



industriales
etsii

**Escuela Técnica
Superior
de Ingeniería
Industrial**

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL CACTUS NOPAL EN COLOMBIA.

TRABAJO FIN DE MASTER

MÁSTER UNIVERSITARIO EN ENERGÍAS RENOVABLES

Autor: Lenin Duvan Duque Batista

Director: José Pablo Delgado Marín

Cartagena, Julio 2020



**Universidad
Politécnica
de Cartagena**

**ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN
ELÉCTRICA A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL CACTUS NOPAL EN
COLOMBIA.**

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	7
ABSTRACT	8
OBJETIVOS	9
1. GENERALIDADES	10
1.1 PANORAMA ACTUAL.....	10
1.2 BIOGÁS.....	13
2. MARCO LEGAL DE COLOMBIA	16
2.1 ACTORES PUBLICOS.....	16
2.1.1 Ministerio de Minas y Energía (MME).....	16
2.1.2 Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG).....	16
2.1.3 Unidad de Planeación Minero Energética (UPME).....	17
2.1.4 Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones	17
2.2 ACTORES PRIVADOS.....	17
2.2.1 Corporación para la Energía y el Medioambiente (CORPOEMA	17
2.2.2 SER Colombia.....	17
2.2.3 Asociación Colombiana de Generadores de Energía Eléctrica (ACOLGEN).....	17
2.2.4 Asociación Colombiana de Distribuidores de Energía Eléctrica (ASOCODIS).....	17
2.2.5 Asociación Colombiana de Energías Renovables (ACER).....	18
2.3 EVOLUCIÓN DEL MARCO LEGAL DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES EN COLOMBIA	18
2.4 VENTA DE ENERGÍA ELECTRICA	27
3. BIOMASA	28
3.1 LOCALIZACIÓN DEL proyecto.....	28
3.2 CARACTERÍSTICAS	32
3.2.1 Proceso de cultivo	34
3.2.2 Productividad.....	35

**ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN
ELÉCTRICA A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL CACTUS NOPAL EN
COLOMBIA.**

3.2.3 Valor energético	35
4. PROCESO DE GENERACIÓN.....	37
4.1 PRODUCCIÓN DE BIOMASA	38
4.2 RECOLECCIÓN Y ACONDICIONAMIENTO	39
4.3 BIODIGESTIÓN.....	40
4.4 TRATAMIENTO DEL BIOGÁS.....	41
4.5 GENERACIÓN DE ENERGÍA ELECTRICA.....	42
4.6 CONEXIÓN A RED	42
5. BIODIGESTOR.....	44
5.1 TIPOS DE DIGESTORES	44
5.1.1 Reactor mezcla completa	45
5.1.2 Reactor de flujo pistón	46
5.1.3 Reactor UASB.....	48
5.1.4 Reactor de dos fases.....	49
5.2 VOLUMEN DEL REACTOR.....	49
5.3 DIMENSIONES DEL DIGESTOR	50
5.4 CARACTERISTICAS DEL BIOGÁS.....	51
5.4.1 Poder Calorífico del Biogás.....	52
5.5 SELECCIÓN DEL BIODIGESTOR	54
6. EQUIPOS DE GENERACIÓN ELECTRICA.....	56
6.1 DIMENSIONAMIENTO DEL MOTOR	56
6.2 SELECCIÓN DEL MOTOR.....	57
6.2.1 Características técnicas	59
6.3 SALA DE MÁQUINAS	61
6.4 DISPOSICION FINAL DE LAS INSTALACIONES.....	62
7. ANÁLISIS ECONOMICO Y MEDIOAMBIENTAL.....	64
7.1 COSTOS PRIMARIOS.....	64

ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL CACTUS NOPAL EN COLOMBIA.

7.1.1	Costos de inversión (CAPEX).....	64
7.1.2	Costos de Operación OPEX.....	66
7.2	INGRESOS.....	68
7.2.1	Ingresos por venta de energía.....	68
7.3	Ingresos por bonos de carbono.....	70
7.4	VIABILIDAD ECONOMICA.....	72
7.5	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.....	76
8.	CONCLUSIONES.....	78
	Bibliografía.....	80

**ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN
ELÉCTRICA A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL CACTUS NOPAL EN
COLOMBIA.**

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. GENERACIÓN DE EE POR VECTOR.	12
TABLA 2. COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL BIOGÁS OBTNEIDO A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL NOPAL	41
TABLA 3. CARACTERÍSTICAS DEL REACTOR DE MEZCLA COMPLETA.....	45
TABLA 4. CARACTERÍSTICAS DEL REACTOR FLUJO PISTÓN	47
TABLA 5. ESTIMACIÓN VOLUMEN DEL DIGESTOR	50
TABLA 6. DIMENSIONES DEL REACTOR.....	51
TABLA 7. PRODUCCIÓN DE BIOGÁS ANUAL.....	52
TABLA 8. CARACTERÍSTICAS POR COMPONENTES DEL BIOGÁS	52
TABLA 9. APORTE CALORÍFICO POR COMPUESTO DEL BIOGÁS	53
TABLA 10. PODER CALORÍFICO DEL BIOGÁS.....	53
TABLA 11. MATRIZ DE COMPARACIÓN ENTRE TECNOLOGÍA DE REACTORES.	54
TABLA 12. MATRIZ DE SELECCIÓN DEL REACTOR	55
TABLA 13. ENERGÍA GENERADA.....	57
TABLA 14. COMPARACIÓN DE MOTORES ELÉCTRICOS.....	58
TABLA 15. FICHA TÉCNICA GENERADOR.....	60
TABLA 16.FICHA TÉCNICA MOTOR.....	60
TABLA 17. CARACTERÍSTICAS SALA DE MÁQUINAS.	61
TABLA 18. RELACIÓN DE COSTOS DE INVERSIÓN.....	65
TABLA 19. COSTOS DE INVERSIÓN- CAPEX.....	65
TABLA 20. ESTRUCTURA SALARIAL	67
TABLA 21. COSTOS DE OPERACIÓN OPEX.....	68
TABLA 22. INGRESOS POR VENTA DE ENERGÍA PERIODO 1	70
TABLA 23. INGRESOS POR BONO DE CARBONO P1	72
TABLA 24. VAN – TIR.....	73
TABLA 25. AMORTIZACIÓN.....	74
Tabla 26. CARACTERÍSTICAS ECONÓMICAS	76

**ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN
ELÉCTRICA A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL CACTUS NOPAL EN
COLOMBIA.**

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Generación Promedio Diaria de Energía Eléctrica	11
Figura 2. Aplicaciones del biogás	14
Figura 3. Evolución del Marco Legal en Colombia	19
Figura 4. Metas de Ahorro Energético a 2022.	24
Figura 5. Localización del terreno.....	28
Figura 6. Vista 3D de la localización del proyecto	29
Figura 7. Plano de situación	29
Figura 8. Área de plantación	30
Figura 9. Localización de la Planta y Subestación, vista General	31
Figura 10. OPUNTIA FICUS- INDICA.	32
Figura 11. Preparación del terreno y acolchado.....	34
Figura 12. Etapas de la generación de energía a partir de biomasa	37
Figura 13. Plantación de nopal	38
Figura 14. Visualización del sustrato antes de ser bombeado.....	39
Figura 15. Etapas de la generación de energía a partir de Nopal.	43
Figura 16. Clasificación de reactores.....	44
Figura 17. Sistema de digestión tipo mezcla completa.....	46
Figura 18. Reactor UASB.....	48
Figura 19. Poder Calorífico de los principales combustibles	51
Figura 20. Motor TEDOM	59
Figura 21. Configuración y disposición de las instalaciones	62
Figura 22. Ubicación de las instalaciones	63
Figura 23. Precio del kwh en bolsa	69
Figura 24. PROYECCIÓN PRECIOS KWH	70
Figura 25. Precios de carbono	71
Figura 26. VAN 4 escenarios.....	77

ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL CACTUS NOPAL EN COLOMBIA.

INTRODUCCIÓN

Al día de hoy una de las principales problemáticas que tiene el hombre a nivel global, es el continuo aumento de demanda energética, lo que ha favorecido al calentamiento global. En los últimos años a nivel mundial se ha evidenciado un crecimiento desproporcionado entre la energía que se genera y la energía que se está demandando, ocasionando un desequilibrio energético, ya que con la matriz energética actual, es imposible crecer a nivel de generación de energía a la misma velocidad a la que está creciendo la demanda. Al ritmo actual y en un caso altamente probable de transición energética, al 2040 la humanidad podría llegar a demandar 18 mil millones de toneladas equivalentes de petróleo (1), en los cuales el gran protagonista seguiría siendo, el gas, el petróleo y el carbón.

Bajo la amenaza de perder la autosuficiencia energética Colombia está decidida a buscar nuevas alternativas de generación de energía eléctrica, segmentando así el uso de los combustibles fósiles principalmente al sector de transporte, dejando una amplia oportunidad para nuevos proyectos de ingeniería en tema de generación de energía eléctrica, tomando así el puesto que dejarán los hidrocarburos.

Colombia tiene el beneficio de tener condiciones climatológicas altamente óptimas para la cosecha de todo tipo de frutas y verduras. Es por esto que se desarrolla un estudio técnico económico de una planta de generación eléctrica a partir del biogás obtenido por la digestión anaeróbica de una plantación de cactus del Nopal. El proyecto será llevado a cabo en el departamento de Cundinamarca, en cercanías de la represa el Guavio, ubicada en el centro del país. Con la productividad de nopal establecida y el acondicionamiento de la biomasa, se calculan los valores de generación de energía eléctrica teóricos en función de la productividad de biomasa.

ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL CACTUS NOPAL EN COLOMBIA.

ABSTRACT

Currently, one of the main problems facing man around the world is the continuous increase in energy demand, which has favored global warming. In recent years worldwide, there has been a disproportionate growth between the energy that is generated and the energy that is demanded, causing an energy imbalance, which with the current energy matrix, it is impossible to grow to the level of energy generation in the same rate as demand grows. At the current rate and in a highly probable case of energy transition, by 2040 humanity could demand 18 billion tons of oil equivalent, in which the main protagonist would continue to be gas, oil and coal.

Under the threat of losing energy self-sufficiency, Colombia is determined to seek new alternatives for the generation of electrical energy, thus segmenting the use of fossil fuels mainly in the transport sector, leaving ample opportunities for new engineering projects in the field of power generation, thus taking the position that hydrocarbons will leave.

Colombia has the benefit of having very optimal climatic conditions to harvest all kinds of fruits and vegetables. This is the reason why an economic technical study of an electric generation plant is developed from the biogas obtained by anaerobic digestion of Nopal. The project will be carried out in the department of Cundinamarca, near the El Guavio dam, located in the center of the country. With the established productivity of the prickly pear and the conditioning of the biomass, the theoretical values of electricity generation are calculated based on the productivity of the biomass.

ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL CACTUS NOPAL EN COLOMBIA.

OBJETIVOS

Objetivo General

Demostrar la utilidad de las tecnologías basadas en la digestión anaeróbica de especies no convencionales como herramienta de diversificación energética en países centro y sudamericanos.

Para ello se va a analizar la viabilidad técnico-económica de obtener biogás a partir del cactus el nopal para su posterior uso como combustible en la generación de energía eléctrica por medio de motores de biogás.

Objetivos Específicos:

1. Conocer las generalidades del cactus nopal.
2. Explicar los parámetros óptimos de plantación del nopal
3. Conocer el marco regulatorio colombiano para el desarrollo de proyectos de energías renovables.
4. Explicar la metodología técnica requerida para la obtención de biogás y la generación de electricidad a partir de nopal.
5. Dimensionar las instalaciones necesarias para desarrollar el proyecto.
6. Describir y seleccionar los equipos más idóneos para el proyecto.
7. Determinar la viabilidad económica de la generación de energía a partir de la digestión anaeróbica de Nopal en Colombia

ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL CACTUS NOPAL EN COLOMBIA.

1. GENERALIDADES

Las últimas crisis en el sector de hidrocarburos, la necesidad de mantener la seguridad energética y el compromiso por la preservación del medio ambiente y reducción de emisiones de CO₂ a la atmósfera han hecho que Colombia, comience a incursionar en las energías renovables a un paso más acelerado de lo que lo venía haciendo en los últimos años. El desarrollo de nuevas tecnologías a nivel mundial ha hecho que las energías renovables no convencionales cada vez sean más competitivas en la canasta energética, permitiéndoles ingresar en la matriz de energía con mayor porcentaje de participación.

1.1 PANORAMA ACTUAL

Al día de hoy la matriz energética en materia de generación de energía eléctrica de Colombia, tiene tres grandes participantes, como lo son la generación a partir de fuentes hídricas en embalse o filo de agua, la generación a partir de combustible gaseoso y por medio del carbón. Aunque el mayor porcentaje de participación esté en la generación a partir de los recursos hídricos, con una aportación de 55.07% en el caso de los embalses y 5.44% para centrales de agua fluyente (2), todavía hay una dependencia hacia los recursos no renovables. La energía hidráulica se considera como una fuente renovable, pero esta no se considera como una fuente de energía renovable no convencional, por lo que el gran objetivo del país es aumentar la participación de las demás vectores energéticos, que permitan disminuir la dependencia en la generación de energía eléctrica de los recursos fósiles y así poder establecer una canasta de energía mucho más eficiente y con menor impacto al medio ambiente.

ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL CACTUS NOPAL EN COLOMBIA.

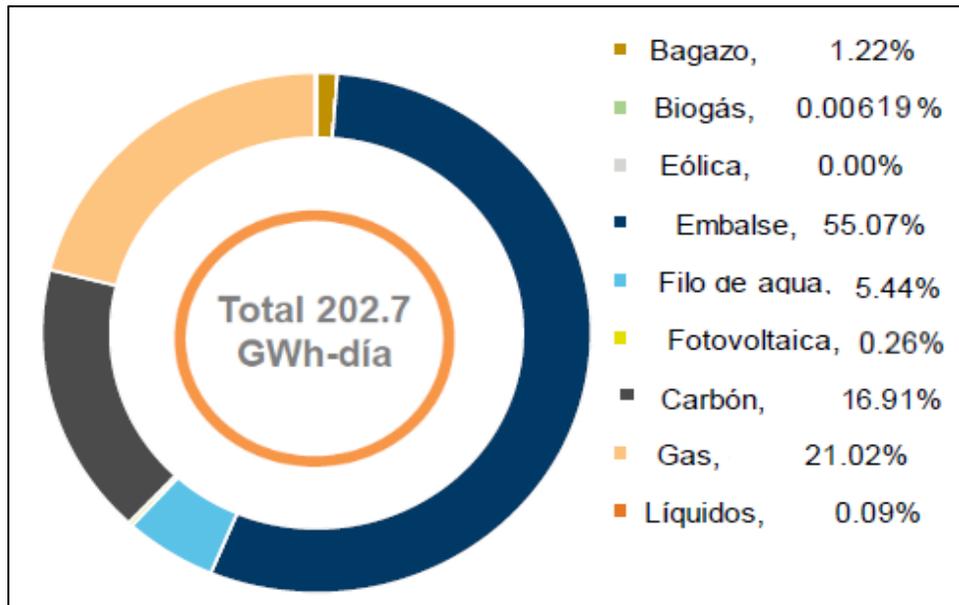


Figura 1. Generación Promedio Diaria de Energía Eléctrica (XM. Informe General del Mercado, Febrero 2020.)

Los recursos renovables por la gran aportación de las fuentes hídricas permiten que la canasta de generación sea en mayor porcentaje para las fuentes renovables con un 61.99%, dejando a las fuentes no renovables con el 38.01%. El biogás actualmente en la generación de energía eléctrica, tiene un aporte muy poco significativo, lo que permite concluir que hay una gran oportunidad en la generación de energía eléctrica a partir de la transformación de la biomasa en biocombustible. Según el reporte generado por la empresa XM, para el mes de Febrero, el biogás en Colombia sólo tuvo una aportación en la canasta de 0.00619% sobre el total de energía eléctrica generada, para ese mes, lo que indica que es una de las tecnologías con menos aportación a la matriz de generación eléctrica actual.

ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL CACTUS NOPAL EN COLOMBIA.

Tabla 1. Generación de EE por vector.

Subtipo	Gen. de ene-01-2020 hasta ene-31-2020 (GWh-día)	Gen. de feb-01-2020 hasta feb-29-2020 (GWh-día)	Participación a feb-29-2020 (%)	Variación de generación (%)
Bagazo	2.36	2.48	1.97% ↑	5.13%
Biogás	0.00	0.01	0.01% ↑	158.33%
Eólica	0.02	0.00	0.00% ↓	-100.00%
Embalse	116.11	111.61	88.83% ↓	-3.88%
Filo de agua	13.82	11.02	8.77% ↓	-20.26%
Fotovoltaica	0.50	0.53	0.42% ↑	5.19%

Fuente. XM. Informe General del Mercado, Febrero 2020.

Colombia se ha caracterizado por establecer una economía alrededor del desarrollo de los combustibles fósiles, lo que le ha permitido establecer y mantener una seguridad energética por muchos años. Esta está siendo amenazada por el agotamiento de los yacimientos petrolíferos maduros, y por la falta de inversión en campañas de exploración de nuevos yacimientos. Es por esto que buscar una alternativa eficaz para poder mantener y prolongar la seguridad energética está siendo el principal objetivo del país, objetivo que puede ser alcanzado con el desarrollo conjunto de las energías renovables no convencionales.

Según el Global Energy Architecture Performance Index Report de 2017 elaborado por World Economic Forum en colaboración con Accenture, clasifican a Colombia entre los 10 países con mayor potencial para la generación de energía a partir de fuentes no convencionales de energía renovable (3). Según el reporte Colombia se encuentra ubicada en la octava posición, detrás de España, dejándola como el país latinoamericano con mayor potencial en materia de energías renovables. La ubicación geográfica con la que cuenta Colombia, muy cerca de la línea del ecuador, sus dos mares y sus diferentes niveles térmicos le permiten tener ese gran potencial para el desarrollo de energías renovables convencionales y no convencionales como la energía hidráulica, la biomasa, la energía eólica, y la energía solar fotovoltaica.

ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL CACTUS NOPAL EN COLOMBIA.

1.2 BIOGÁS

El biogás es el gas obtenido a partir de la degradación de la materia orgánica (biomasa), principalmente bajo procesos de digestión anaeróbica. El gas obtenido bajo este proceso, y como pasa de igual forma en el gas natural fósil el principal componente es el metano (CH_4), que en conjunto con el dióxido de carbono (CO_2), ácido sulfhídrico (H_2S), nitrógeno, oxígeno (O_2) y el agua (H_2O) forman la mezcla del biogás. Dependiendo del origen y el tipo de materia orgánica empleada para la obtención del gas, el porcentaje de metano varía entre el 50% y el 75%, y el porcentaje de dióxido de carbono podría variar entre el 25% y 50% (4), siendo los principales componentes del biogás y dejando entre un 2% a 8% el contenido de las demás sustancias. El poder calorífico del biogás varía entre 19.7 y 23.3 MJ/Nm³ (5) y depende principalmente del porcentaje de metano presente en la mezcla.

El biogás es producido gracias a un proceso de descomposición de la materia orgánica por micro bacterias en ausencia de oxígeno, denominado digestión anaeróbica. Aunque las bacterias son el agente principal en la descomposición, pueden existir grupos tróficos superiores involucrados como el protozoo o los hongos anaeróbicos (6). El proceso de generación se da principalmente en cuatro pasos: hidrólisis, acidificación, producción de ácido acético y la producción de metano. Si el gas producido es llevado a un tratamiento en donde pasa por un proceso de desulfuración y deshidratación el biogás puede alcanzar porcentajes de metano de hasta 98%, dejándolo con propiedades muy similares a las del gas natural.

En la digestión anaeróbica se debe dar en un ambiente de condiciones óptimas, que permita a las bacterias la degradación eficiente de la materia orgánica. La digestión se debe dar en ausencia de aire para que sea un proceso anaeróbico, la temperatura dentro del reactor debe ser uniforme, se debe contar con un suministro óptimo de nutrientes, y el pH debe ser el óptimo y debe ser uniforme en todo el proceso.

ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL CACTUS NOPAL EN COLOMBIA.

