - \text{Generación anual neta} \\ &= (1556 - 1536)[\text{MWh}] = 19.5 [\text{MWh}] & 3.14 \end{aligned}$$

Los resultados de la simulación indican, las eficiencias de los procesos, así como la tasa de calor en el sitio de 10826 kJ /kWh, que se utiliza para determinar la cantidad de combustible que es utilizado.

$$\begin{aligned} \text{Eficiencia CHP} &= \frac{P_e \text{ salida} + P \text{ calor cogeneración}}{P \text{ combustible}} = & 3.15 \\ &= \frac{(525 + 524.5)[\text{kW}]}{\left(16932 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right]\right) \left(0.0909 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right]\right)} \times 100\% = 68.18\% \end{aligned}$$

### 3.7 Usos del calor resultante

Para el calor proveniente de la cogeneración se propone 4 usos, estos dependen de la materia prima disponible, las necesidades y la disponibilidad del vapor. Se considera en primera instancia, la nixtamalización del maíz, en segundo lugar, la cocción del frijol, seguido por la deshidratación del maíz nixtamalizado y el frijol cocido.

La nixtamalización es un proceso sencillo en el que se hierva maíz con cal, primero se deja remojar el grano varias horas para incrementar la humedad de este, después se hierva con cal hasta que se desprenda el recubrimiento de la semilla y por último se escurre, para finalmente lavar la semilla de maíz ya nixtamalizada.

Para producir harina de maíz es necesario, un proceso previo de deshidratación, que está en función de las características del deshidratador, una vez realizada la deshidratación del grano se procede a la molienda, finalmente se tamiza y empaca.

Para la cocción de frijol es un proceso muy similar a la nixtamalización solo que se requiere 2 veces más tiempo, por lo tanto, se considera que se requiere el doble de energía que la demandada por la nixtamalización, sin embargo, para el proceso de harina de frijol la cantidad de energía que se requiere es similar.

Para determinar la cantidad de energía que consume este proceso, fue preciso retomar resultados de la investigación “Nixtamalización de cinco variedades de maíz con diferente dureza de grano: impacto en consumo de combustible y cambios fisicoquímicos” [39] la cual, nos indica el calor necesario para el proceso de nixtamalización y la cantidad de agua que absorbe el maíz durante las 2 horas que dura este proceso.

$$Q \text{ de harinificación} = 661 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg de maíz}} \right] = 330.5 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg de maíz h}} \right] ;$$

absorción del agua 30% de su peso

Sin embargo, el valor que impacta mayormente es la demanda de vapor que tienen las marmitas, se pueden consultar datos técnicos de la marmita para maíz y la marmita de frijol de interés, cuyas capacidades nominales son, 200 L y 80 L con un consumo de vapor de 85 kg de vapor /hora y 25 kg de vapor / hora, respectivamente [40].

Se considera una capacidad de nixtamalización de 56 kg de maíz en un ciclo de 2 horas y una capacidad de cocción de frijol 22.4 kg en 4 horas, esto debido a la eficiencia de las marmitas y la relación de volumen de agua y la cantidad de grano necesario para su correcta cocción.

$$\text{Rendimiento marmita} = \frac{\text{Volúmen marmita(eficiencia)}}{\text{relación agua maíz}} \quad 3.16$$

$$\text{Rendimiento marmita maíz} = \frac{200 [\text{litros}] (0.70)}{2.5 \left[ \frac{\text{litros}}{\text{kg maíz}} \right]} = 56 [\text{kg de maíz}] \quad 3.17$$

$$\begin{aligned} \text{Demanda vapor nixtamalización} &= \left[ \frac{85 \text{ kg vapor}}{\text{hora}} \right] \left[ \frac{2 \text{ horas}}{1 \text{ ciclo}} \right] \left[ \frac{1 \text{ ciclo}}{56 \text{ kg maíz}} \right] = \quad 3.18 \\ &= 3.035 \left[ \frac{\text{kg vapor}}{\text{kg maíz}} \right] \end{aligned}$$

$$\text{Rendimiento marmita frijol} = \frac{(80 [\text{litros}])(0.70)}{2.5 \left[ \frac{\text{litros}}{\text{kg maíz}} \right]} = 22.4 \text{ kg de frijol} \quad 3.19$$

$$\begin{aligned} \text{Vapor cocción de frijol} &= \left( 25 \left[ \frac{\text{kg vapor}}{\text{hora}} \right] \right) \left( 4 \left[ \frac{\text{horas}}{\text{ciclo}} \right] \right) \left( \frac{1}{22.4} \left[ \frac{\text{ciclo}}{\text{kg frijol}} \right] \right) = \quad 3.20 \\ &= 4.46 \left[ \frac{\text{kg vapor}}{\text{kg frijol}} \right] \end{aligned}$$

Para producir harina de maíz nixtamalizada, es necesario deshidratar el agua que absorbió el grano durante la nixtamalización, próxima al 30% de su peso inicial, el tiempo que tarda en deshidratar el grano, según [41], coincide con la duración de 2 horas tiempo en el que el grano de maíz pierde la mayor cantidad de humedad, sin embargo este valor es relativo ya que este está en función de la eficiencia del intercambiador de calor, el horno deshidratador, la temperatura del aire, su grado de humedad, la temperatura de la fuente de calor entre otras variables, es por



ello que para cuantificar el consumo de energía asociado a la deshidratación, se considera que el horno trabajará durante las doce horas de operación de la planta, para así poder calcular la demanda de vapor por hora.

Para determinar el consumo de vapor en el proceso de deshidratación, es necesario determinar la cantidad de energía que se requiere para la deshidratación y así determinar el vapor que se demanda para suministrar esa energía.

La energía necesaria para la deshidratación es de 775 kJ/kg de maíz, este valor se calcula sumando la energía asociada al calor latente P1-P2 y al calor sensible P2-P3, véase figura 3.5.

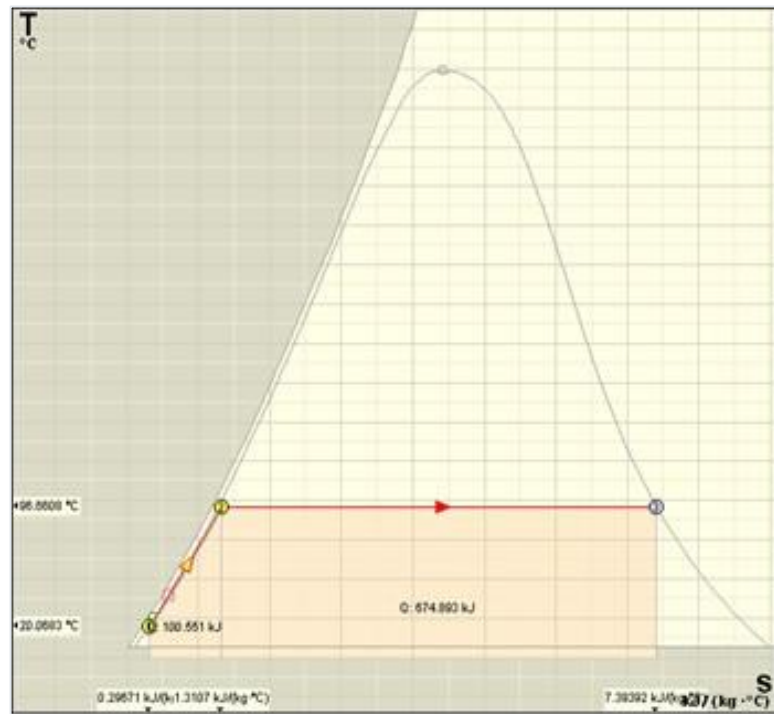


Figura 3.6. Curva de entalpia del agua y consumo de energía

Fuente: Elaboración Propia

$$Q_{\text{deshidratación}} = (Q_s + Q_l)(\text{masa}) = \left( (335.08 + 2249) \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg H}_2\text{O}} \right] \right) \left[ \frac{0.3 \text{ kg H}_2\text{O}}{1 \text{ kg maíz}} \right] = \quad 3.21$$

$$= 775 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg maíz}} \right]$$

$$Q_s = (419.09 - 83.92) \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg H}_2\text{O}} \right] = 335.08 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg H}_2\text{O}} \right] \quad 3.22$$

$$Q_l = h_{x1} - h_{x0} = (419.09 - 2669) \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg H}_2\text{O}} \right] = 2249 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg H}_2\text{O}} \right] \quad 3.23$$

Calculando la cantidad de vapor necesario para el proceso de deshidratación, tanto para el maíz y el frijol.

$$Masa\ aire = \frac{(m\ aire)(Cp)(\Delta T)}{n} \quad 3.24$$

$$775 \left[ \frac{kJ}{kg\ maíz} \right] = \frac{(m\ aire)(1.0052)(29)}{0.8};$$

$$m\ aire = \frac{(775) \left[ \frac{kJ}{kg\ maíz} \right] (0.8)}{(1.0052)(29) \left[ \frac{kJ}{kg\ aire} \right]} =$$

$$= \frac{(620) \left[ \frac{kJ}{kg\ maíz} \right]}{(29.15) \left[ \frac{kJ}{kg\ aire} \right]} = 21.27 \left[ \frac{kg\ aire}{kg\ maíz} \right]$$

$$M_{vapor} = \frac{(m\ aire)(Cp)(\Delta T)(n)}{\Delta h} =$$

$$= \frac{\left( 21.27 \left[ \frac{kg\ aire}{kg\ maíz} \right] \right) \left( 1.0052 \left[ \frac{kJ}{kg\ aire\ k} \right] \right) (29 [K])(0.88)}{(2501 - 83.92) \left[ \frac{kJ}{kg\ vapor} \right]} = \frac{545.63 \left[ \frac{kJ}{kg\ maíz} \right]}{2417.08 \left[ \frac{kJ}{kg\ vapor} \right]} =$$

$$= 0.2257 \left[ \frac{kg\ vapor}{kg\ maíz} \right] = 0.2257 \left[ \frac{kg\ vapor}{kg\ frijol} \right] \quad 3.25$$

Existen 2 fuentes de vapor aprovechable en la planta de gasificación, con un promedio de 715 kilogramos de vapor por hora, para utilizar en los procesos industriales de cogeneración.

Tabla 3.5 Fuentes de vapor del sistema.

Fuentes de vapor			
nodo	Temperatura [°C]	Gasto [kg/s]	Entalpia [kJ/kg]
97	158.8	0.0696	2755.3
77	158.8	0.129	2755.3

Fuente: Elaboración Propia

Para determinar las capacidades de producción del proceso industrial con 714.96 kg/h de vapor disponible, solo se considerará el rendimiento estimado del cultivo energético de LMS, de 76.44 toneladas de rastrojo maíz y de 20.16 toneladas de rastrojo frijol al año respectivamente, en la Figura 3.6 se muestra un esquema de consumo de vapor, en el que se puede observar que los 3 procesos se ejecutan en paralelo durante las doce horas que opera la planta, considerando la disponibilidad del vapor y de la materia prima (maíz y frijol).