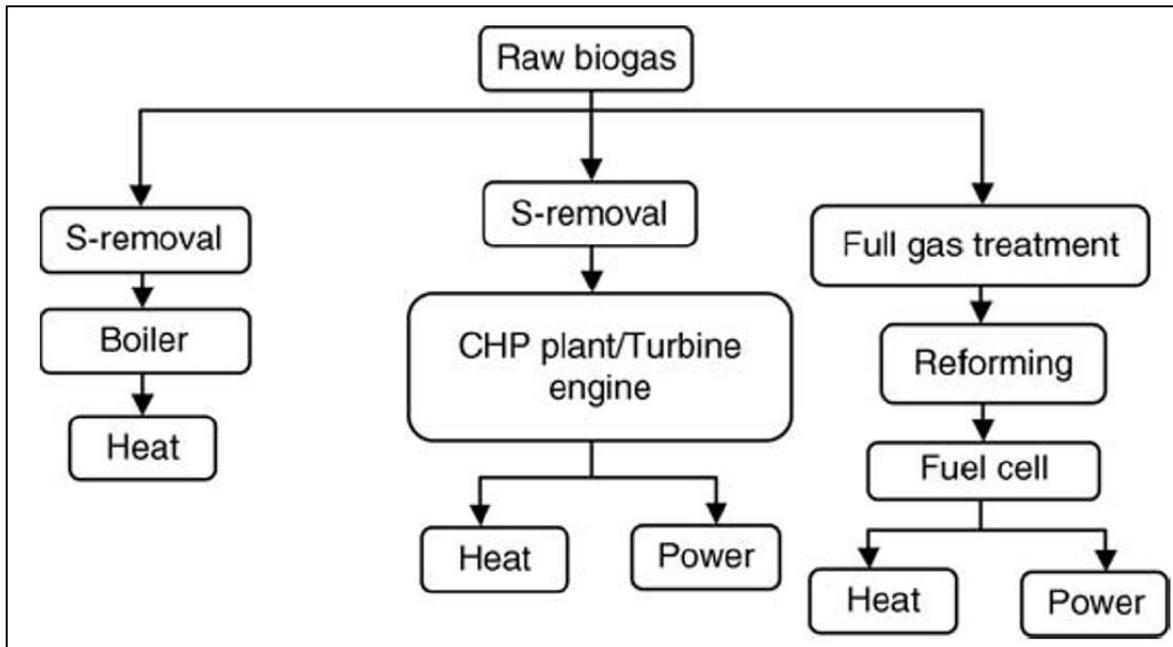


Figura 2. Aplicaciones del biogás (Generation of heat power from biogas for stationary applications)

El gas tratado puede ser convertido en electricidad o en calor por medio de unidades de cogeneración (CHP, por sus siglas en inglés), en el mismo punto donde la materia prima es generada, lo que ofrece beneficios de costo en materia de transporte. Las plantas de cogeneración suelen estar constituidas por motores alternativos, turbinas de gas o de vapor o si es el caso, motores dispuestos para utilizar como fuente primaria, biocombustibles. La electricidad es generada a partir de la transformación de la energía mecánica que ha sido previamente transformada de energía contenida en el combustible en energía mecánica y calor residual. En los sistemas de cogeneración usualmente se emplean motores de cuatro tiempos o motores diésel, pero el biogás puede ser usado en más aplicaciones, como lo son para impulsar motores o turbinas o como combustible en motores Stirling, turbinas de gas, pilas de combustible o una mezcla entre turbinas de gas y pilas de combustible.

El gas deshidratado y desulfurado, además de aplicaciones para la generación eléctrica y generación de calor, puede ser usado en todas las aplicaciones cotidianas que se le dan al gas natural, es decir como combustible para motores, con la ventaja que reducen las

ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL CACTUS NOPAL EN COLOMBIA.

emisiones de contaminantes a la atmosfera ya que es considerado como un biocombustible neutral en emisiones de CO₂, reduciendo la huella de carbono. Según la federación colombiana de biocombustibles, los biocombustibles ahorran entre el 74% y el 100% de las emisiones de CO₂ si se tiene en consideración todo su ciclo de vida, es decir desde la producción agrícola de la materia orgánica hasta la combustión del biogás en el motor, con una tasa de ahorro anual de emisiones equivalente a 2,5 millones de toneladas de CO₂ (7).

ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL CACTUS NOPAL EN COLOMBIA.

2. MARCO LEGAL DE COLOMBIA

Las energías renovables y en especial las energías renovables no convencionales son un tema que ha tenido poco desarrollo en la matriz energética colombiana, provocando que en la actualidad la matriz energética de Colombia, dependa en gran medida de fuentes de energía no renovables, como el carbón y combustibles fósiles y de fuente de energías renovables convencionales, como la hidráulica. Es así por lo que el sistema jurídico energético colombiano no incluye en la canasta energética a las energías renovables no convencionales como componente central, por cuanto la normativa nacional desde la ley 143 de servicios públicos de 1994, se ha enfocado principalmente en fomentar las energías renovables sin implementar grandes reformas estructurales al sistema que permitan hacer de las energías renovables el componente principal de la economía colombiana.

La regulación colombiana siempre ha tenido un gran enfoque al desarrollo económico, la preservación medioambiental y la eficiencia energética, en la que desde sus inicios ha tenido tanto actores públicos como actores privados.

2.1 ACTORES PUBLICOS

2.1.1 MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA (MME). Tiene como función principal el formular y adoptar las políticas dirigidas al aprovechamiento sostenible de los recursos mineros y energéticos para contribuir al desarrollo económico y social del país.

2.1.2 COMISIÓN DE REGULACIÓN DE ENERGÍA Y GAS (CREG). Prepara proyectos de ley para someter a la consideración del gobierno, y recomendarle la adopción de los decretos reglamentarios que se necesiten para regular la prestación de los servicios públicos domiciliarios de energía eléctrica, gas combustible y servicios públicos de combustibles líquidos, de manera técnica, independiente y transparente para así promover el desarrollo de estos sectores.

ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL CACTUS NOPAL EN COLOMBIA.

2.1.3 UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA (UPME). Es la unidad administrativa especial del orden nacional, de carácter técnico, encargada de planear de forma integral, permanente y coordinada el desarrollo y aprovechamiento de los recursos mineros y energéticos, con los agentes del sector. De igual forma, producir y divulgar la información requerida para la formulación de política y toma de decisiones.

2.1.4 INSTITUTO DE PLANIFICACIÓN Y PROMOCIÓN DE SOLUCIONES Energéticas para las Zonas No Interconectadas (IPSE). Ejecuta los lineamientos y las políticas, a través de los planes, programas y proyectos de infraestructura energética, incentivando los procesos productivos, elevando la calidad de las poblaciones de su jurisdicción, de manera tecnológica económica, ambienta y socialmente sostenible.

2.2 ACTORES PRIVADOS

2.2.1 CORPORACIÓN PARA LA ENERGÍA Y EL MEDIOAMBIENTE (CORPOEMA). Promueve la eficiencia energética y el aprovechamiento sostenible de los recursos naturales en todas las actividades económicas, implementando proyectos destinados a mejorar la productividad de las empresas.

2.2.2 SER COLOMBIA. Es la asociación de Energías Renovables encargada de representar los intereses de los miembros ante las dependencias y entidades del sector público, asociaciones, cámaras y organismos privados, naciones e internacionales.

2.2.3 ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE GENERADORES DE ENERGÍA ELÉCTRICA (ACOLGEN). Participan en la formulación de políticas públicas y regulatorias, que buscan promover la competitividad y eficiencia del sector de generación de energía eléctrica. De igual forma participan activamente en el desarrollo e implementación de los nuevos marcos regulatorios y legales del sector eléctrico.

2.2.4 ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE DISTRIBUIDORES DE ENERGÍA ELÉCTRICA (ASOCODIS). Es la entidad que congrega a las principales empresas distribuidoras y

ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL CACTUS NOPAL EN COLOMBIA.

comercializadoras de energía eléctrica que atienden usuarios regulados y no regulados a lo largo y ancho de Colombia.

2.2.5 ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE ENERGÍAS RENOVABLES (ACER). Establece y refuerza las colaboraciones entre los miembros de la comunidad de las energías renovables nacional e internacional, incluyendo lo relacionado con los aspectos académico, científico, industrial y tecnológico.

2.3 EVOLUCIÓN DEL MARCO LEGAL DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES EN COLOMBIA

Colombia tuvo un inicio tardío con respecto al desarrollo de las energías renovables, pero desde que inició ha tenido una evolución significativa, lo que ha permitido que al día de hoy tenga una reglamentación con gran incentivo hacia el desarrollo de proyectos de energías renovables. Colombia dio su primer gran paso con respecto a la reglamentación de las energías renovables no convencionales en el año 2001, con la llamada ley del Etanol Carburante y su segundo gran paso lo da en el año 2004 con la denominada ley del biodiesel. Gracias a estas dos reglamentaciones se desarrollaron proyectos de biocombustibles exitosos, llevando el primer gran caso de éxito al año 2005, en donde el 3 de octubre del mismo año se pone en producción etanol a base de caña de azúcar y posteriormente la producción de biodiesel en el año 2008 a base de aceite de palma (8).

ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL CACTUS NOPAL EN COLOMBIA.

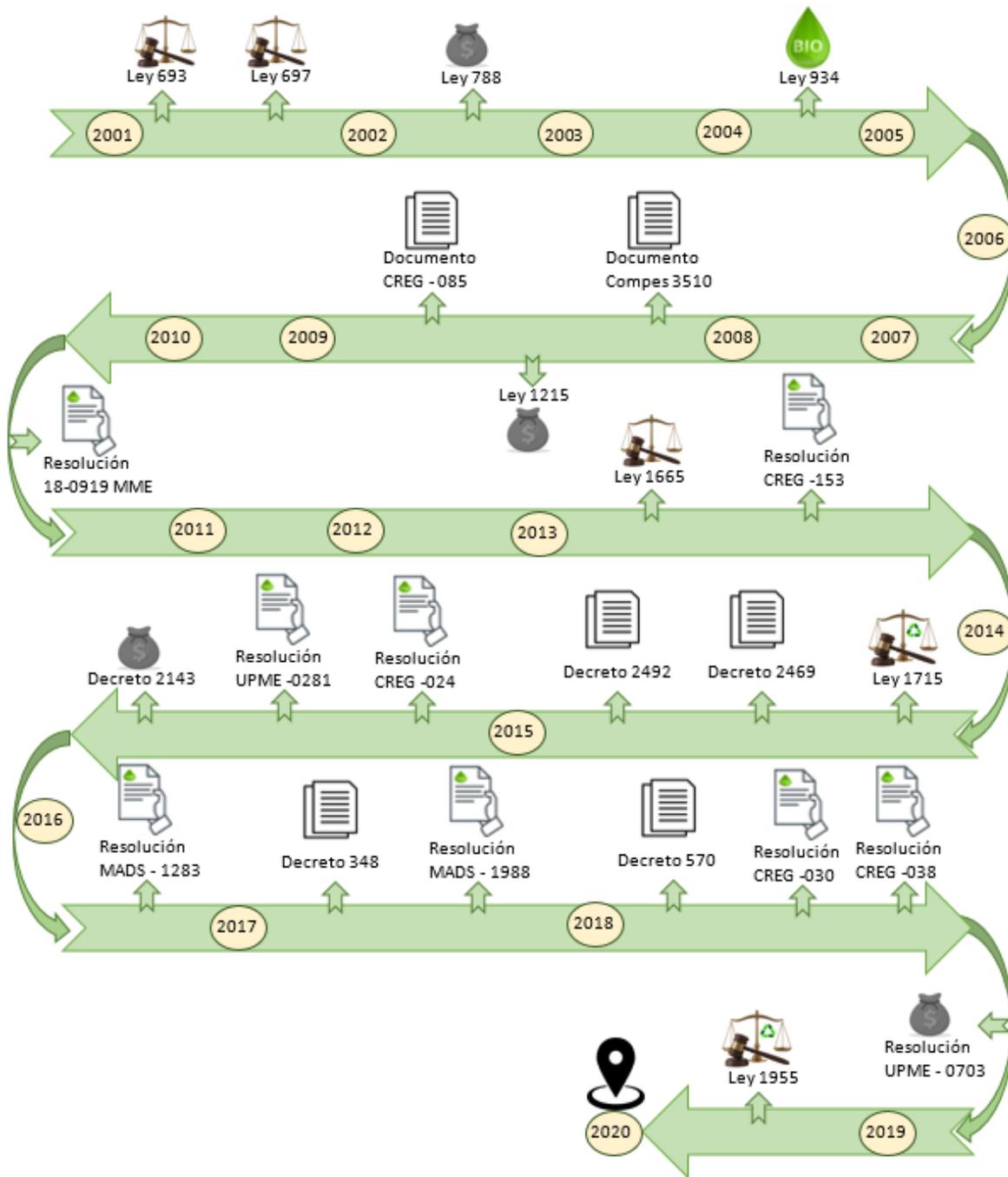


Figura 3. Evolución del Marco Legal en Colombia (Elaboración propia)

ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL CACTUS NOPAL EN COLOMBIA.

2.3.1 LEY 693 DE 2001. La denominada ley del Etanol Carburante, por el cual se dictan normas sobre el uso de alcoholes carburantes, se crean los estímulos para su producción, comercialización y consumo. En donde las gasolinas, diésel y aceite combustible para motores (ACPM) que se utilicen en el país deberán contener componentes oxigenados como los alcoholes, en la cantidad y calidad establecido por el Ministerio de Minas y Energías.

2.3.2 LEY 697 DE 2001. Ley mediante la cual se fomenta el uso racional y eficiente de la energía como asunto de interés social, público y de conveniencia nacional. De igual forma se promueve la utilización de energías alternativas, para asegurar el abastecimiento energético pleno y oportuno.

2.3.3 LEY 788 DE 2002. Mediante la cual se brinda la exención al impuesto de la renta sobre los ingresos derivados de la venta de energía eléctrica generada a partir de fuentes renovables como los residuos agrícolas, la energía eólica y la biomasa.

2.3.4 LEY 934 DE 2004. Se estimula la producción y comercialización de biocombustibles de origen vegetal o animal para el uso en Motores diésel. De igual forma se definen los biocombustibles y los productos que podrían ser considerados como tal.

2.3.5 DOCUMENTO CONPES 3510. Por el cual se establecieron los lineamientos de política orientada a promover la producción sostenible de Biocombustibles en Colombia, aprovechando las oportunidades de desarrollo económico y social que ofrecen los mercados emergentes de biocombustibles para aquel entonces. De esa manera se busca expandir los cultivos de biomasa conocido en el país y diversificar la canasta energética, dentro de un marco de producción eficiente y sostenible que permita competir en el mercado nacional e internacional.

2.3.6 LEY 1215 DE 2008. Se adoptaron las medidas en materia de generación de energía eléctrica, exonerando a los cogeneradores a pagar la contribución de 20% sobre su propio

ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL CACTUS NOPAL EN COLOMBIA.

consumo de energía proveniente de la energía generada a partir de su proceso de cogeneración.

2.3.7 DOCUMENTO CREG-085 DE 2008. Se establecieron los requisitos y condiciones técnicas para los procesos de producción combinada de energía eléctrica y térmica para acogerse a la Ley 1215 de 2008 de cogeneración.

2.3.8 RESOLUCIÓN 18-0912 DE 2010. Por el cual se adoptó el Plan de Acción Indicativo de 2010 a 2015 para desarrollar el programa de Uso Racional y Eficiente y demás formas de Energía No Convencionales (PROURE), que contribuirá a asegurar el abastecimiento energético pleno y oportuno, la competitividad económica colombiana, la protección al consumidor y la promoción del uso de energías no convencionales de manera sostenible en el ambiente y los recursos naturales.

2.3.9 LEY 1665 DE 2013. En el cual se aprobó el estatuto de la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA), que buscaba promover la implantación y el uso generalizado y reforzados de las energías renovables con objeto de lograr un desarrollo sostenible. El estatuto fue inspirado en el convencimiento de que las energías renovables ofrecen oportunidades incalculables para abordar y mitigar de forma gradual los problemas derivados de la seguridad energética y la inestabilidad de los precios de la energía.

2.3.10 RESOLUCIÓN 153 DE 2013 – CREG. Mediante la cual se estableció el reglamento sobre los contratos de suministro de combustible de origen agrícola para el cargo por confiabilidad para las plantas de cogeneración.

2.3.11 LEY 1715 DE 2014. Por medio de la cual se reguló la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional. La Ley tiene como principal objetivo promover el desarrollo y la utilización de las fuentes no convencionales de energía, principalmente aquellas de carácter renovables, en el sistema energético nacional, mediante su integración al mercado eléctrico, su participación en las zonas no interconectadas y en otros usos energéticos como medio necesario para el desarrollo

ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL CACTUS NOPAL EN COLOMBIA.

económico sostenible, la reducción de gases de efecto invernadero y la seguridad del abastecimiento energético. De igual forma la ley busca promover la gestión eficiente de la energía, comprendiendo tanto la respuesta a la demanda, como la eficiencia energética.

La finalidad de la ley fue establecer el marco regulatorio y los instrumentos que permitieran la promoción de las fuentes no convencionales de energía renovable, fomentando la inversión, investigación y desarrollo de tecnologías limpias para producción de energía, la eficiencia energética y la respuesta a la demanda, en el marco de la política energética colombiana. A su vez se orientan las políticas públicas y se definen los instrumentos tributarios, arancelarios, contables y de participación en el mercado energético colombiano. Se establecieron los mecanismos de cooperación y coordinación entre el sector público, el sector privado y los usuarios para el desarrollo de fuentes no convencionales de energía renovable.

2.12.12 DECRETO 2469 DE 2014. En este decreto expedido por el Ministerio de Minas y Energías se establecieron los lineamientos de política energética en materia de entrega de excedentes de autogeneración, estableciendo una simetría en las condiciones de participación en el mercado mayorista entre los generadores y auto-generadores a gran escala.

2.12.13 DECRETO 2492 DE 2014. Decreto expedido por el Ministerio de Minas y Energías en donde se adoptaron las disposiciones en materia de implementación de mecanismos de respuesta de la demanda, estableciendo lineamientos tendientes a promover la gestión eficiente de la energía.

2.3.14 RESOLUCIÓN 024 DE 2015 – CREG. Expedida desde la comisión de regulación de energía y gas, y mediante la cual se regula la actividad de autogeneración a gran escala en el sistema interconectado nacional (SIN). Se define a un generador de gran escala como aquel en donde la potencia generada máxima supera el límite para los auto-generadores a pequeña escala establecido por la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME).

ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL CACTUS NOPAL EN COLOMBIA.

2.3.15 RESOLUCIÓN 281 DE 2015 – UPME. Por la cual se definen los límites máximos de potencia de la autogeneración a pequeña escala. Se establece como límite máximo de potencia de autogeneración para pequeña escala en 1 MW, y que corresponde a la capacidad instalada del sistema de generación de energía.

2.3.16 DECRETO 2143 DE 2015. Se modifican los lineamientos para la aplicación de los incentivos establecidos en la Ley 1715 de 2014. Donde los contribuyentes declarantes del impuesto sobre la renta y complementarios que realicen directamente nuevas erogaciones en investigación, desarrollo e inversión en el ámbito de la producción y utilización de energía a partir de fuentes no convencionales de energía o gestión eficiente de la energía, tendrán derecho a deducir hasta el cincuenta por ciento (50%) del valor total de las inversiones en un periodo no mayor a 5 años. De igual forma se excluyen de IVA la compra de equipos, elementos y maquinaria nacional o importada, o la adquisición de servicios dentro o fuera del territorio nacional que se destinen a nuevas inversiones y pre inversiones para la producción y utilización de energía a partir de fuentes no convencionales.

2.3.17 RESOLUCIÓN 1283 DE 2016 - MADS. Fue la resolución expedida por el Ministerios de Ambiente y Desarrollo Sostenible mediante la cual se establecieron los procedimientos y requisitos para la expedición de las certificaciones de beneficio ambiental por nuevas inversiones en proyectos de fuentes no convencionales de energías renovables y gestión eficiente de la energía, que permiten obtener los beneficios tributarios.

2.3.18 DECRETO 348 DE 2017. Se establecieron nuevos lineamientos de política pública en materia de gestión eficiente de la energía y entrega de excedentes de autogeneración a pequeña escala. Donde los operadores de red sólo podrán negar la conexión de auto generadores a pequeña escala por razones de carácter técnico debidamente sustentadas. Los generadores con capacidad instalada menor o igual a 0.1MW no tienen la obligación de suscribir un contrato de respaldo de disponibilidad de capacidad de red. Para el caso de auto-generadores que utilicen fuentes no convencionales de energía renovables, los

ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL CACTUS NOPAL EN COLOMBIA.

excedentes que entreguen a la red de distribución se reconocerán mediante un esquema de medición bidireccional, como créditos de energía.

2.3.19 RESOLUCIÓN 1988 DE 2017. Esta resolución del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible tuvo como objeto, el establecer las metas ambientales y de eficiencia energéticas para el año 2022.

Sector	Meta de ahorro de energía a 2022 (%)
Transporte	5,49
Industria	1,71
Terciario	1,13
Residencial	0,73

Figura 4. Metas de Ahorro Energético a 2022. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Resolución 1988 de 2017. Artículo 1)

Las medidas que se toman para cumplir los objetivos son: Para el sector del transporte, la reconversión a gas natural vehicular en transporte público de pasajeros y el uso de transporte eléctrico en las principales ciudades del país. Para el sector industrial, se tomaron medidas de eficiencia energética en energía eléctrica, en combustibles sólidos para calor directo o indirecto y en gas natural. En el sector terciario se establecen medidas de eficiencia energética en energía eléctrica, mejora en el diseño, la construcción y la adecuación arquitectónica de edificaciones e implementos modernos de medición. Por ultimo en el sector residencial se promueven medidas de eficiencia energética en iluminación, y en las características de las edificaciones.

2.3.20 DECRETO 570 DE 2018. Mediante el cual se adiciona al Decreto Único Reglamentario del Sector Administrativo de Minas, lo relacionado con los lineamientos de política pública para la contratación a largo plazo de proyectos de generación de energía eléctrica. A su vez tiene como objetivo fortalecer la resiliencia de la matriz de generación de energía eléctrica ante eventos de variabilidad y cambio climático a través de la

ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL CACTUS NOPAL EN COLOMBIA.

diversificación del riesgo, promoviendo la competencia y aumentando la eficiencia en la formación de precios a través de la contratación de largo plazo de proyectos de energía eléctrica. Se promueve la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero del sector de generación eléctrica de acuerdo con los compromisos adquiridos por Colombia en la Cumbre Mundial de Cambio Climático en París (COP21).