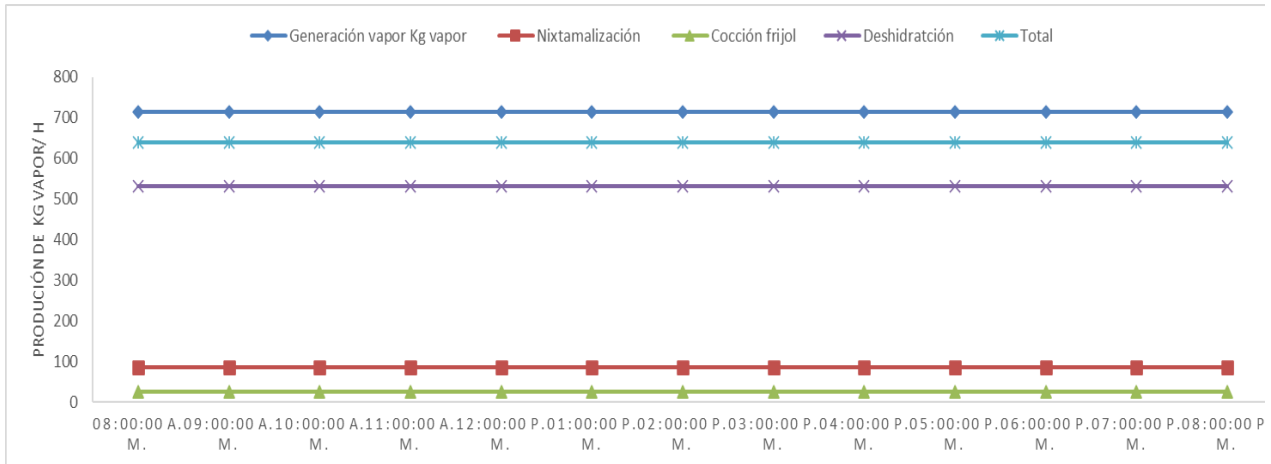


Figura 3.7 Producción y consumo de vapor  
Fuente: Elaboración Propia

Sabiendo que el factor limitante en la productividad de la planta es el suministro de vapor (715 kg/h), se determinó que la planta puede producir 51.66 kg de maíz por ciclo de dos horas de trabajo y de 27.23 kg de frijol en un ciclo de 4 horas.

$$\text{producción de harina de maíz} = \frac{\text{Rendimiento del cultivo}}{\text{semanas de trabajo}} = 3.26$$

$$= \frac{76440 \left[ \frac{\text{kg maíz}}{\text{año}} \right]}{35.25 \left[ \frac{\text{semanas}}{\text{año}} \right]} \left( \frac{1}{7} \left[ \frac{\text{semana}}{\text{días laboral}} \right] \right) = 309.78 \frac{\text{kg maíz}}{\text{día laboral}}$$

$$= \left( 310 \left[ \frac{\text{kg maíz}}{\text{día laboral}} \right] \right) \left( \left[ \frac{\text{día laboral}}{12 \text{ horas}} \right] \right) \left( 2 \left[ \frac{\text{horas}}{\text{ciclo de trabajo}} \right] \right) = 51.6 \left[ \frac{\text{kg de maíz}}{\text{ciclo trabajo}} \right]$$

$$\text{producción de harina de frijol} = \frac{\text{Rendimiento del cultivo}}{\text{semanas de trabajo}} = 3.27$$

$$= \frac{20\,160 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{año}} \right]}{35.25 \left[ \frac{\text{semanas}}{\text{año}} \right]} \left( \frac{1}{7} \left[ \frac{\text{semana}}{\text{días laboral}} \right] \right) = 81.7 \frac{\text{kg frijol}}{\text{día laboral}}$$

$$= \left( 81.7 \left[ \frac{\text{kg frijol}}{\text{día laboral}} \right] \right) \left( \frac{1}{12} \left[ \frac{\text{día laboral}}{\text{horas}} \right] \right) \left( 4 \left[ \frac{\text{horas}}{\text{ciclo de trabajo}} \right] \right) =$$

$$= 27.23 \left[ \frac{\text{kg de frijol}}{\text{ciclo}} \right]$$

### 3.8 Conclusiones capítulo 3

Cuando hablamos de diseño de la planta de cogeneración, nos referimos al dimensionamiento de los parámetros técnicos, que requiere el software especializado de diseño, este se encarga de resolver todas las ecuaciones asociadas al proceso de gasificación, determinando datos necesarios para su implementación, lo que agiliza y reduce el trabajo. De otro modo no sería posible incorporar nuevas variables al sistema de gasificación, situación que a su vez impulsa el avance de la ciencia.

Una vez caracterizada la planta, junto con los procesos asociados se observa cómo se implementa los principios de economía circular y sustentabilidad, al ser un proceso específico derivado de una biomasa producida con ese propósito

## Capítulo 4. Análisis económico y financiero

### 4.1 Introducción

Para el análisis de la viabilidad económica de la planta, se realizará una revisión de los principales indicadores de rentabilidad.

Se identificarán los principales factores que impactan la rentabilidad del proyecto. Como el modelo de comercialización de la energía eléctrica producida, en este caso, ya sea por medio de facturación neta o Net Billing y medición neta o Net Metering, y el segundo es el de entrega a la red a precio PML. Otro factor clave es el costo del combustible, es decir los residuos del cultivo del maíz y frijol que se produce en el cultivo energético. Considerando estos dos factores, se puede establecer dos modelos de negocio o comercialización de la energía eléctrica, evaluados en dos escenarios de rendimiento económico del proyecto.

Se analizan 2 casos en los que se varía el modelo de interconexión y el costo de combustibles,

Para determinar la viabilidad del proyecto, se consideran los indicadores de rentabilidad siguientes, Valor Presente Neto, Relación Costo Beneficio, Tasa Interna de Retorno (TIR), Tasa Interna de Retorno Modificada (TIRM) y por último Período de Recuperación [44], además del análisis del costo del combustible y modelo de interconexión, nos permitirá establecer un modelo de negocio.

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

VPN>0 el proyecto es viable  
VPN=0 es indiferente realizar el proyecto  
VPN>1 se recomienda realizar el proyecto

Relación Costo Beneficio, 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:

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:

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

La 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.

El PR mide el tiempo que le tomará al proyecto generar el dinero que se invirtió en él [42].

## 4.2 Análisis económico y financiero incluyendo ingresos por energía, CELs y energía térmica

La planta de cogeneración puede ingresar dinero por tres productos para la comercialización, el primero de ellos es la inyección de energía eléctrica a la red, el segundo ingreso, es por Certificados de Energía Limpia (CEL) y por último la comercialización del vapor y agua caliente generados.

Por otro lado, existen 3 tipos de costos para la planta de cogeneración. El primero de ellos es la inversión inicial, que es la relacionada, con las instalaciones, adquisición de equipo y maquinaria.

Los costos fijos, son aquellos asociados a la operación y mantenimiento de la planta; Los costos variables son aquellos que podrían presentarse o se presenta de manera esporádica por ejemplo adquisición de refacciones y por combustible, siendo este de gran importancia, al ser el eslabón que relaciona el sector energético con el agrícola, de los costos descritos.

### 4.2.1 Ingresos por energía térmica

Esta parte requiere la integración en una parte de la comunidad de una instalación que procese las materias primas producidas en la comunidad, para agregarles valor comercial vía un proceso industrial, es decir producir, harinas, nixtamal, y deshidratar producto, que serán comercializados fuera de la comunidad. Este nuevo proceso o vocación comercial de la comunidad podrá disponer de la siguiente cantidad de vapor y agua caliente proveniente de la planta de cogeneración (sección 3.7 Usos del calor resultante), y su capacidad de producción de harinas, nixtamal se determinó en función de la energía térmica disponible y verificando que los excedentes agrícolas en cantidad estén disponibles y permitan procesarlos con la energía recuperada.

Para determinar los ingresos por energía térmica, es necesario determinar el valor del MWh térmico al que se comercializaría y se considera como si el calor generado fuera realizado por una caldera convencional (eficiencia de 78%) que está en función del combustible gas natural.

$$\text{Costo } MWht = \text{Tipo de cambio} \left[ \frac{\text{precio en dólar de la energía caldera}}{\text{eficiencia de la caldera}} \right] = \quad 4.1$$

$$\text{Valor } MWht = \left( 19.42 \left[ \frac{\$}{\text{usd}} \right] \right) \left( \frac{1.76 \left[ \frac{\text{usd}}{MWh} \right]}{0.78} \right) = 43.81 \left[ \frac{\$}{MWh} \right]$$

$$\begin{aligned} & \text{Ingresos energía térmica} = \\ & = \text{Valor del MWht}(\text{potencia térmica})(\text{poder calorífico inferior})(\text{factor de planta}) \end{aligned} \quad 4.2$$

$$\begin{aligned} \text{Ingresos energía térmica} &= \left( 43.81 \left[ \frac{\$}{\text{MWht}} \right] \right) (0.5245 [\text{MW}]) \left( 8760 \left[ \frac{\text{h}}{\text{año}} \right] \right) (0.338) = \\ &= 68036.1 \left[ \frac{\$}{\text{año}} \right] \end{aligned}$$

#### 4.3 Costos de inversión inicial

De referencias como IRENA y estimaciones de centrales de cogeneración como la propuesta y con gasificador comercial de origen chino, se puede calcular la inversión necesaria para las instalaciones, en función de la capacidad de generación de la planta con gasificación, para nuestro caso es de 1500 USD/kWe, considerando los 525 kW de potencia de placa, las instalaciones, equipo y maquinaria, etc., tendría un valor de 787 500 USD.

Para determinar los costos de inversión se considera 19.42 \$/USD, lo que representa una inversión de \$ 15.29 millones de pesos, sin embargo, en un escenario bajo de inversión podría ser una inversión inicial de \$ 13.88 millones de pesos, porque IRENA refleja costos de instalación, mano de obra de Europa que no se corresponden con otras regiones del mundo.

#### 4.4 Ingresos por CELS

Aquellas tecnologías que se consideran limpias, según lo definido por el artículo 3, fracción XXII de la LIE, tienen derecho a recibir un certificado de energía limpia (CEL) por cada MWh generado [45]. El costo de un CEL celebrada en la subasta del 2017 fue de 20.7 USD/ CEL, con un tipo de cambio de 19.42 \$/USD.

#### 4.5 Costos de operación y mantenimiento

Estos se pueden dividir en variables y fijos y al igual que la inversión inicial se determinaron según valores establecidos en la tabla 4.1

Tabla 4.1 Costos de inversión y operación

Costos de inversión 525 kW		
COSTO FIJO O&M	10.8	USD/kW
COSTO VARIABLE O&M	0.0033	USD/kWh

#### 4.6 Caso 1 Energía eléctrica PML y Precio de mercado para los residuos de biomasa

Para este escenario se considera un ingreso por energía eléctrica a un precio de PML, un ingreso por CELS a 401.99 pesos por CEL, con costo de combustible de 0.90 [\$/kg] de rastrojo, que es el precio en el mercado, bajo un modelo de interconexión de entrega a la red a PML y siguiente escenario de precios.

Tabla 4.2: Escenario de precios PML y residuos

AÑO	Precio PML Huatla de Jimenez	precio de residuo [\$/]
2022	\$ 787	0.90
2023	\$ 818	0.92
2024	\$ 851	0.94
2025	\$ 885	0.96
2026	\$ 921	0.97
2027	\$ 958	0.99
2028	\$ 996	1.01
2029	\$ 1,036	1.03
2030	\$ 1,077	1.05
2031	\$ 1,120	1.08
2032	\$ 1,165	1.1
2033	\$ 1,212	1.2
2034	\$ 1,260	1.4
2035	\$ 1,310	1.6
2036	\$ 1,363	1.19
2037	\$ 1,417	1.21
2038	\$ 1,474	1.24
2039	\$ 1,533	1.26
2040	\$ 1,594	1.29
2041	\$ 1,658	1.31