2.3.21 RESOLUCIÓN 030 DE 2018. Por la cual se regulan las actividades de autogeneración a pequeña escala y generadores entre 1MW y menores o iguales a 5MW y de generación distribuida en el Sistema Interconectado Nacional. Donde se puede resaltar principalmente que la energía entregada a la red debe ser igual o menor al 15% de la capacidad nominal del circuito, transformador o subestación donde se solicita el punto de conexión. La cantidad de energía en una hora que se puede entregar, para un sistema de producción de energía distinto a energía fotovoltaica sin capacidad de almacenamiento, conector al mismo circuito o transformador del nivel de tensión 1, no debe superar el 50% de promedio anual de las horas de mínima demanda diaria de energía registradas para el año anterior al de solicitud de conexión.

2.3.22 RESOLUCIÓN 038 DE 2018. Mediante la cual se regulan los aspectos operativos y comerciales para permitir la integración de la autogeneración a pequeña y gran escala en las zonas no interconectadas. Se clasifican los sistemas de distribución de las zonas no interconectada por niveles, en función de la tensión nominal de operación, donde el nivel 1 corresponde a sistemas con tensión nominal menor a 1kV, nivel 2 mayor o igual a 1kV y menor a 30kV y nivel 3 mayor o igual a 30kV.

2.3.23 RESOLUCIÓN 703 DE 2018. Por el cual se establecen los procedimientos y los requisitos para obtener la certificación que avala los proyectos de fuentes no convencionales de energía, con miras de obtener el beneficio de la exclusión del IVA y la exención de gravamen arancelario. Para obtener la certificación se deben cumplir todos los requisitos estipulados por la UPME, y que avalará que el proyecto está siendo o será

ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL CACTUS NOPAL EN COLOMBIA.

desarrollado utilizando fuentes no convencionales de energía. Esta certificación emitida por la UPME, es indispensable para obtener la certificación de beneficio ambiental ante la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA). La certificación emitida por la UPME, tendrá una vigencia de 24 meses, a partir de la fecha de su expedición.

2.3.24 LEY 1955 DE 2019. Mediante la cual se expide el plan nacional de desarrollo 2018 – 2022, denominado “Pacto por Colombia, Pacto por La Equidad”. El plan tiene como objetivo principal establecer las bases de legalidad, emprendimiento, y equidad que permitan lograr la igualdad de oportunidades para todos los colombianos, en concordancia con un proyecto a largo plazo con el que Colombia alcance los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2030.

Con base en la normativa anteriormente mencionada se puede concluir que el proyecto tiene beneficios tributarios importantes, como lo son la deducción especial en la determinación del impuesto sobre la renta, en donde se tendrá derecho a deducir hasta el 50% del valor de la inversión realizada, por los 5 años siguientes al año gravable en que se haya hecho la inversión. Para obtener este beneficio, se deberá obtener una certificación de beneficio ambiental expedida por el ministerio de ambiente y ser debidamente certificada como tal por el Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible

Depreciación acelerada, gasto que la ley permite que sea deducible al momento de declarar impuesto sobre la renta, por un porcentaje valor del activo que no puede superar el 20% anual. La tasa podrá ser variada anualmente, con previa comunicación a la DIAN, siempre y cuando no se exceda el límite señalado anteriormente. Exclusión del IVA, por la compra de bienes y servicios o equipos ya sean de procedencia nacional o internacional.

Exención de gravámenes arancelarios por la importación de equipos, maquinaria, materiales e insumos destinados exclusivamente para labores dentro del proyecto. Dicha exención debe ser solicitada a la DIAN con un mínimo de 15 días hábiles antes de la

ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL CACTUS NOPAL EN COLOMBIA.

importación de la maquinaria en donde se certifique la finalidad de los equipos con la certificación emitida por el Ministerios de Minas y Energía.

2.4 VENTA DE ENERGÍA ELECTRICA

Los lineamientos para la venta de energía eléctrica en el Sistema Interconectado Nacional, vienen dados por la resolución 086 de 1996, donde se reglamentó la actividad de plantas menores a 20 MW. A partir de ese momento se estableció que los generadores con potencia nominal menor a 20MW podrían vender la energía directamente a una comercializadora sin convocatoria pública, siempre y cuando no exista vinculación económica entre el comprador y el vendedor. En este caso, el precio de venta será única y exclusivamente el precio en la Bolsa de Energía en cada una de las horas correspondientes.

De igual forma la energía generada puede ser ofrecida a una comercializadora que atienda al mercado regulado, por medio de las convocatorias públicas que se realicen. En este caso la adjudicación se efectúa por mérito de precio. Como última opción los generadores de pequeña escala pueden vender la energía a precios pactados libremente a usuarios no regulados, generadores o comercializadores que destinen dicha energía a la atención exclusiva de usuarios no regulados.

ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL CACTUS NOPAL EN COLOMBIA.

3. BIOMASA

El nopal ha sido empleado como fruta para el consumo humano por mucho tiempo, pero desde hace unos pocos años atrás e impulsado por el estado de México, ha tenido un desarrollo y una incursión en la industria energética a nivel global, ya que gracias a los proyectos desarrollados se ha puesto en evidencia el gran potencial que tiene esta planta para la generación de biocombustible.

3.1 LOCALIZACIÓN DEL PROYECTO

La materia prima, que en este caso corresponde a materia lignocelulosa proveniente del nopal se obtendrá de la plantación experimental seleccionada para el estudio. La plantación se encuentra ubicada en el departamento de Cundinamarca en el centro del país, en inmediaciones de la represa El Guavio cerca de la capital colombiana Bogotá. La zona tiene coordenadas de $4^{\circ}44' 27''$ N $73^{\circ} 34' 22''$ W y presenta una elevación de 1.619 metros sobre el nivel del mar.

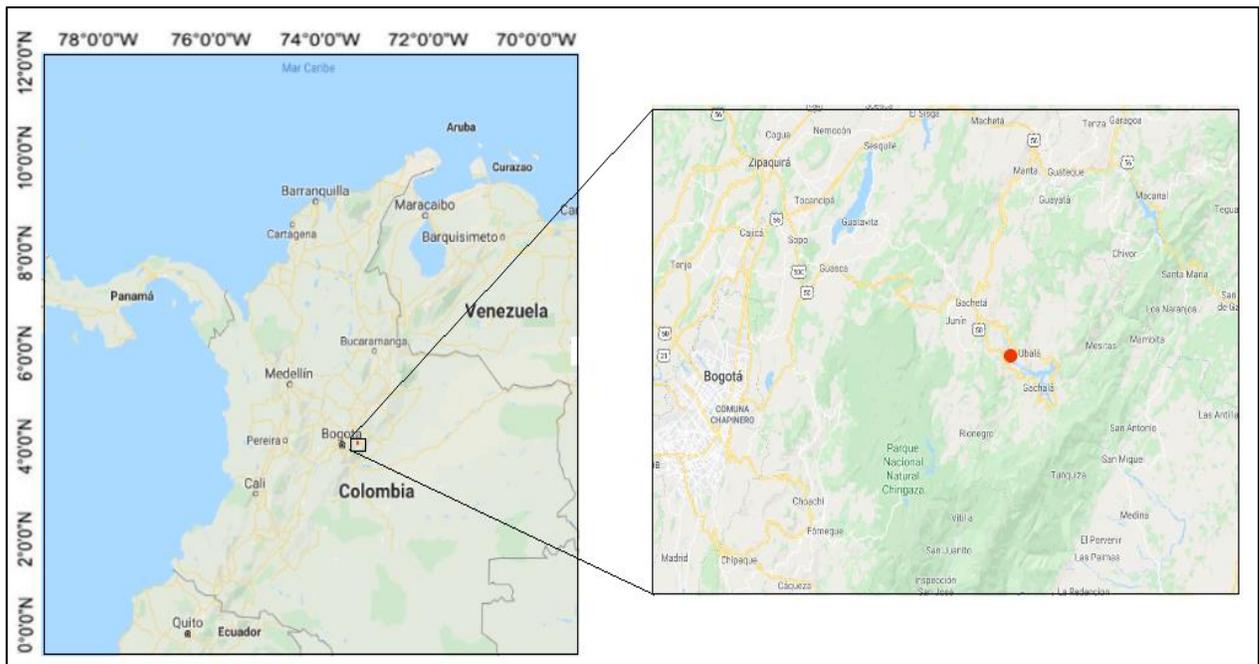


Figura 5. Localización del terreno

ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL CACTUS NOPAL EN COLOMBIA.



Figura 6. Vista 3D de la localización del proyecto



Figura 7. Plano de situación

ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL CACTUS NOPAL EN COLOMBIA.

La parcela cuenta con un área aproximada de 230 ha, (ver figura 8) y un perímetro de 9.630 m. Para el proyecto se ha denominado la zona de estudio como CA-01 y la cual inicialmente, para los estudios de caracterización de la biomasa a nivel de laboratorio se realiza una plantación de 10 Ha, posteriormente y como fase de productividad a mediana escala, se expande la plantación hasta 100 Ha en el segundo cuatrimestre del año y dejando la posibilidad de aumentar hasta 200 Ha el área de cultivo en 1 año.



Figura 8. Área de plantación

El acceso a la parcela se debe hacer por la Carretera 50 Bogotá – Guatavita, por lo que una de las formas más fáciles de llegar es partiendo desde la capital Colombiana, en sentido Gama, Cundinamarca. Aproximadamente a 20 km del predio se encuentra ubicada la Subestación Gacheta- Junín CODENSA. En una primera aproximación, se va a analizar la viabilidad técnica de conectarse a dicha estación.

ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL CACTUS NOPAL EN COLOMBIA.