4.3 Resumen financiero esquema de comercialización PML, proyección a 20 años considerando una inflación del 4%

Resultado de la operación de la planta de cogeneración en la comunidad Plan de Escobas a PML y residuos a precio de mercado										
año	energía a la venta MWhe CHP	CELs a la venta CHP	Consumo de residuos [ton]	Ingresos anuales CHP A PML	Ingresos por CELs CHP	Ingresos por Energía térmica	Costo sustituto de combustible \$	Costos O&M Fijos 10.80	Costos O&M Variables 0.0033	RESULTADO NETO ANUAL
2022	1,518.1	1518.1	995.81	\$ 1,366,304	\$ 610,273	\$ 145,383.5	\$ 896,231	\$ 110,111	\$ 99,812	\$ 1,015,808
2023	1,517.4	1517.4	995.31	\$ 1,420,246	\$ 634,367	\$ 145,310.8	\$ 913,698	\$ 110,111	\$ 99,762	\$ 1,076,353
2024	1,516.6	1516.6	994.82	\$ 1,476,317	\$ 659,412	\$ 145,238.2	\$ 931,506	\$ 110,111	\$ 99,712	\$ 1,139,638
2025	1,515.8	1515.8	994.32	\$ 1,534,602	\$ 685,445	\$ 145,165.6	\$ 949,661	\$ 110,111	\$ 99,662	\$ 1,205,779
2026	1,515.1	1515.1	993.82	\$ 1,595,188	\$ 712,507	\$ 145,093.0	\$ 968,170	\$ 110,111	\$ 99,612	\$ 1,274,895
2027	1,514.3	1514.3	993.32	\$ 1,658,166	\$ 740,637	\$ 145,020.4	\$ 987,040	\$ 110,111	\$ 99,562	\$ 1,347,110
2028	1,513.6	1513.6	992.83	\$ 1,723,631	\$ 769,877	\$ 144,947.9	\$ 1,006,277	\$ 110,111	\$ 99,512	\$ 1,422,555
2029	1,512.8	1512.8	992.33	\$ 1,791,680	\$ 800,272	\$ 144,875.4	\$ 1,025,890	\$ 110,111	\$ 99,463	\$ 1,501,363
2030	1,512.1	1512.1	991.84	\$ 1,862,415	\$ 831,866	\$ 144,803.0	\$ 1,045,884	\$ 110,111	\$ 99,413	\$ 1,583,676
2031	1,511.3	1511.3	991.34	\$ 1,935,943	\$ 864,709	\$ 144,730.6	\$ 1,066,268	\$ 110,111	\$ 99,363	\$ 1,669,640
2032	1,510.5	1510.5	990.84	\$ 2,012,375	\$ 898,847	\$ 144,658.2	\$ 1,087,050	\$ 110,111	\$ 99,314	\$ 1,759,405
2033	1,509.8	1509.8	990.35	\$ 2,091,823	\$ 934,334	\$ 144,585.9	\$ 1,108,237	\$ 110,111	\$ 99,264	\$ 1,853,131
2034	1,509.0	1509.0	989.85	\$ 2,174,408	\$ 971,221	\$ 144,513.6	\$ 1,129,836	\$ 110,111	\$ 99,214	\$ 1,950,981
2035	1,508.3	1508.3	989.36	\$ 2,260,254	\$ 1,009,565	\$ 144,441.4	\$ 1,151,857	\$ 110,111	\$ 99,165	\$ 2,053,128
2036	1,507.5	1507.5	988.86	\$ 2,349,489	\$ 1,049,423	\$ 144,369.1	\$ 1,174,306	\$ 110,111	\$ 99,115	\$ 2,159,748
2037	1,506.8	1506.8	988.37	\$ 2,442,247	\$ 1,090,854	\$ 144,297.0	\$ 1,197,194	\$ 110,111	\$ 99,066	\$ 2,271,027
2038	1,506.0	1506.0	987.88	\$ 2,538,666	\$ 1,133,921	\$ 144,224.8	\$ 1,220,527	\$ 110,111	\$ 99,016	\$ 2,387,158
2039	1,505.3	1505.3	987.38	\$ 2,638,893	\$ 1,178,688	\$ 144,152.7	\$ 1,244,315	\$ 110,111	\$ 98,967	\$ 2,508,341
2040	1,504.5	1504.5	986.89	\$ 2,743,076	\$ 1,225,223	\$ 144,080.6	\$ 1,268,567	\$ 110,111	\$ 98,917	\$ 2,634,785
2041	1,503.8	1503.8	986.39	\$ 2,851,373	\$ 1,273,594	\$ 144,008.6	\$ 1,293,291	\$ 110,111	\$ 98,868	\$ 2,766,706

Tabla 4.4 Indicadores de rentabilidad caso 1

Económica			Financiera		
			Tasa interés		9.00%
			Apalancamiento		80.00%
Trema		15%	TREMA		15.00%
VPN en	2022	-\$5,029,453	VPN en	2022	-3,107,534
AE		-\$803,513	AE		-\$496,464
B/C		0.64	B/C		0.05
TIR		9.11%	TIR		8.50%
TIRM		12.44%	TIRM		10.09%
PR simple		10.37	PR simple		13.87

Fuente: Elaboración Propia

Observando el indicador de rentabilidad costo beneficio (B/C), podemos descartar esta opción al ser un proyecto indiferente e inconveniente.

#### 4.7 Caso 2 Medición Neta y Precio de mercado para los residuos de biomasa

Para este escenario se considera un ingreso por energía eléctrica a un precio de venta de energía según la tabla 4.5, a la red eléctrica por Net Billing, un ingreso por CELS a 401.99 pesos por CEL, con costo de combustible de 0.90 \$/kg de rastrojo, que es el precio en el mercado, bajo un modelo de interconexión de entrega generación distribuida Net Billing.

En la tabla 4.6 se presenta un resumen financiero y esquema de comercialización Net billing, con una proyección a 20 años considerando una inflación del 4% , en la tabla 4.7 podemos observar la corrida de dos esquemas de financiamiento según la banca comercial y el financiamiento económico. Y por último en la tabla 4.8 observamos los indicadores de rentabilidad del proyecto.

Tabla 4.5 Escenario de precios Net billing y residuos

AÑO	Precio Net billing	precio de residuo [\$]
2022	\$1,200	0.90
2023	\$1,248	0.92
2024	\$1,298	0.94
2025	\$1,350	0.96
2026	\$1,404	0.97
2027	\$1,460	0.99
2028	\$1,518	1.01
2029	\$1,579	1.03
2030	\$1,642	1.05
2031	\$1,708	1.08
2032	\$1,776	1.1
2033	\$1,847	1.2
2034	\$1,921	1.4
2035	\$1,998	1.6
2036	\$2,078	1.19
2037	\$2,161	1.21
2038	\$2,248	1.24
2039	\$2,337	1.26
2040	\$2,431	1.29
2041	\$2,528	1.31

Tabla 4.6 Resumen financiero esquema de comercialización Net billing, proyección a 20 años considerando una inflación del 4%

Resultado de la operación de la planta de cogeneración en la comunidad Plan de Escobas a Net billing y residuos a precio de mercado										
año	energía a la venta MWhe CHP	CELs a la venta CHP	Consumo de residuos toneladas	Ingresos anuales CHP	Ingresos por CELs CHP	Ingresos por Energía térmica	Costo sustituto de combustible	Costos O&M Fijos	Costos O&M V	RESULTADO NETO ANUAL
				A PML						
2022	1,518.1	1518.1	995.81	\$ 1,821,739	\$ 610,273	\$ 145,383.5	\$ 896,231	\$ 110,111	\$ 99,812	\$ 1,471,242
2023	1,517.4	1517.4	995.31	\$ 1,893,661	\$ 634,367	\$ 145,310.8	\$ 913,698	\$ 110,111	\$ 99,762	\$ 1,549,768
2024	1,516.6	1516.6	994.82	\$ 1,968,423	\$ 659,412	\$ 145,238.2	\$ 931,506	\$ 110,111	\$ 99,712	\$ 1,631,744
2025	1,515.8	1515.8	994.32	\$ 2,046,136	\$ 685,445	\$ 145,165.6	\$ 949,661	\$ 110,111	\$ 99,662	\$ 1,717,313
2026	1,515.1	1515.1	993.82	\$ 2,126,918	\$ 712,507	\$ 145,093.0	\$ 968,170	\$ 110,111	\$ 99,612	\$ 1,806,624
2027	1,514.3	1514.3	993.32	\$ 2,210,889	\$ 740,637	\$ 145,020.4	\$ 987,040	\$ 110,111	\$ 99,562	\$ 1,899,832
2028	1,513.6	1513.6	992.83	\$ 2,298,174	\$ 769,877	\$ 144,947.9	\$ 1,006,277	\$ 110,111	\$ 99,512	\$ 1,997,098
2029	1,512.8	1512.8	992.33	\$ 2,388,906	\$ 800,272	\$ 144,875.4	\$ 1,025,890	\$ 110,111	\$ 99,463	\$ 2,098,590
2030	1,512.1	1512.1	991.84	\$ 2,483,220	\$ 831,866	\$ 144,803.0	\$ 1,045,884	\$ 110,111	\$ 99,413	\$ 2,204,481
2031	1,511.3	1511.3	991.34	\$ 2,581,258	\$ 864,709	\$ 144,730.6	\$ 1,066,268	\$ 110,111	\$ 99,363	\$ 2,314,954
2032	1,510.5	1510.5	990.84	\$ 2,683,166	\$ 898,847	\$ 144,658.2	\$ 1,087,050	\$ 110,111	\$ 99,314	\$ 2,430,197
2033	1,509.8	1509.8	990.35	\$ 2,789,097	\$ 934,334	\$ 144,585.9	\$ 1,108,237	\$ 110,111	\$ 99,264	\$ 2,550,405
2034	1,509.0	1509.0	989.85	\$ 2,899,211	\$ 971,221	\$ 144,513.6	\$ 1,129,836	\$ 110,111	\$ 99,214	\$ 2,675,784
2035	1,508.3	1508.3	989.36	\$ 3,013,672	\$ 1,009,565	\$ 144,441.4	\$ 1,151,857	\$ 110,111	\$ 99,165	\$ 2,806,545
2036	1,507.5	1507.5	988.86	\$ 3,132,652	\$ 1,049,423	\$ 144,369.1	\$ 1,174,306	\$ 110,111	\$ 99,115	\$ 2,942,911
2037	1,506.8	1506.8	988.37	\$ 3,256,329	\$ 1,090,854	\$ 144,297.0	\$ 1,197,194	\$ 110,111	\$ 99,066	\$ 3,085,109
2038	1,506.0	1506.0	987.88	\$ 3,384,889	\$ 1,133,921	\$ 144,224.8	\$ 1,220,527	\$ 110,111	\$ 99,016	\$ 3,233,380
2039	1,505.3	1505.3	987.38	\$ 3,518,524	\$ 1,178,688	\$ 144,152.7	\$ 1,244,315	\$ 110,111	\$ 98,967	\$ 3,387,972
2040	1,504.5	1504.5	986.89	\$ 3,657,435	\$ 1,225,223	\$ 144,080.6	\$ 1,268,567	\$ 110,111	\$ 98,917	\$ 3,549,143
2041	1,503.8	1503.8	986.39	\$ 3,801,831	\$ 1,273,594	\$ 144,008.6	\$ 1,293,291	\$ 110,111	\$ 98,868	\$ 3,717,164

Fuente: Elaboración Propia  
En la tabla 4.7 Corrida financiera Net billing caso 2

Plan de Escobas comunidad										Net Billing	
Planta cogeneración 475 kWe Temporada: última semana de Abril a primera semana de Noviembre											
Escenario de financiamiento banca comercial nacional								Caso base			
Moneda	Económico				Esquema Financiero				0.00%		
AÑO	Resultado neto anual	Inversión inicial	15% Flujo neto	interes 3.00%	Pagos anuales, 10 pagos iguales al Apalancamiento	60%	60% -\$ 8,333,219	9.00% sa banca de fomer	Capital propio \$5,930,474	Resultado neto	FLUJO NETO
BASE			sín pagos F	construcción	Intereses	Amortización	Pago	Saldo		Con pagos F	Con pagos F
-5											
-4					\$249,996.57						
-3					\$ 83,332.19						
-2					\$ 41,666.10						
-1					\$374,994.86						
0					\$ 13,888,699				\$ 8,333,219	-\$5,930,474	
2022	\$ 1,471,242			-\$12,417,456	\$ 1,471,242	\$749,990	\$548,493	\$1,298,483	\$7,784,726	\$ 172,759	-\$5,757,715
2023	\$ 1,549,768			-\$10,867,688	\$ 1,549,768	\$700,625	\$597,858	\$1,298,483	\$7,186,868	\$ 251,285	-\$5,506,430
2024	\$ 1,631,744			-\$9,235,944	\$ 1,631,744	\$646,818	\$651,665	\$1,298,483	\$6,535,203	\$ 333,261	-\$5,173,169
2025	\$ 1,717,313			-\$7,518,631	\$ 1,717,313	\$588,168	\$710,315	\$1,298,483	\$5,824,889	\$ 418,830	-\$4,754,339
2026	\$ 1,806,624			-\$5,712,007	\$ 1,806,624	\$524,240	\$774,243	\$1,298,483	\$5,050,646	\$ 508,141	-\$4,246,198
2027	\$ 1,899,832			-\$3,812,175	\$ 1,899,832	\$454,558	\$843,925	\$1,298,483	\$4,206,721	\$ 601,349	-\$3,644,849
2028	\$ 1,997,098			-\$1,815,077	\$ 1,997,098	\$378,605	\$919,878	\$1,298,483	\$3,286,843	\$ 698,615	-\$2,946,233
2029	\$ 2,098,590			\$283,513	\$ 2,098,590	\$295,816	\$1,002,667	\$1,298,483	\$2,284,176	\$ 800,107	-\$2,146,126
2030	\$ 2,204,481			\$2,487,994	\$ 2,204,481	\$205,576	\$1,092,907	\$1,298,483	\$1,191,269	\$ 905,998	-\$1,240,128
2031	\$ 2,314,954			\$4,802,948	\$ 2,314,954	\$107,214	\$1,191,269	\$1,298,483	\$0	\$ 1,016,471	-\$223,657
2032	\$ 2,430,197			\$7,233,145	\$ 2,430,197		\$8,333,219			\$ 2,430,197	\$2,206,540
2033	\$ 2,550,405			\$9,783,550	\$ 2,550,405					\$ 2,550,405	\$4,756,945
2034	\$ 2,675,784			\$12,459,334	\$ 2,675,784					\$ 2,675,784	\$7,432,729
2035	\$ 2,806,545			\$15,265,879	\$ 2,806,545					\$ 2,806,545	\$10,239,274
2036	\$ 2,942,911			\$18,208,790	\$ 2,942,911					\$ 2,942,911	\$13,182,185
2037	\$ 3,085,109			\$21,293,899	\$ 3,085,109					\$ 3,085,109	\$16,267,294
2038	\$ 3,233,380			\$24,527,279	\$ 3,233,380					\$ 3,233,380	\$19,500,674
2039	\$ 3,387,972			\$27,915,251	\$ 3,387,972					\$ 3,387,972	\$22,888,645
2040	\$ 3,549,143			\$31,464,394	\$ 3,549,143					\$ 3,549,143	\$26,437,789
2041	\$ 3,717,164			\$35,181,558	\$ 3,717,164					\$ 3,717,164	\$30,154,952
VPN	\$12,433,882								VPN	\$5,917,097	-\$6,455,260

Tabla 4.8 Indicadores de rentabilidad caso 2

Económica		Financiera	
		Tasa interés	9.00%
		Apalancamiento	60.00%
<b>Trema</b>	<b>15%</b>	<b>TREMA</b>	<b>15.00%</b>
<b>VPN en 0</b>	<b>-\$1,177,044</b>	<b>VPN en 2022</b>	<b>264,394</b>
<b>AE</b>	<b>-\$188,046</b>	<b>AE</b>	<b>\$42,240</b>
<b>B/C</b>	<b>0.92</b>	<b>B/C</b>	<b>1.04</b>
<b>TIR</b>	<b>13.70%</b>	<b>TIR</b>	<b>15.46%</b>
<b>TIRM</b>	<b>14.49%</b>	<b>TIRM</b>	<b>15.25%</b>
<b>PR simple</b>	<b>6.71</b>	<b>PR simple</b>	<b>9.91</b>

Fuente: Elaboración Propia

Analizando los indicadores de rentabilidad costo beneficio (B/C), concluimos que este es el esquema de interconexión viable para la realización del proyecto, de los dos modelos financieros, el financiamiento económico sería atractivo si se redujera el costo del combustible, por otro lado, el modelo económico financiero cumple los parámetros de viabilidad, así como una opción sustentable haciendo uso de las ventajas del apalancamiento financiero.

#### 4.8 Conclusiones capítulo 4

El proyecto evaluado es sensible al precio de la electricidad, y sin duda requiere de los esquemas de incentivos existentes en el país, como este que permite la venta de la electricidad a precios de tarifa eléctrica de usuario final, porque el otro esquema de PML que contempla un precio de venta a CFE para su posterior reventa en el mercado eléctrico, ofrece menos ingresos al proyecto.

Otra área de oportunidad para mejorar sus ingresos se considera al establecer un precio menor para el costo del residuo de la biomasa, dado que es la misma comunidad quien abastece el residuo, y la ventaja económica se vería en la etapa de gasificación y no en la etapa de producción de harinas, con un margen de reducción posible de hasta \$0.56 pesos por kilogramos de residuo dado que el proyecto de cogeneración se vincula con la misma comunidad.

## Capítulo 5 Impacto social y ambiental.

### 5.1 Introducción

Predecir los efectos que tendría implementar un proyecto de esta índole en ámbito social y ambiental, excede una vez más los alcances de este proyecto, por lo que solo se acentuarán pautas de los posibles fenómenos, permitiendo únicamente concluir si los efectos son beneficiosos o no.

Para determinar los impactos ambientales reales de la planta, se requeriría un análisis de ciclo de vida, que es una metodología que permite la identificación, medición y evaluación de los impactos potenciales asociados a un producto o servicio durante todo su ciclo de vida, desde la obtención de materias primas, hasta su disposición final. Esta metodología se encuentra estandarizada bajo las normas ISO 1004 e ISO 14044.

En la Figura 5.1 se muestra el esquema por secciones de la planta, éstas las desarrollaremos en un esfuerzo de realizar un balance de los posibles beneficios sociales y ambientales de cada etapa para marcar pautas, sin embargo el balance por etapas no sería una fiel conclusión de conveniencia o no, por ejemplo en la etapa del cultivo energético hay una gran cantidad de absorción de CO<sub>2</sub> que será liberada en su mayoría en la etapa de gasificación, caracterizando como positivo al cultivo energético y negativo a la gasificación, siendo esto solo dos etapas de un modelo integral.



Figura 5.1 Áreas de impacto y desarrollo.

Fuente: Elaboración Propia

## 5.2 Impacto en la comunidad

El impacto por excelencia en la comunidad es la creación de empleos, esto permite a los hogares de bajos recursos superar la pobreza, el empleo productivo y decente es la vía hacia el crecimiento y la diversificación de las economías [43].

Si bien los empleos generados en su mayoría son de salario mínimo, cumplen con las condiciones, para categorizarlos como empleos formales, estos proporcionan a las personas medios para combatir la pobreza, como se muestra en el artículo “Salario mínimo y pobreza: un análisis de corte transversal para países en desarrollo” [44]

Para todos los países, cualquiera que sea su nivel de desarrollo, la base para impulsar la prosperidad, la inclusión y la cohesión social de manera sostenible y creciente es contar con una oferta suficiente de empleos [43].

Existen múltiples metodologías para calcular el número de empleos directos e indirectos que se generan por una acción, algunas referencias indican que por cada empleo formal se generan dos indirectos y otros dicen que 5 dependiendo del salario, duración del empleo, sueldo, derrama económica, etc, como una buena aproximación reservada se considerará que cada empleo directo genera 3 indirectos.

El total de la plantilla de la planta es de 30 elementos en sus diferentes secciones, generando un total de 120 empleos entre directos e indirectos, representando una oferta laboral para la comunidad del 53% de toda su población.

$$\begin{aligned} \text{Empleos generados} &= \\ &= \text{plantilla laboral (plantilla laboral[relación de empleos indirectos])} = & 5.1 \\ & 30 + ((30)(2)) = 120 \text{ empleos} \end{aligned}$$

$$\text{Oferta laboral en la comunidad} = \frac{\text{empleos generados}}{\text{población productiva}} = \frac{120}{224} = 53\% \quad 5.2$$

## 5.3 Fenómenos ambientales del cultivo energético

El CO<sub>2</sub> que absorbe el maíz y asimila en sus estructuras, lo liberará al momento de la gasificación, teniendo como un balance global de emisiones de CO<sub>2</sub> prácticamente 0, es por esto que lo llaman fuentes de combustible renovables, sin embargo, las virtudes de este proyecto nos permiten preguntarnos si la planta en su conjunto podría funcionar como sumidero de CO<sub>2</sub>.

La referencia [45] nos indica que por cada 17 toneladas de biomasa se absorberán 25 toneladas de CO<sub>2</sub>, liberando 17 toneladas de oxígeno, demandando 7 toneladas de agua, de lo que se concluye que el cultivo energético absorbe 3 557 toneladas de CO<sub>2</sub> al año, considerando el plan de emisiones de CO<sub>2</sub> de la simulación, indica una emisión de 4 279 toneladas de CO<sub>2</sub> al año de la planta. Se tiene un déficit de 721 ton de CO<sub>2</sub>, permitiendo una duda razonable, pensar que el rastrojo de frijol absorbe mayor cantidad de CO<sub>2</sub> que el maíz lo que implica asociar que ese déficit

pertenece a la absorción real del frijol y no una ponderación de datos de maíz, sin embargo, se requiere mayor investigación.

Ecuación de la vida y el maíz

$$1[\text{ha maíz}] + 25 [\text{ton CO}_2] + 7[\text{ton H}_2\text{O}] = 17[\text{ton biomasa}] + 17[\text{ton O}_2]$$

$$\begin{aligned} \text{CO}_2 \text{ Absorvido} &= (\text{biomasa producida})(\text{relación biomasa CO}_2) = & 5.3 \\ &= (996 \text{ ton}) \left(\frac{25}{7}\right) = 3557 [\text{ton CO}_2 \text{ absorvido}] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{CO}_2 \text{ secuestrado} &= \text{CO}_2 \text{ absorvido del cultivo} - \text{el liberado} = & 5.4 \\ &= 3557 \text{ ton} - 4279 \text{ ton} = -721 \text{ ton} \end{aligned}$$

Por otro lado, la mayoría de las personas no dimensionan, el volumen de los residuos orgánicos y lo que significa botar a la basura restos de frutas o verduras, pues asumen que ésta, se descompone de forma natural, sin embargo, el proceso de degradación anaeróbica en los rellenos sanitarios produce la emisión de Gases de Efecto Invernadero, altamente contaminantes para el medio ambiente, elementos que se reducirán al producir el sustrato y utilizarlo en el sitio.

#### 5.4 Impacto de la etapa de gasificación

Como se mencionó anteriormente el plan de emisión de gases de efecto invernadero haciende a 4 279 ton de CO<sub>2</sub> por año, generando un factor de emisión de la planta de 1.54 ton de CO<sub>2</sub> por MWh, si comparamos este valor con el del sistema eléctrico nacional de 0.494 toneladas por MWh [46], nos damos cuenta que la planta tiene un grado de emisiones considerables, pero contamina menos que la generación del SEN, ya que la fuente del combustible es una fuente renovable.

Existe otro elemento de gran importancia para la planta, ésta genera 47 ton de ceniza al año que serán incorporadas al suelo a través del compostaje de residuos. Sin embargo, el impacto ambiental de mayor interés radica en los efectos que tendría el sistema nacional de implementar plantas de esta índole, cuyo efecto sería la reducción del factor de emisión del sistema eléctrico nacional.

#### 5.5 Conclusiones capítulo 5

Los impactos climáticos que hay sobre los cultivos son de gran interés. Si se pretende utilizar el desecho de estos, es necesario ser conscientes de la problemática que representa los efectos de los gases invernaderos en el cambio climático, ya que este impacta directamente, a la agricultura comprometiendo la productividad, por ello debemos prestar más atención a las acciones que permitan hacer frente a escenarios de esta índole, promoviendo la resiliencia de este sector, lo que se reflejará en aspectos sociales, económicos ambientales, etc.

## 6 Conclusiones Generales

Los resultados del presente trabajo permiten proponer una planta de gasificación (de lecho fluido burbujeante, bajo el esquema de cogeneración, en el modelo de interconexión de facturación neta), con una innovación técnica, que coordina una implementación tecnológica entre su cultivo energético, utilizando la tecnología de La Milpa Sustentable con un proceso industrial de producción de harinas de maíz y frijol.