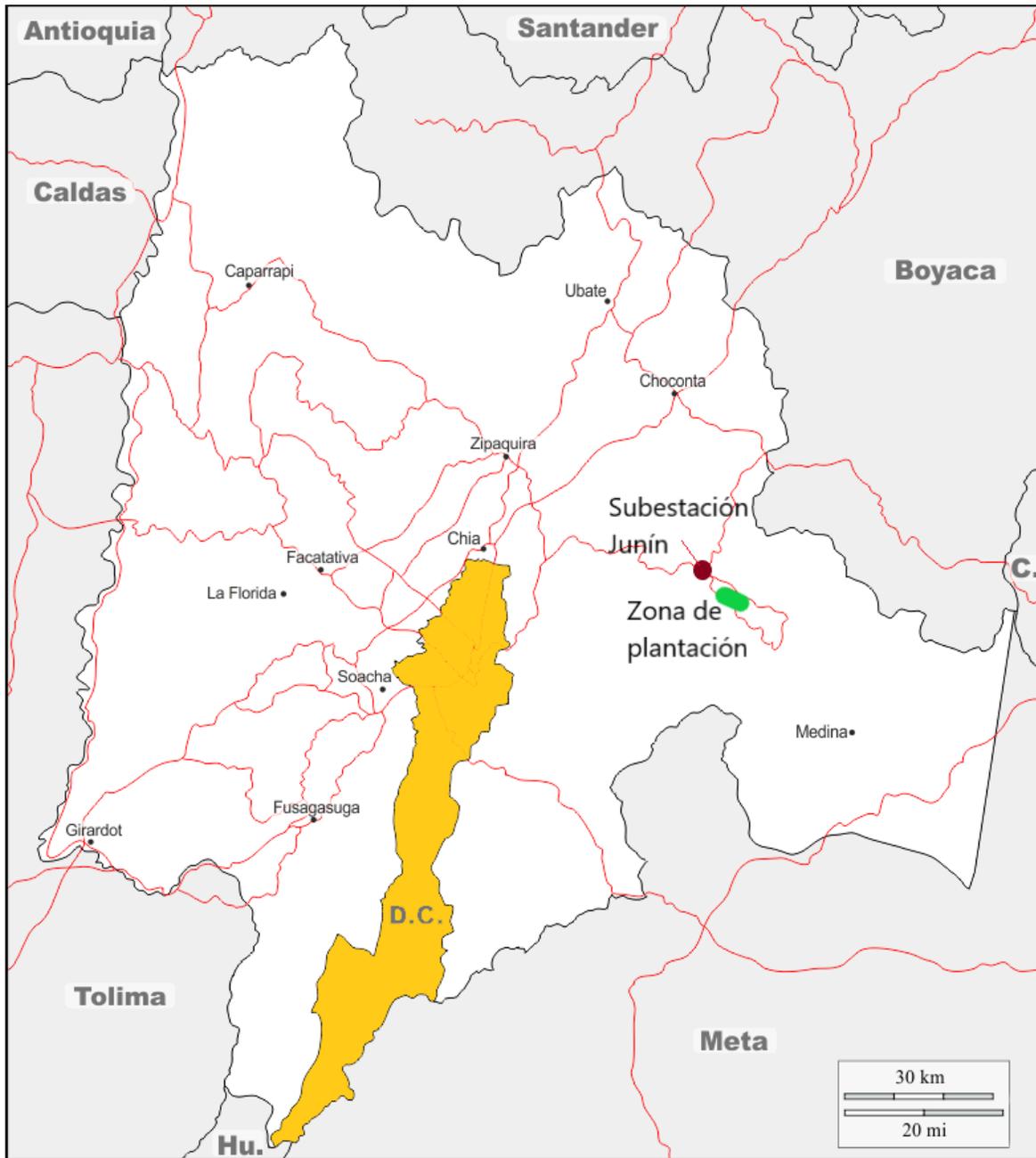


Figura 9. Localización de la Planta y Subestación, vista General

ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL CACTUS NOPAL EN COLOMBIA.

3.2 CARACTERÍSTICAS

El nopal (*Opuntia ficus-indica*), también conocido como la pera de cactus o el higo chumbo, es cultivado en muchas partes alrededor del mundo, tanto en zonas áridas como en zonas semi-áridas, ya que por su fácil adaptación a los mecanismos de ayuda para su cultivo, puede tolerar una amplia gama de condiciones climáticas (9).

El nopal se caracteriza por tener una altura aproximada de 3 a 5 m de alto, su tronco se va volviendo leñosos a medida que pasa el tiempo y puede llegar a alcanzar altura de entre 20 cm a 50 cm de diámetro en periodos de tiempo muy largos. Para un periodo de producción de seis meses el tronco llega a medir aproximadamente 20 cm de diámetro y genera ramas constituidas por pencas o cladodios, de forma aplanada que varía en medidas aproximadas entre 30 cm a 60 cm de largo, entre 20cm a 40 cm de ancho y de 2 cm a 3 cm de espesor. Sus ramas están formadas por cladodios de color verde opaco con areolas espinosas. Las pencas están recubiertas por una cutícula del tipo lipídica, con intercalaciones de estomas, los cuales durante el día permanecen cerrados.



Figura 10. OPUNTIA FICUS- INDICA. (Anexo 2. Plant Production and Protection Paper 169)

ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL CACTUS NOPAL EN COLOMBIA.

Opuntia ficus, tiene algunas ventajas sobre otro tipo de cultivos empleados para la generación de biogás, como lo es la eficiencia en el uso del agua, en donde el nopal presenta una eficiencia de tres veces mayor en este proceso sobre las plantas de tipo C₄ como el maíz o la caña de azúcar (10), empleadas usualmente para la producción de biocombustibles. Las plantas pertenecientes al ciclo de Calvin 4 conocidas como C₄ son aquellas que pueden reducir al mínimo la fotorrespiración separando la fijación inicial de CO₂ al del ciclo de Calvin físicamente, al realizar estos pasos en tipos de células diferentes.

La fotorrespiración es una vía metabólica derrochadora que ocurre cuando la enzima RubisCo del ciclo Calvin actúa sobre el oxígeno en vez del dióxido de carbono. Pero la gran ventaja del nopal es que además de pertenecer al grupo de plantas C₄, se pueden clasificar dentro de las plantas CAM, siendo así una de las pocas especies cultivables que tiene el metabolismo Acido de las Crasuláceas. Este tipo de plantas reducen al mínimo la fotorrespiración y tienen un uso de agua más eficiente mediante la separación de las reacciones dependientes de luz y el uso de CO₂ en el ciclo Calvin en el tiempo, entre el día y la noche. Por la noche, abren sus estomas para que el CO₂ se difunda en las hojas y durante el día mantienen sus estomas cerrados, pero llevan el proceso de fotosíntesis. Esto les permite tener un uso muy eficiente del agua ya que por la noche, cuando la humedad tiende a subir y la temperatura a bajar es cuando abren sus estomas permitiéndoles reducir la pérdida de agua de las hojas.

Este tipo de beneficios hacen al nopal una fuente de generación de biogás altamente competitivo con los cultivos convencionales, ya que no sólo tienen un valor energético alto, sino que reducen el consumo de agua y ayudan a combatir el cambio climático ya que por su alto consumo de CO₂ durante la noche, pueden llegar a aportar beneficios considerables en esta materia.

ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL CACTUS NOPAL EN COLOMBIA.

3.2.1 PROCESO DE CULTIVO

Como medida inicial para el proceso de cultivo se recomienda realizar una limpieza exhaustiva del terreno, donde se involucren arbustos no deseados, hierbas o restos de cosechas pertenecientes a cultivos anteriores. Para esta operación es recomendable el uso de maquinaria específica para este fin como el uso de tractor y arado, y posteriormente operaciones de rastra.

Una vez el terreno se encuentra en condiciones óptimas, se establecen los espaciamientos mínimos entre pencas y se inicia el trazado de camas. Para este tipo de plantación se recomienda una distancia entre 25 a 35 cm de distancia entre plantas y entre 70 cm y 1 metro de distancia entre surcos, contados desde el centro del cladodio.



Figura 11. Preparación del terreno y acolchado (Zitácuaro, Michoacán. Nopalimex. El oro verde de México)

Con los lineamientos definidos se inicia el arado del terreno a una profundidad entre 25 cm a 30 cm, con el fin de eliminar la capa superficial del suelo en donde usualmente se encuentran las plagas y nematodos. El proceso de plantación del nopal consiste en un proceso simple, el mismo que se emplea en diferentes cultivos. Se crea el hoyo y se coloca la penca de *Opuntia Ficus* de forma perpendicular para posteriormente recubrirla de 10 cm a 15 cm del cladodio. Es recomendable aplicar abono mineralizado o hecho a base de

ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL CACTUS NOPAL EN COLOMBIA.

composta a un ratio de 100 ton/ha. La penca debe ser virgen de 6 meses a 1 año con sus yemas periferales intactas y debe estar previamente tratada, para que tenga una mayor longevidad.

El cuidado del cultivo recae principalmente en el proceso de poda, por lo que la técnica empleada debe garantizar el cuidado de la planta. El tiempo de cosecha tarda entre 4 a 5 meses, por lo que en un año se tendrían 2 cosechas. El proceso de recolección se realiza de manera manual, cortando las pencas superiores, sin afectar los brotes de renuevo que pudiesen estar generándose. Una vez hecha la recolección, las pencas son almacenadas para pasar por un proceso de molienda, para finalmente ser dispuesta como materia prima del biodigestor.

3.2.2 PRODUCTIVIDAD

Para el proyecto se estima una productividad teórica de 100 toneladas / ha / año y una generación de biogás de 40 Nm³ por tonelada, por lo que se producirían hipotéticamente 4,000 m³ de biogás/ha/año. Sin embargo, se han registrado eficiencias mucho más altas, como el caso en Michoacán, México, en donde se han citado rendimientos de nopal de 800t/ha/año, logrando una productividad máxima de biogás y energía de 32,000 m³/ha/año y 56MWh/año y una potencia de 7 kW/ha.

3.2.3 VALOR ENERGÉTICO

La productividad energética del nopal, depende principalmente de dos factores: Del rendimiento del cultivo en toneladas por hectárea de superficie cosechada y del rendimiento del biogás, que está directamente ligado a su contenido de metano. El nopal tiene un rendimiento energético alto que puede ser comparado con los cultivos empleados en Europa para la producción de biogás expresados en función de la cantidad de materia biodegradable, conocidos como sólidos volátiles.

ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL CACTUS NOPAL EN COLOMBIA.

Como ejemplo se tiene el maíz que tiene valores entre $205 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{tonelada}$ de sólidos volátiles y $450 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{t sv}$, o como la cebada que tiene valores entre $353 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{t sv}$ y $658 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{t sv}$ (11). El nopal por su parte, y según los estudios de laboratorios realizados por el Instituto de Investigaciones Eléctricas de México, ha alcanzado una producción entre $350 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{t sv}$ y $450 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{t sv}$, equivalente a entre 30 y 40 m^3 de biogás por tonelada de nopal fresco.

4. PROCESO DE GENERACIÓN

En el siguiente capítulo se van a detallar los procesos involucrados en cada una de las etapas necesarias para la generación de energía eléctrica a partir del cactus Nopal. Es importante recalcar que el enfoque del proyecto está dirigido hacia la parte de generación de energía, por lo que los procesos involucrados en la materia prima quedan fuera del alcance del trabajo. Sin embargo estas etapas serán analizadas y justificadas con el fin de aportar argumentos a las decisiones tomadas en capítulos posteriores.

Un proyecto de generación de energía eléctrica a partir de biomasa tiene 6 grandes etapas (Ver figura 12), y la cuales se detallaran brevemente a continuación.