El desarrollo de nuevas formas de aprovechar los recursos renovables cobra gran importancia hoy en día, derivado de las experiencias prácticas de desarrollo y construcción de sistemas renovables, que en los últimos 10 años, han mostrado la necesidad de recibir incentivos para mejorar su rentabilidad económica, estos incentivos han permitido el desarrollo de estos sistemas a nivel internacional y local, sin embargo no en los niveles requeridos para poder ocuparlos como se pensaba, incumpliendo las expectativas como alternativa al uso de energías fósiles.

Las recientes crisis energéticas en Europa han mostrado y confirmado la falta de capacidad de las energías renovables, pero no solo en cantidad suficiente, sino también en competitividad. Para lograr más proyectos que no estén basados en los incentivos y las ayudas económicas, que son al final una falsa ilusión de competitividad con respecto a las fuentes fósiles.

En el caso de México tal situación no es ajena, por ejemplo las crisis o fallos de suministro eléctrico que se presentaron en México en el periodo de diciembre a enero de 2021 atribuidas a desbalances en los parámetros de operación de las redes eléctricas de transmisión por efectos dominó de salida de potencia de plantas renovables, mostró otro aspecto no deseado de las fuentes renovables, que se suma a la necesidad de estar ofreciendo incentivos económicos vía las CELs, o esquemas de venta de energía, o eliminación de los costos de uso de la red eléctrica y uso de bancos de energía para ayudar a su viabilidad, son situaciones y problemas que no se pueden mantener en el tiempo, porque tarde o temprano tales medidas impuestas desde el diseño del marco legal terminan afectando a usuarios, a la empresa estatal de electricidad, o creando asimetrías en la competencia entre industrias o entes económicos, que se ven unos más favorecidos que otros, van creando problemas y falta de certeza en el marco legal y por ende en el ambiente de negocio en el sector energético.

Estas situaciones tienen efectos positivos y negativos en los proyectos de energías renovables y limpias en pequeña escala, unos para bien y otros no, por ejemplo en el planteamiento de esta tesis, se identificaba claramente la necesidad u oportunidad de dar un mejor uso a los recursos energéticos de la biomasa que pueden ser producidos en procesos productivos de comunidades o regiones rurales del país, tal es el caso de dar un uso alternativo a los residuos agrícolas, que incrementen su valor, como sería, convertir en energía eléctrica, en vez de abono o procesarlos con sistemas energéticos de baja eficiencia, tal es el caso de la incineración. Es aquí donde la propuesta del sistema de cogeneración cubre esta alternativa para el uso de la biomasa y a la vez hace uso de las disposiciones o incentivos existentes en la ley, como sería el Net Metering o Net Billings en complemento con la regulación de generación distribuida.



Este trabajo y sus resultados mostraron que el uso de estas disposiciones existentes en el marco legal ofrecen y fortalecen las posibilidades económicas de los sistemas de cogeneración en pequeña escala, como lo muestran los resultados económicos de la evaluación técnica y económica de la propuesta realizada, pero esto implica la introducción de dos técnicas en complemento para hacer viable y muy atractivo el proyecto, estos son la incorporación de La Milpa Sustentable para incrementar la cantidad y disponibilidad de residuos producidos y la cogeneración para aprovechar y dar mejores usos energéticos a los residuos.

Técnicamente la planta de gasificación con su respectivo proceso de cogeneración y cultivo energético son posibles y rentables además de ser deseables, sin embargo, para poder realizarla es necesario mejorar aspectos de logística, capacitación y cambios en la forma de trabajar la tierra y de dar valor agregado a los productos de la agricultura, al tener que realizar actividades de procesamiento y no solo venta de granos. Esto sin duda requiere modificaciones en la forma de pensar y de organización de las comunidades rurales en México y en específico en Oaxaca.

Los resultados obtenidos muestran que es factible y viable profundizar en los estudios para tener datos más precisos, dentro de las consideraciones técnicas y económicas planteadas para este trabajo, por ejemplo, se utilizó el poder calorífico inferior de la mezcla de rastrojo de maíz, y de frijol, se realizó una consideración conservadora de la productividad del cultivo, entre otros.

Esto en general permitió establecer las dimensiones requeridas para cultivar el maíz y frijol adicionales para complementar el cultivo tradicional y obtener los flujos de biomasa requeridos por el sistema de gasificación y con él poder abastecer la capacidad propuesta del sistema de cogeneración.

También se pudo plantear para tener más viabilidad la necesidad de poder dar uso a la energía térmica producida y para esto se propuso que la comunidad no solo venda sus granos, sino que los procese y agregue valor, ayudando la cogeneración a la diversificación de los productos de la comunidad.

Desde la perspectiva de la cogeneración con gasificación los tres productos para la comercialización, como la inyección de energía eléctrica a la red según la tarifa, el ingreso por Certificados de Energía Limpia (CEL) y la comercialización del calor generado son el gran factor económico que permite la viabilidad de la cogeneración en este sistema. El método y valor de la venta de energía térmica requiere de un estudio más profundo para dar mayor certeza en sus cálculos, dado que es el factor clave en la rentabilidad del proyecto.

Para los ingresos anuales alcanzables por Cel con base en 20.7 dólares, se requiere que se mantenga el precio e incluso el estímulo en la ley, además para el costo de combustible de 0.90 \$/kg de rastrojo, que es el precio en el mercado, que este se mantenga o incluso podría subir sin afectar al proyecto. El modelo de interconexión de medición neta o Net Metering igual son muy relevantes para el proyecto por lo cual se requiere que se mantengan, pero podrían variar la forma de pago e incluso el valor de la energía entregada, el proyecto es robusto para soportar estos cambios a la baja.

Por el lado ambiental, en la etapa del cultivo energético hay una gran cantidad de retención de CO<sub>2</sub>, que después será liberada en su mayoría en la etapa de gasificación, dando un balance neutro. Por el lado social, en la comunidad se crean empleos, que, si bien son de salario mínimo en su mayoría, cumplen con las condiciones, para categorizarlos como empleos formales, estos proporcionan a la gente medios para ayudar a combatir la pobreza.

Pero como se mencionó las posibilidades de implementación de este tipo de proyectos requieren de cambios en la forma de actuar y visualizar los proyectos en las comunidades que no corresponden a sus visiones tradicionales; formas de cultivar y procesar sus productos agrícolas e incluso estilos de vida .

## VI. Índice de figuras

- Figura 1.1: Medición de pobreza 2008- 2018.
- Figura 1.2: IDH Mundial en 2015 de 0.717.
- Figura 1.3: Relación entre el consumo de energía y el índice desarrollo humano.
- Figura 1.4: Huella ecológica y bio-capacidad global per-cápita 1961-2014.
- Figura 1.5: IDH promedio mundial 1980-2010.
- Figura 1.6: Capacidad Instalada de Energía eléctrica limpia frente a la convencional.
- Figura 1.7: Procesos termoquímicos de conversión
- Figura 1.8: Gasificador tipo “up draft”.
- Figura 1.9: Gasificadores tipo “down draft”, “Throated”
- Figura 1.10: Gasificadores tipo “down draft”, “throatless”
- Figura 1.11: Gasificador tipo “cross draft”
- Figura 1.12: Gasificador de lecho fluido burbujeante.
- Figura 1.13: Gasificador de lecho fluido circulante.
- Figura 1.14: Contacto sólido-gas en un gasificador de corriente de arrastre.
- Figura 1.15: Gasificador de corriente de arrastre con alimentación superior.
- Figura 1.16. Gasificador compacto “UNIQUE”.
- Figura 1.17: Esquema de un gasificador tipo “Viking”.
- Figura 1.18: Sistema gasificador con una cámara de combustión y otra de gasificación.
- Figura 1.19: Esquema de un gasificador de plasma.
- Figura: 2.1: Fenología del maíz
- Figura 2.2: Crecimiento y desarrollo del maíz
- Figura 2.3: Cultivo La Milpa Sustentable, en diferentes estados de desarrollo.
- Figura 2.4: Centro de la comunidad Plan de Escobas
- Figura 2.5: Geolocalización
- Figura 2.6: Terrenos de cultivo cercanos a la comunidad.
- Figura 2.7: Relación porcentaje de materia seca del maíz.
- Figura 2.8: Distribución de lluvia en Oaxaca del año 2020.
- Figura 3.1: Gasificador
- Figura 3.2: Acondicionamiento del combustible
- Figura 3.3: Generación de energía eléctrica.
- Figura 3.4 Sistema de cogeneración
- Figura 3.5: Disponibilidad de combustible.
- Figura 3.6: Curva entropía del agua y consumo de energía.
- Figura 3.7: Producción y consumo de vapor
- Figura 5.1: Áreas de impacto y desarrollo.

## VII. Índice de tablas

- Tabla 1.1: Potencial de generación de energías renovables.
- Tabla 1.2: Tecnologías para la generación de energía eléctrica.
- Tabla 1.3: Esquemas de interconexión para Centrales Eléctricas con capacidad menor a 0.5 MW.
- Tabla 2.1: Localización.
- Tabla 2.2: Datos climatológicos.
- Tabla 2.3: Población.
- Tabla 2.4: Abastos de alimentos.
- Tabla 2.5: Disponibilidad de servicios
- Tabla 2.6: Ajuste de materia seca, por concepto de mazorca.
- Tabla 2.7: Composición porcentual de las partes de la planta de maíz en base seca.
- Tabla 3.1: Condiciones de operación del gasificador.
- Tabla 3.2: Condiciones de operación del sistema de acondicionamiento del combustible.
- Tabla 3.3: Condiciones de operación del sistema de generación de energía eléctrica.
- Tabla 3.4: Condiciones de operación del sistema de cogeneración.
- Tabla 3.5: Fuentes de vapor del sistema.
- Tabla 4.1: Costos de inversión y operación.
- Tabla 4.2: Escenario de precios PML y residuos.
- Tabla 4.3: Resumen financiero esquema de comercialización PML, proyección a 20 años considerando una inflación del 4%.
- Tabla 4.4: Indicadores de rentabilidad caso 1
- Tabla 4.5: Escenario de precios Net Billing y residuos
- Tabla 4.6: Resumen financiero esquema de comercialización Net billing, proyección a 20 años considerando una inflación del 4%
- Tabla 4.7: Corrida financiera Net Billing caso 2
- Tabla 4.8: Indicadores de rentabilidad caso 2

## VIII. Índice de ecuaciones

Ecuación 2.1	Disponibilidad de lluvia
Ecuación 2.2	Consumo litros por kilo
Ecuación 2.3	Rastrojo gasificable comunidad
Ecuación 2.4	Rastrojo de maíz verde LMS
Ecuación 2.5	Rendimiento grano LMS
Ecuación 2.6	Peso rastrojo en seco
Ecuación 2.7	Rastrojo frijol
Ecuación 2.8	Rendimiento de frijol LMS
Ecuación 3.1	Gasto másico
Ecuación 3.2	Potencia de diseño
Ecuación 3.3	Potencia bruta real
Ecuación 3.4	Potencia neta real
Ecuación 3.5	Tiempo de operación
Ecuación 3.6	Generación anual bruta
Ecuación 3.7	Factor de planta
Ecuación 3.8	Consumo de combustible
Ecuación 3.9	Generación anual bruta
Ecuación 3.10	Factor de planta
Ecuación 3.11	Meses de operación
Ecuación 3.12	Generación anual bruta
Ecuación 3.13	Generación anual neta
Ecuación 3.14	Auto consumo
Ecuación 3.15	Eficiencia chp
Ecuación 3.16	Rendimiento marmita
Ecuación 3.17	Rendimiento marmita maíz
Ecuación 3.18	Demanda vapor nixtamalización
Ecuación 3.19	Rendimiento marmita frijol
Ecuación 3.20	Vapor cocción de frijol
Ecuación 3.21	Q deshidratación
Ecuación 3.22	Calor sensible
Ecuación 3.23	Calor latente
Ecuación 3.24	Masa de aire
Ecuación 3.25	Masa de vapor
Ecuación 3.26	Producción de harina de maíz
Ecuación 3.27	Producción de harina de frijol
Ecuación 4.1	Costo valor del MWht
Ecuación 4.2	Ingresos energía térmica
Ecuación 5.1	Empleos generados
Ecuación 5.2	Oferta laborar en comunidad
Ecuación 5.3	CO <sub>2</sub> Absorbido
Ecuación 5.4	CO <sub>2</sub> secuestrado

## **IX. Índice de anexos**

Anexo 1: Anexo 1: Sistema de gasificación Completo.