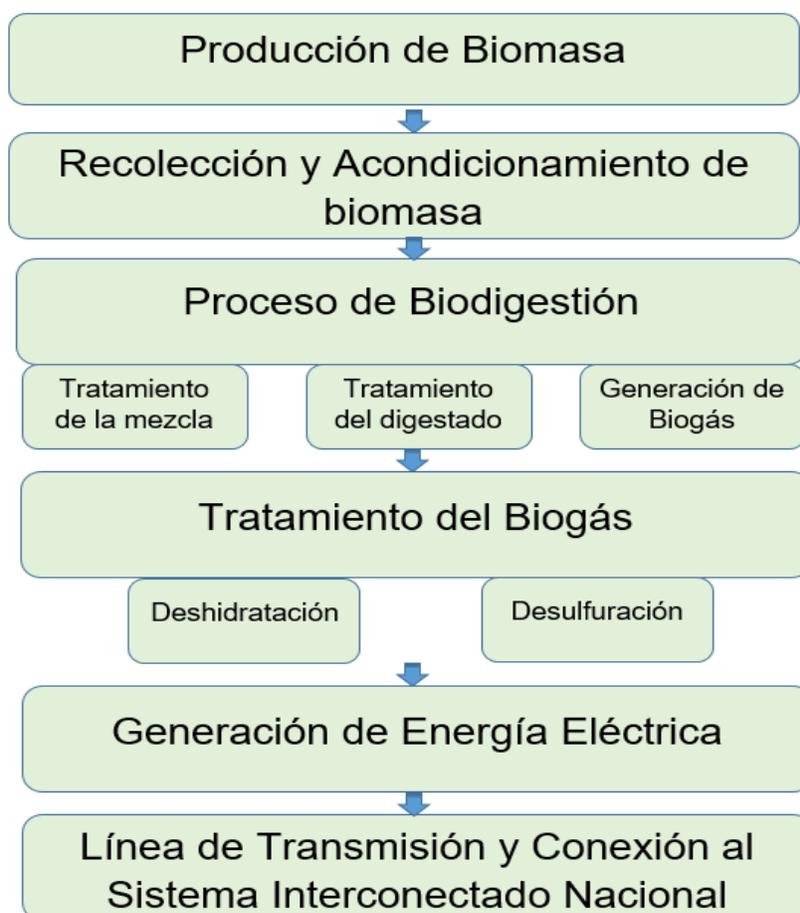


Figura 12. Etapas de la generación de energía a partir de biomasa

ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL CACTUS NOPAL EN COLOMBIA.

4.1 PRODUCCIÓN DE BIOMASA

La producción de biomasa en este tipo de proyectos, es un pilar fundamental para éxito del mismo, ya que las propiedades y las características obtenidas de la materia prima, van a determinar la calidad del biogás y especialmente el contenido de metano del mismo. Actualmente existen numerosas cantidades de materias primas con alto valor energético de las cuales se pueden obtener biocombustibles si es el caso o altos rendimientos en la generación de electricidad. Entre las más comunes se encuentran los cultivos de maíz, de caña de azúcar o de cebada.

En este proyecto se analizan los cladodios de *Opuntia Ficus Indica* como principal y única materia prima para la obtención de energía. La planta tiene muchas aplicaciones y sus productos principales son el nopal verdura, la tuna, que es conocida como la fruta, el nopal forrajero y el nopal para grana. El estudio se va a centrar en el nopal forrajero ya que es el que tiene las propiedades físico-químicas más óptimas para la obtención de biogás de calidad. De igual forma los demás no serán descartados ya que según estudios realizados en México los desechos de los demás productos pueden ser valorados ya que su bajo poder calorífico puede ser compensado con su bajo costo en una producción tecnificada (12).



Figura 13. Plantación de nopal (Nopalimex. El oro verde de México)

ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL CACTUS NOPAL EN COLOMBIA.

4.2 RECOLECCIÓN Y ACONDICIONAMIENTO

El proceso de recolección de la biomasa juega un papel fundamental en la proyección de la siguiente cosecha próxima a comenzar, ya que en esta se debe tener total control y cuidado sobre los retoños que ya pudiesen estar. La recolección se realiza de forma manual seleccionando las pencas que cumplan con las condiciones mínimas para ser transportadas y almacenadas en la siguiente estación del proceso.

La siguiente estación, es la estación de molido, ya que en el proceso de digestión anaeróbica el sustrato requiere una distribución granulométrica adecuada y en lo mayor posible homogénea, por lo que, para dicho fin se realiza la trituración de los cladodios. La entrega del sustrato al biodigestor es mediante régimen continuo, así que para garantizar el flujo, se requiere de un tanque de almacenamiento.



Figura 14. Visualización del sustrato antes de ser bombeado (Nopalimex. Biogás con nopal para vehículos en sustitución de combustibles fósiles)

ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL CACTUS NOPAL EN COLOMBIA.

4.3 BIODIGESTIÓN

Para que el proceso de digestión del sustrato se lleve de forma óptima y estandarizada, la mezcla debe estar previamente tratada, para ello, la materia prima es ingresada a un tanque de homogenización en donde en conjunto con el agua, se generará la mezcla de los sustratos a las condiciones óptimas de funcionamiento. Para asegurar este proceso los reactores cuentan con un sistema de agitación y un sistema de calefacción interna, que posteriormente y bajo el tiempo de retención mínimo establecido, se obtiene el biogás.

En el proceso de digestión de los sustratos, se genera una corriente de lodos estabilizados conocida como digestato, el cual contiene un alto porcentaje de humedad que oscila entre el 75% al 90% y un alto contenido de nutrientes. Una porción del digestato es deshidratado para reutilizar el agua presente en él, y la otra parte es empleada como fertilizante en la próxima cosecha

En un reactor de carga continua y diseñada para tratar una productividad media de 100 Ton/ha/año de Nopal, el tiempo de retención hidráulico teniendo en cuenta las dos fases iniciales oscilan entre 30 a 60 días. El interior del digestor debe mantener una temperatura de funcionamiento óptima, que oscila en el rango de 35 °C a 40 °C, para ello se utilizan intercambiadores de calor que son alimentados con el calor residual proveniente del motor de cogeneración. El control sobre el pH y temperatura debe ser con total rigor ya que una descompensación en alguno de estos dos factores tardaría entre 30 a 60 días en solucionarse.

El biogás obtenido por la digestión anaeróbica es una mezcla constituida principalmente por metano en mayor proporción, y otros gases como Dióxido de Carbono, Hidrógeno, Nitrógeno y Ácido Sulfhídrico, Ver tabla 2.

ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL CACTUS NOPAL EN COLOMBIA.

TABLA 2. COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL BIOGÁS OBTENIDO A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL NOPAL

Elemento	Cantidad (%)
CH ₄	58,0 %
CO ₂	36,0 %
H ₂ O	2,5 %
N ₂	0,5 %
H ₂	2,0 %
O ₂	0,5 %

Fuente. Elaboración propia con base en casos de éxito realizados en México y Chile.

4.4 TRATAMIENTO DEL BIOGÁS

El tratamiento del biogás dependerá principalmente del objeto final del mismo. El biogás puede ser empleado una vez sale del reactor en un motor de generación eléctrica con biogás una vez se haya pasado por una etapa de estabilización puede ser sometido a procesos de deshidratación y de desulfuración, para así disminuir el porcentaje de Sulfuro de Hidrógeno y aumentar el contenido de metano de la mezcla hasta el 98% gracias a la reducción del contenido de CO₂, asemejándolo a las propiedades del gas natural.

El nopal tiene una ventaja, y es que es una materia lignocelulosa obtenida a partir de un cultivo energético, por lo que la generación de ácido sulfúrico se considera nulo. En este caso de estudio, se realiza el dimensionamiento de las instalaciones y de la selección de equipos para una mezcla de biogás, constituida principalmente por metano hasta un 58% y seguida de CO₂ con un 36% de contenido sobre la composición total de gas, por lo que las planta de tratamiento como lo deshidratación y desulfuración no son necesarias.

ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL CACTUS NOPAL EN COLOMBIA.

4.5 GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

El gas obtenido del proceso de digestión anaeróbica, es sometido a pruebas de composición química, para comprobar que los porcentajes de las sustancias presentes en la mezcla estén en el rango previamente establecido y así garantizar el funcionamiento óptimo de la planta de generación.

La planta de generación consta principalmente de un motor de generación de energía eléctrica a partir de la combustión del biogás. El dimensionamiento y la selección de estos equipos se detallan en los capítulos siguientes.

4.6 CONEXIÓN A RED

La energía eléctrica generada debe ser transportada por medio de líneas de transmisión hasta la subestación más cercana del sistema interconectado nacional. Para ello se debe igualar la tensión de la subestación por lo que sí es el caso, se debe diseñar una instalación de transformación de tensión que permita igualar la tensión de la energía eléctrica generada y así poder verter la energía a la red nacional.

ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL CACTUS NOPAL EN COLOMBIA.