Anexo 2: Resumen parámetros de desempeño de la planta con una proyección a 20 años

Anexo 3: Resumen financiero esquema de comercialización PML, proyección a 20 años considerando una inflación del 4%

Anexo 4: Resumen financiero esquema de comercialización net billing, proyección a 20 años considerando una inflación del 4%

Anexo 5: Esquema de producción del cultivo energético.

## **X. Glosario de términos**

PRODESEN: Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional.

ODM: Objetivos de Desarrollo del Milenio.

CEPAL: Comisión Económica Para América Latina y el Caribe

AIC: Consumo Individual Corriente

PNUD: Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo.

IDH: Índice de Desarrollo Humano.

PIB: Producto Interno Bruto.

CRE: Comisión Reguladora de Energía.

LMS: La Milpa Sustentable

CFE: Comisión Federal de Electricidad

CENACE: Centro Nacional de control de Energía

PROFEPA: Procuraduría Federal de Protección al Ambiente

SIEN: Sistema Eléctrico Nacional

GD: Generación Distribuida.

TEP: Su valor equivale a la energía que rinde una tonelada de petróleo  
41 868 000 000

## XI. Bibliografía

- [1] L.M Galindo, J.L Samaniego, J.E Alatorre, J.F Orlando, “Cambio climático, agricultura y pobreza en América Latina, Una aproximación empírica”, CEPAL 2014.
- [2] IEPDS) 2020 <https://www.forbes.com.mx/noticias-mexico-9-millones-pobreza-pandemia-coneval/>
- [3] CEPAL, Contribución de los servicios energéticos a los Objetivos de Desarrollo del Milenio y a la mitigación de la pobreza en América Latina y el Caribe, PNUD 2009.
- [4] Coneval 2008, glosario [online], <https://www.coneval.org.mx/Medicion/Paginas/Glosario.aspx>, consultado el 11 de junio de 2021
- [5] [https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/tema/recuadros/recuadro1\\_5.html](https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/tema/recuadros/recuadro1_5.html), Fecha de consulta junio 2021
- [6] F. Romero, “La energía como fuente de crecimiento y desarrollo en la perspectiva del fin de la era de los combustibles fósiles”, suiza 2006.
- [7] América Latina y el Caribe representa el 8 % del PIB global y de la población mundial según nuevo informe multilateral, comisión Económica para América Latina y el Caribe, 19 mayo de 2020.
- [8] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales Blog, Qué es la huella ecológica[online]. [ww.gob.mx/semarnat/articulos/que-es-la-huella-ecologica?idiom=es2012](http://ww.gob.mx/semarnat/articulos/que-es-la-huella-ecologica?idiom=es2012)
- [9] Biodiversidad, bio-capacidad y propuestas de futuro [online] [www.wwf.org.mx/?208368/hemos-sobregirado-los...Informe-Planeta-Vivo-2012](http://www.wwf.org.mx/?208368/hemos-sobregirado-los...Informe-Planeta-Vivo-2012).
- [10] El nuevo informe desarrollo humano mundial 2010 el transeúnte [online] [transeunte2.wordpress.com/tag/informe-idh/](http://transeunte2.wordpress.com/tag/informe-idh/), Fecha de consulta: 22 noviembre del 2019.
- [11] Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales Informe del Medio Ambiente, gobierno de México [online] [apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/tema/cap1.html](http://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/tema/cap1.html), . Fecha de consulta: 16 de junio de 2021
- [12] [https://base.energia.gob.mx/Prospectivas18-32/PER\\_18\\_32\\_F.pdf](https://base.energia.gob.mx/Prospectivas18-32/PER_18_32_F.pdf)
- [13] <https://dgel.energia.gob.mx/INEL/>, consulta: noviembre del 2019, Fecha de consulta abril 2020.
- [14] <https://dgel.energia.gob.mx/AZEL/>
- [15] <https://www.gob.mx/conuee/acciones-y-programas/tecnologias-de-generacion-distribuida-estados-y-municipios?state=published>
- [16] Miguel A. Lozano, J. Ramos “Análisis Energético y Económico de Sistemas Simples de Cogeneración”, Información Tecnológica-Vol. 18 N°4-2007, pág.: 75-84, Zaragoza España.
- [17] ¿Qué es la gasificación?, centro europeo de posgrado, artículo blog [online], <https://www.ceupe.com/blog/que-es-la-gasificacion.html>,
- [18] Naomi Vale Mariño, María Belén Folgueras Díaz, Diseño termodinámico y análisis de un ciclo combinado con gasificación integrada de biomasa. universidad de Oviedo, junio de 2017.

- [19] Manual de interconexión de centrales de generación con capacidad menor a 0.5 MW [https://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5465576&fecha=15/12/2016#gsc.tab=0](https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5465576&fecha=15/12/2016#gsc.tab=0)
- [20] Asociación Andes, oxfam Novib, Parque Chalakuy, “Manual Desarrollo Vegetativo del Maíz”, Sembrando Diversidad Cosechando Seguridad, Perú 2019.
- [21] <https://www.gob.mx/aserca/articulos/maiz-grano-cultivo-representativo-de-mexico?idiom=es>
- [22] A. Fassio, A. I Carriquiry, C. Tojo, R. Romero” MAÍZ: Aspectos sobre fenología”. INA 1998, Uruguay.
- [23] I. Sánchez Ortega, E. Pérez Urria Carril, “Maíz I (Zea mays)”, Universidad Complutense, Madrid 2014.
- [24] I A. Ciampitti, R. W. Elmore “Crop Production and Cropping Systems Specialist”, State University. Kansas 2011. [Poster%20-%20CyD%20MAIZ%20-%20KSU.pdf](http://lacs.ipni.net/ipniweb/region/lacs.nsf/0/F8402FFA808151620325816000706EF9/$FILE/)
- [25] [http://lacs.ipni.net/ipniweb/region/lacs.nsf/0/F8402FFA808151620325816000706EF9/\\$FILE/](http://lacs.ipni.net/ipniweb/region/lacs.nsf/0/F8402FFA808151620325816000706EF9/$FILE/)
- [26] Del Maíz. ifoe enciclopedia ilustrada [online] <http://delmaiz.info/cultivo-plagas/>
- [27] R. Ebel · G. Pozas Cárdenas, F. Soria Miranda<sup>1</sup> · J. Cruz González, “Manejo orgánico de la milpa: rendimiento de maíz, frijol y calabaza en monocultivo y policultivo” Terra Latino América vol.35 no.2 Chapingo abr./jun. 2017.
- [28] Ambientum (Madrid,)[online], [www.ambientum.com/enciclopedia\\_medioambiental/energia/cultivos\\_energeticos.asp](http://www.ambientum.com/enciclopedia_medioambiental/energia/cultivos_energeticos.asp)
- [29] Producción de biomasa, rendimiento y competencia entre plantas de maíz, (Zea mays L.) , según su variabilidad temporal en la emergencia .
- [30] Ana Paulina Vázquez Karnstedt El reto de la conservación y el desarrollo comunitario, revista de divulgación científica y tecnológica de la universidad Veracruzana, Enero abril de 2010 Volumen XXIII
- [31] <http://www.microrregiones.gob.mx/catloc/LocdeMun.aspx?tipo=clave&campo=oc&ent=20&mun=041>
- [32] Luis Ignacio Velásquez. Noticias net Maíz, el grano sagrado
- [33] <https://www.dekalb.es/biblioteca-agronomia/manejo-del-cultivo-de-maiz/maiz-agua#:~:text=Por%201%20kilo%20de%20materia,para%20su%20uso%20como%20forraaj>
- [34] [https://www.agroptima.com/es/blog/rendimiento-cultivos-hectarea-calcular/#Cuantos\\_granos\\_hay\\_por\\_mazorca](https://www.agroptima.com/es/blog/rendimiento-cultivos-hectarea-calcular/#Cuantos_granos_hay_por_mazorca).
- [35] Relación entre el peso fresco y el peso seco del rastrojo de maíz en diferentes estados fenológicos del cultivo, [http://www.mag.go.cr/rev\\_meso/v08n01\\_020.pdf](http://www.mag.go.cr/rev_meso/v08n01_020.pdf).
- [36] [http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi\\_apps/WFServlet?IBIF\\_ex=D3\\_AGUA01\\_01&IBIC\\_user=dgeia\\_mce&IBIC\\_pass=dgeia\\_mce&NOMBREENTIDAD=\\* &NOMBREANIO=\\*](http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D3_AGUA01_01&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce&NOMBREENTIDAD=* &NOMBREANIO=*)
- [37] <https://es.weatherspark.com/y/8535/Clima-promedio-en-Oaxaca-M%C3%A9xico-durante-todo-el-a%C3%B1o>
- [38] Sergio D. Fonseca, Hugo A. Rodríguez, Gabriel Camargo, Caracterización de residuos de maíz del municipio de venta quemada Colombia, Avances en Ciencias e Ingeniería - ISSN: 0718-8706 Av. cien. ing.: 8(2), 29-36 (Abril/Junio, 2017).



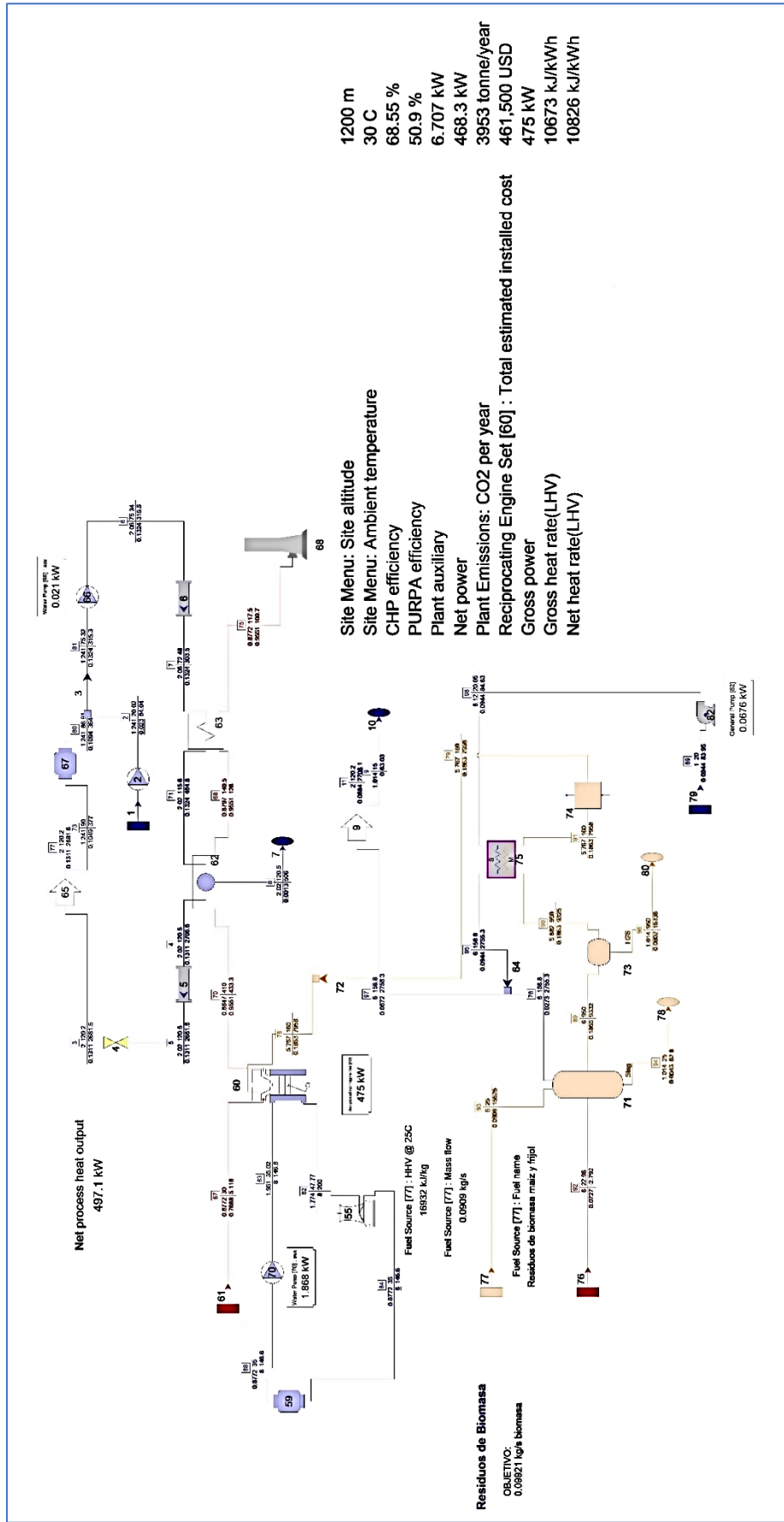
- [39] L. Roque-Maciel, G. Arámbula-Villa, M. López-Espíndola, H. Ortiz-Laurel, A. Carballo-Carballo, J.A. Herrera-Corredor, Nixtamalización de cinco variedades de maíz con diferente dureza de grano: impacto en consumo de combustible y cambios fisicoquímicos. *Agro ciencias* vol. 50, no 6 México agosto 2016.
- [40] Yuniel delgado Santana, Reiner Jiménez Borges, Margarita Josefa Lapido Rodríguez Eficiencia energética en el uso de vapor para la cocción de alimentos, s. Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente
- [41] Fernández Muñoz, Guintal Santos M.A, Estudio de secado en un secador de halógeno de los granos de maíz nixtamalizados, centro de investigaciones en ciencias aplicadas y tecnología avanzada del instituto politécnico unidad legaria, diciembre 2013
- [42] Análisis de una planta de cogeneración para aprovechar los residuos producidos en el procesamiento de café en la finca nuevo México, Morales Jiménez Juan Manuel, DR. Gabriel León de los Santos Facultad de Ingeniería, Ciudad Universitaria, Cd. Mx., noviembre 2019.
- [43] [https://www.ilo.org/global/topics/sdg-2030/documents/WCMS\\_193484/lang--es/index.htm](https://www.ilo.org/global/topics/sdg-2030/documents/WCMS_193484/lang--es/index.htm).
- [44] Nora Lustig, Darryl McLeod, salario mínimo y pobreza. un análisis de corte transversal para países en desarrollo, noviembre 1995.
- [45] <https://www.lgseeds.es/media/APUNTE-T%C3%89CNICO-MA%C3%8DZ-Y-AGUA-PARTE-1.pdf>
- [46] [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/630693/Aviso\\_FEE\\_2020.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/630693/Aviso_FEE_2020.pdf)

## **XII. Bibliografía complementaria**

- [A] Rendimiento de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) en sistemas agrícolas que aprovechan escurrimientos
- [B] <https://dgel.energia.gob.mx/ANBIO/mapa.html?lang=es#excluidos>
- [C] Oscar Javier Ayala Garay<sup>1</sup>, Juan Manuel Pichardo González<sup>1</sup>, Julio Arturo Estrada Gómez<sup>1</sup>, José Alfredo Carrillo Salazar<sup>1</sup> y Adrián Hernández Livera<sup>1</sup> Programa de Semillas, Colegio de Postgraduados. Km 36.5 Carretera México–Texcoco. C. P. 56230. Montecillo, Texcoco, Estado de México, México.
- [D] [https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1659-13212011000200005](https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1659-13212011000200005)

# Anexos

# Anexo 1: Sistema de gasificación Completo



**Anexo 2: Resumen parámetros de desempeño de la planta con una proyección a 20 años**

año	Potencia bruta MW	potencia neta MW	Potencia real MW sitio	FP MEDIO	Generación anual bruta MWh	Generación anual neta MWh	auto consumo MWh	energía a la venta MWhe CHP	CELS a la venta CHP	Heat Rate kJ/MWh	Consumo de residuos [ton]
2022	0.525	0.475	0.469	0.374	1,557.5	1,537.79	19.7	1,518.1	1518.1	10826000	995.81
2023	0.525	0.475	0.469	0.374	1,556.7	1,537.02	19.7	1,517.4	1517.4	10826000	995.31
2024	0.525	0.475	0.469	0.374	1,555.9	1,536.25	19.7	1,516.6	1516.6	10826000	994.82
2025	0.525	0.475	0.469	0.374	1,555.1	1,535.48	19.6	1,515.8	1515.8	10826000	994.32
2026	0.525	0.475	0.469	0.374	1,554.3	1,534.72	19.6	1,515.1	1515.1	10826000	993.82
2027	0.525	0.475	0.469	0.373	1,553.6	1,533.95	19.6	1,514.3	1514.3	10826000	993.32
2028	0.525	0.475	0.469	0.373	1,552.8	1,533.18	19.6	1,513.6	1513.6	10826000	992.83
2029	0.525	0.475	0.469	0.373	1,552.0	1,532.41	19.6	1,512.8	1512.8	10826000	992.33
2030	0.525	0.475	0.469	0.373	1,551.2	1,531.65	19.6	1,512.1	1512.1	10826000	991.84
2031	0.525	0.475	0.469	0.373	1,550.5	1,530.88	19.6	1,511.3	1511.3	10826000	991.34
2032	0.525	0.475	0.469	0.372	1,549.7	1,530.12	19.6	1,510.5	1510.5	10826000	990.84
2033	0.525	0.475	0.469	0.372	1,548.9	1,529.35	19.6	1,509.8	1509.8	10826000	990.35
2034	0.525	0.475	0.469	0.372	1,548.1	1,528.59	19.6	1,509.0	1509.0	10826000	989.85
2035	0.525	0.475	0.469	0.372	1,547.4	1,527.82	19.5	1,508.3	1508.3	10826000	989.36
2036	0.525	0.475	0.469	0.372	1,546.6	1,527.06	19.5	1,507.5	1507.5	10826000	988.86
2037	0.525	0.475	0.469	0.372	1,545.8	1,526.30	19.5	1,506.8	1506.8	10826000	988.37
2038	0.525	0.475	0.469	0.371	1,545.0	1,525.53	19.5	1,506.0	1506.0	10826000	987.88
2039	0.525	0.475	0.469	0.371	1,544.3	1,524.77	19.5	1,505.3	1505.3	10826000	987.38
2040	0.525	0.475	0.469	0.371	1,543.5	1,524.01	19.5	1,504.5	1504.5	10826000	986.89
2041	0.525	0.475	0.469	0.371	1,542.7	1,523.25	19.5	1,503.8	1503.8	10826000	986.39

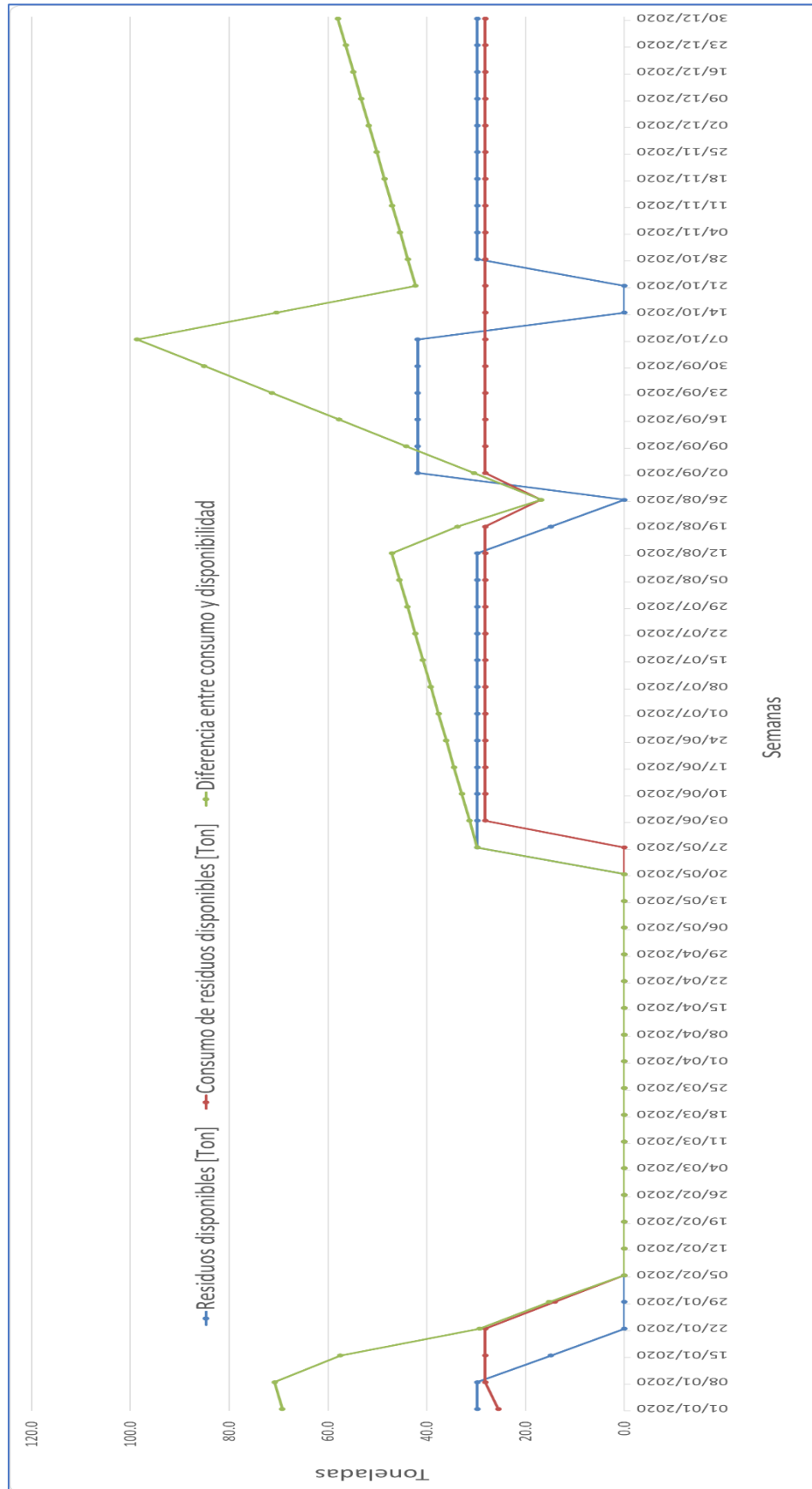
**Anexo 3:** Resumen financiero esquema de comercialización PML, proyección a 20 años considerando una inflación del 4%

Valor del MWh para deshidratación, secado	Ingresos anuales CHP A PML	Ingresos por CELs CHP	Ingresos por Energía térmica	Costo sustituto de combustible \$	Costos O&M Fijos 10.80	Costos O&M Variables 0.0033	RESULTADO NETO ANUAL
43.8	\$ 1,366,304	\$ 610,273	\$ 145,383.5	\$ 896,231	\$ 110,111	\$ 99,812	\$ 1,015,808
43.8	\$ 1,420,246	\$ 634,367	\$ 145,310.8	\$ 913,698	\$ 110,111	\$ 99,762	\$ 1,076,353
43.8	\$ 1,476,317	\$ 659,412	\$ 145,238.2	\$ 931,506	\$ 110,111	\$ 99,712	\$ 1,139,638
43.8	\$ 1,534,602	\$ 685,445	\$ 145,165.6	\$ 949,661	\$ 110,111	\$ 99,662	\$ 1,205,779
43.8	\$ 1,595,188	\$ 712,507	\$ 145,093.0	\$ 968,170	\$ 110,111	\$ 99,612	\$ 1,274,895
43.8	\$ 1,658,166	\$ 740,637	\$ 145,020.4	\$ 987,040	\$ 110,111	\$ 99,562	\$ 1,347,110
43.8	\$ 1,723,631	\$ 769,877	\$ 144,947.9	\$ 1,006,277	\$ 110,111	\$ 99,512	\$ 1,422,555
43.8	\$ 1,791,680	\$ 800,272	\$ 144,875.4	\$ 1,025,890	\$ 110,111	\$ 99,463	\$ 1,501,363
43.8	\$ 1,862,415	\$ 831,866	\$ 144,803.0	\$ 1,045,884	\$ 110,111	\$ 99,413	\$ 1,583,676
43.8	\$ 1,935,943	\$ 864,709	\$ 144,730.6	\$ 1,066,268	\$ 110,111	\$ 99,363	\$ 1,669,640
43.8	\$ 2,012,375	\$ 898,847	\$ 144,658.2	\$ 1,087,050	\$ 110,111	\$ 99,314	\$ 1,759,405
43.8	\$ 2,091,823	\$ 934,334	\$ 144,585.9	\$ 1,108,237	\$ 110,111	\$ 99,264	\$ 1,853,131
43.8	\$ 2,174,408	\$ 971,221	\$ 144,513.6	\$ 1,129,836	\$ 110,111	\$ 99,214	\$ 1,950,981
43.8	\$ 2,260,254	\$ 1,009,565	\$ 144,441.4	\$ 1,151,857	\$ 110,111	\$ 99,165	\$ 2,053,128
43.8	\$ 2,349,489	\$ 1,049,423	\$ 144,369.1	\$ 1,174,306	\$ 110,111	\$ 99,115	\$ 2,159,748
43.8	\$ 2,442,247	\$ 1,090,854	\$ 144,297.0	\$ 1,197,194	\$ 110,111	\$ 99,066	\$ 2,271,027
43.8	\$ 2,538,666	\$ 1,133,921	\$ 144,224.8	\$ 1,220,527	\$ 110,111	\$ 99,016	\$ 2,387,158
43.8	\$ 2,638,893	\$ 1,178,688	\$ 144,152.7	\$ 1,244,315	\$ 110,111	\$ 98,967	\$ 2,508,341
43.8	\$ 2,743,076	\$ 1,225,223	\$ 144,080.6	\$ 1,268,567	\$ 110,111	\$ 98,917	\$ 2,634,785
43.8	\$ 2,851,373	\$ 1,273,594	\$ 144,008.6	\$ 1,293,291	\$ 110,111	\$ 98,868	\$ 2,766,706

**Anexo 4:** Resumen financiero esquema de comercialización net billing, proyección a 20 años considerando una inflación del 4%

Valor del MWht para deshidratación, secado	Ingresos anuales CHP		Ingresos por CELs CHP	Ingresos por Energía térmica	Costo sustituto de combustible \$	Costos O&M Fijos		Costos O&M V	RESULTADO NETO ANUAL
	A PML					10.80	0.0033		
43.8	\$ 1,821,739	\$ 610,273	\$ 145,383.5	\$ 896,231	\$ 110,111	\$ 99,812	\$ 1,471,242		
43.8	\$ 1,893,661	\$ 634,367	\$ 145,310.8	\$ 913,698	\$ 110,111	\$ 99,762	\$ 1,549,768		
43.8	\$ 1,968,423	\$ 659,412	\$ 145,238.2	\$ 931,506	\$ 110,111	\$ 99,712	\$ 1,631,744		
43.8	\$ 2,046,136	\$ 685,445	\$ 145,165.6	\$ 949,661	\$ 110,111	\$ 99,662	\$ 1,717,313		
43.8	\$ 2,126,918	\$ 712,507	\$ 145,093.0	\$ 968,170	\$ 110,111	\$ 99,612	\$ 1,806,624		
43.8	\$ 2,210,889	\$ 740,637	\$ 145,020.4	\$ 987,040	\$ 110,111	\$ 99,562	\$ 1,899,832		
43.8	\$ 2,298,174	\$ 769,877	\$ 144,947.9	\$ 1,006,277	\$ 110,111	\$ 99,512	\$ 1,997,098		
43.8	\$ 2,388,906	\$ 800,272	\$ 144,875.4	\$ 1,025,890	\$ 110,111	\$ 99,463	\$ 2,098,590		
43.8	\$ 2,483,220	\$ 831,866	\$ 144,803.0	\$ 1,045,884	\$ 110,111	\$ 99,413	\$ 2,204,481		
43.8	\$ 2,581,258	\$ 864,709	\$ 144,730.6	\$ 1,066,268	\$ 110,111	\$ 99,363	\$ 2,314,954		
43.8	\$ 2,683,166	\$ 898,847	\$ 144,658.2	\$ 1,087,050	\$ 110,111	\$ 99,314	\$ 2,430,197		
43.8	\$ 2,789,097	\$ 934,334	\$ 144,585.9	\$ 1,108,237	\$ 110,111	\$ 99,264	\$ 2,550,405		
43.8	\$ 2,899,211	\$ 971,221	\$ 144,513.6	\$ 1,129,836	\$ 110,111	\$ 99,214	\$ 2,675,784		
43.8	\$ 3,013,672	\$ 1,009,565	\$ 144,441.4	\$ 1,151,857	\$ 110,111	\$ 99,165	\$ 2,806,545		
43.8	\$ 3,132,652	\$ 1,049,423	\$ 144,369.1	\$ 1,174,306	\$ 110,111	\$ 99,115	\$ 2,942,911		
43.8	\$ 3,256,329	\$ 1,090,854	\$ 144,297.0	\$ 1,197,194	\$ 110,111	\$ 99,066	\$ 3,085,109		
43.8	\$ 3,384,889	\$ 1,133,921	\$ 144,224.8	\$ 1,220,527	\$ 110,111	\$ 99,016	\$ 3,233,380		
43.8	\$ 3,518,524	\$ 1,178,688	\$ 144,152.7	\$ 1,244,315	\$ 110,111	\$ 98,967	\$ 3,387,972		
43.8	\$ 3,657,435	\$ 1,225,223	\$ 144,080.6	\$ 1,268,567	\$ 110,111	\$ 98,917	\$ 3,549,143		
43.8	\$ 3,801,831	\$ 1,273,594	\$ 144,008.6	\$ 1,293,291	\$ 110,111	\$ 98,868	\$ 3,717,164		

**Anexo 5** Figura 3.4 Disponibilidad de combustible



## Anexo 6 Indicadores y resultados del cultivo energético

Las consideraciones que se realizan para el cultivo, es una densidad de siembra de 10 plantas por metro cuadrado.

$$\text{Densidad de cultivo operativa} = \left(10 \left[\frac{\text{macetas}}{\text{m}^2}\right]\right) (10\,000 \text{ m}^2) = 1 \times 10^5 \left[\frac{\text{macetas}}{\text{ha}}\right]$$

Para determinar el número de elotes cosechados, se considera una semilla criolla que da un elote por planta. La Milpa Sustentable debido a su esquema cíclico y escalonado permite 2 cultivos durante el año agrícola, si se asume una pérdida del 30% del cultivo por factores externos.

$$\begin{aligned} \text{elotes cosechados} &= \left(2 \left[\frac{\text{cultivos}}{\text{año}}\right]\right) (70\%) \left(1 \times 10^5 \left[\frac{\text{plantas}}{\text{ha}}\right]\right) = \\ &= 140 \times 10^3 \left[\frac{\text{plantas}}{\text{cultivos}}\right] \end{aligned}$$

Para determinar la cantidad de biomasa producido por el sistema, se retoman los resultados adquiridos en el artículo “Densidad de siembra y crecimiento de maíces forrajeros” [A], el dato establece que en un cultivo de maíz criollo de 50 000 plantas por hectárea produce 44.2 toneladas de biomasa verde por hectárea.

$$\begin{aligned} \text{Producción biomasa en verde} &= \left(\frac{44.2 \left[\frac{\text{ton BV}}{\text{ha}}\right]}{50\,000 \left[\frac{\text{plantas}}{\text{ha}}\right]}\right) (140 \times 10^3 \text{ plantas}) \\ &= 123.76 \text{ ton Bv} \end{aligned}$$

Para determinar la cantidad de maíz producido se utiliza el dato experimental de 6 elotes por cada kilogramo de grano de maíz.

$$\text{kilo gramos de maíz} = \frac{140 \times 10^3 \left[\frac{\text{elotes}}{\text{ha}}\right]}{6 \left[\frac{\text{elotes}}{\text{kg maíz}}\right]} = 23.3 \times 10^3 \left[\frac{\text{kg maíz}}{\text{ha}}\right]$$

Para determinar la cantidad de residuos o forraje seco del cultivo asociado, se usa un valor conservador de 455 g por planta de frijol [B] [C] y una relación de 26 g de frijol por planta [D].

$$\begin{aligned} \text{forraje frijol} &= \left(140 \times 10^3 \left[\frac{\text{planta}}{\text{ha}}\right]\right) \left(0.455 \left[\frac{\text{kg}}{\text{planta}}\right]\right) = \left(74\,000 \left[\frac{\text{kg}}{\text{ha}}\right]\right) \left(\frac{1}{1000} \left[\frac{\text{ton}}{\text{kg}}\right]\right) \\ &= 74 \left[\frac{\text{ton rastrojo de frijol}}{\text{ha}}\right] \end{aligned}$$

$$\text{Grano de frijol} = \left(0.028 \left[\frac{\text{kg frijol}}{\text{planta}}\right]\right) \left(140 \times 10^3 \left[\frac{\text{planta}}{\text{ha}}\right]\right) =$$



$$= \left( 3\,920 \left[ \frac{\text{kg de frijol}}{\text{ha}} \right] \right) \left( 1000 \left[ \frac{\text{ton}}{\text{kg}} \right] \right)$$

$$= 3.92 \left[ \frac{\text{ton de frijol}}{\text{ha}} \right]$$

En la tabla siguiente se muestra un resumen de los resultados del escenario estipulado para el cultivo energético.

Resumen de resultados Escenario 3 por ha								
Escenario	Tamaño [m <sup>2</sup> ]	Número de macetas	Elotes cosechados	Consumo agua [L/elote]	Cosecha [Elotes/kg]	Total de grano [kg]	Consumo de agua [L/kg]	Rastrojo [kg]
3	10000	100000	140000	230	6	23300	1375	123760
Cultivo complementario frijol								
Plantas frijol		Cosecha [kg]		Consumo de agua [L/kg]		Rastrojo [kg]		
100000		3724		1525		74000		

#### Indicadores de La Milpa Sustentable

Productividad LMS					
Maíz [ton]	Frijol [ton]	Residuos Maíz frijol LMS Kg	Residuos de maíz comunidad [ton]	Maíz Harinificado [Ton]	Frijol Harinificado [Ton]
76	20	744	251.0	76	20
Costos Cultivo Energético					
Mano de obra	Sustrato		Insumos	Electricidad	Total
\$ 1,021,157	\$ 1,961,896		\$ 348,000	\$ 248,724	\$ 3,579,777
Costos Producción Harina					
Mano de obra	Vapor		Energía Eléctrica		Total general
\$ 47,880.00	\$ 181,786		\$ 181,213		\$ 3,990,657
Ingresos venta					
Grano maíz	Grano frijol	Harina de maíz	Harina de frijol	Total	
\$ -	\$ -	\$ 2,140,320	\$ 3,057,600	\$ 5,197,920	
Totales					
Ingresos	Costo	Ganancia cultivo		Retorno de inversión	
\$ 5,197,920.00	\$ 3,990,657	\$ 1,207,263.28		3	Años
Indicadores de La Milpa Sustentable					
Plantilla personal		Costos instalaciones y materiales		personal cocina	
28	Personas	\$ 25	\$/maceta	7	personas
Salario LMS		Salario Cocina		Costos insumos	
\$ 3,648	mes/persona	\$ 6,840	mes/persona	\$ 0.67	\$/bolsa
\$ 102,116	Personal/mensual	\$ 47,880.00	Personal/mensual		
tiempo de operación		tiempo de operación		Costos por bolsa	
10	meses	8.5	meses	\$ 2	\$/bolsa
Productividad Rastrojo bolsa			Costo de produccionForraje		
2	Kg/bolsa		\$ 1.51	\$/Kg	

Fuente: Elaboración Propia