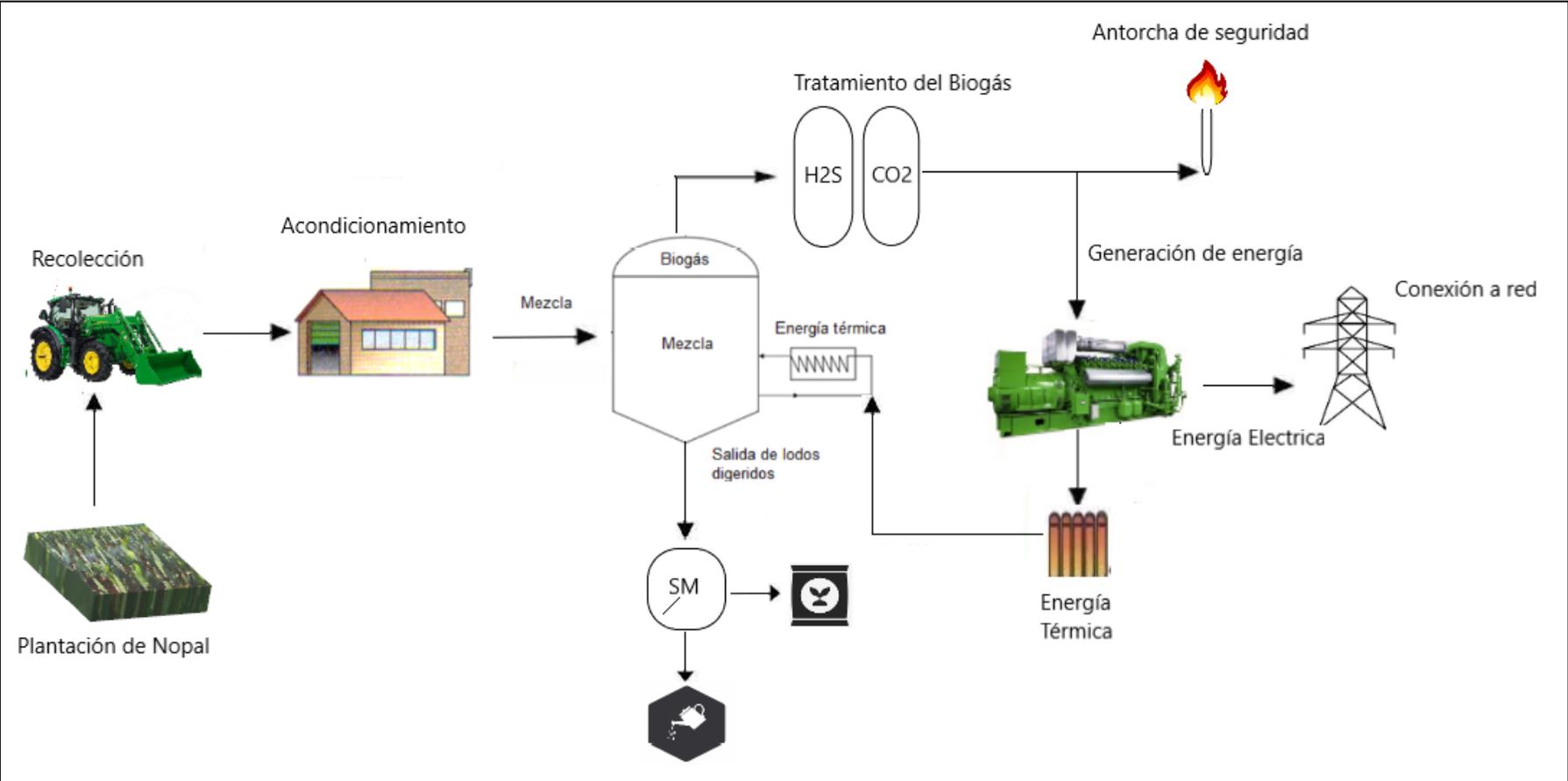


Figura 15. Etapas de la generación de energía a partir de Nopal (Elaboración propia).

ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL CACTUS NOPAL EN COLOMBIA.

5. BIODIGESTOR

En este capítulo se va a realizar una breve descripción de los tipos de reactores que se encuentran actualmente en el mercado, para la digestión anaeróbica de sustratos, así como el cálculo del dimensionamiento del volumen mínimo del biodigestor, y de la composición del gas generado.

5.1 TIPOS DE DIGESTORES

Los digestores de digestores se pueden clasificar de diversas formas, en donde puede estar la clasificación por su orientación, el tipo de sustrato o intensidad de carga, pero en términos generales se pueden clasificar los reactores anaeróbicos en dos grandes grupos, los reactores de mezcla continua y lo reactores de flujo pistón. Sin embargo, actualmente a los digestores se les reconoce por su nombre, el cual en la mayoría de casos, este viene dado por el país de procedencia.

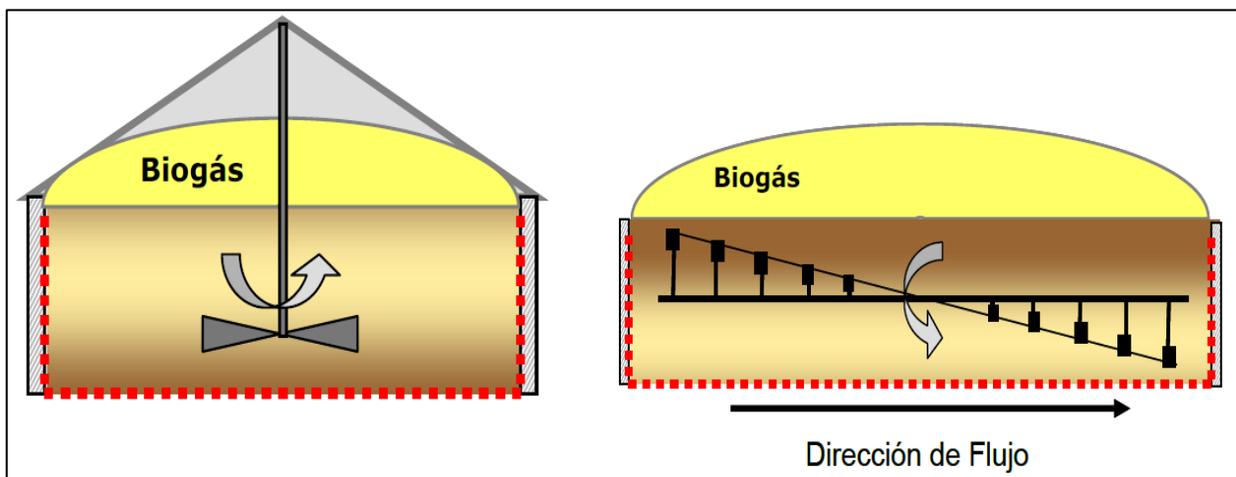


Figura 16. Clasificación de reactores (Manual técnico sobre tecnologías biológicas anaeróbicas aplicadas al tratamiento de aguas y residuos industriales. CYTED)

ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL CACTUS NOPAL EN COLOMBIA.

5.1.1 REACTOR MEZCLA COMPLETA

Es el tipo de reactor más empleado comercialmente, a nivel industrial. Son reactores de forma cilíndrica vertical cerrados, en material de acero u hormigón armado, en donde el funcionamiento se basa en que el sustrato se mezcla regularmente mediante agitadores. Los agitadores permiten mantener una mezcla homogénea y completa permitiendo que el sustrato entrante entre en contacto con la población bacteriana y con el sustrato en degradación.

TABLA 3. CARACTERÍSTICAS DEL REACTOR DE MEZCLA COMPLETA.

Características	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Orientación Vertical. ➤ Material en acero u hormigón armado. ➤ Capacidad hasta 6,000 m³ ➤ Velocidad de carga entre 2 a 5 kg sv/m³d.
Aplicaciones	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Apropiado para procesos continuos, discontinuos y semi-continuos. ➤ Óptimo para sustratos con contenidos de sólidos medios / bajos a bajos.
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Operación variable para procesos continuos, discontinuos y semi-continuos. ➤ Costo de inversión menor comparado con reactores de flujo pistón. ➤ Mantenimiento de equipos internos sin la necesidad de vaciar completamente el reactor.
	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Diseño complejo en la cubierta para tanques de gran tamaño.

ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL CACTUS NOPAL EN COLOMBIA.

Desventajas	<ul style="list-style-type: none">➤ Posibilidad de producción de un régimen de mezcla no ideal y fluidos de corto circuito (entrada y salida de material sin mezclarse).➤ Formación de capas duras flotantes.
-------------	--

Fuente. Elaboración propia con base en el manual técnico sobre tecnologías biológicas anaeróbicas aplicadas al tratamiento de aguas y residuos industriales. CYTED.

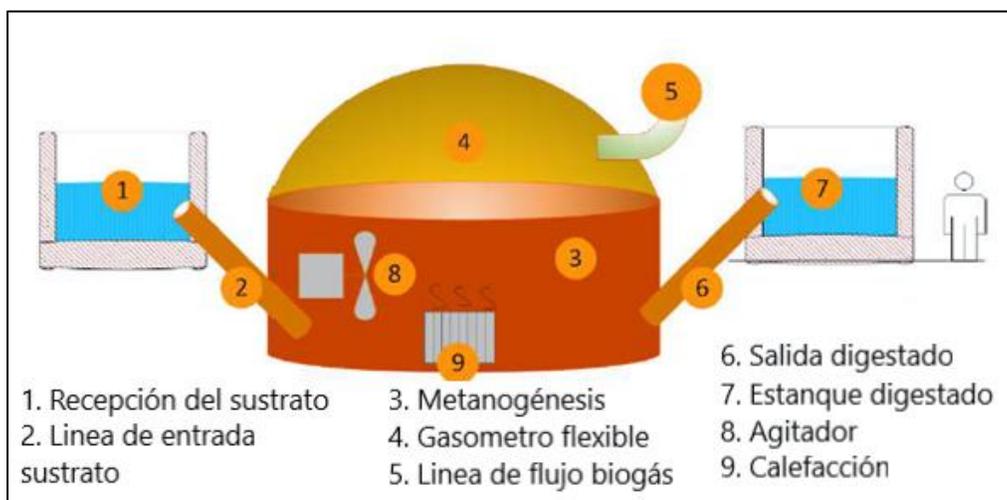


Figura 17. Sistema de digestión tipo mezcla completa (Adaptado Curso de formación especializada en Biogás para profesionales).

5.1.2 REACTOR DE FLUJO PISTÓN

El funcionamiento en este tipo de reactores se basa en el aprovechamiento de la energía o empuje que genera la incorporación del sustrato al reactor para así generar un flujo longitudinal del material. La mezcla de sustrato se produce en planos perpendiculares a la dirección de flujo a través de agitadores especiales.

La principal característica de este tipo de reactores es que el proceso de digestión anaeróbica, ocurre a lo largo del flujo en el interior del reactor, principalmente en la etapa de acetogénesis y metanogénesis. El reactor de flujo pistón puede presentar un proceso

ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL CACTUS NOPAL EN COLOMBIA.

microbiológico altamente estable, por lo que es apropiado para la degradación de materia con presencia alta en contenido de sólidos. Este tipo de reactores de igual forma pueden ser combinables con una segunda etapa de post- digestión en reactores de mezcla completa, dando lugar a un biogás de mucha mayor calidad.

TABLA 4. CARACTERÍSTICAS DEL REACTOR FLUJO PISTÓN

Características	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Orientación horizontal. ➤ Material en acero u hormigón armado. ➤ Capacidad entre 800 a 1 000 m³ ➤ Velocidad de carga superior a 5 kg sv/m³d.
Aplicaciones	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Apropiado para procesos continuos y semi-continuos. ➤ Óptimo para sustratos con contenidos se sólidos medios a medios / altos.
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Configuración compacta. ➤ Separación de las etapas en el proceso de digestión. ➤ Prevención de formación de capas duras flotantes. ➤ Prevención de flujos de corto circuito. ➤ Requieren tiempos de retención hidráulica menores. ➤ Facilidad en la preservación de la temperatura de funcionamiento.
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Grandes volúmenes requieren reactores paralelos. ➤ Mantenimiento de equipos internos requiere el vaciado del reactor.

Fuente. Elaboración propia con base en el manual técnico sobre tecnologías biológicas anaeróbicas aplicadas al tratamiento de aguas y residuos industriales. CYTED.

ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL CACTUS NOPAL EN COLOMBIA.

5.1.3 REACTOR UASB

El digester de flujo ascendente a través de un manto de lodos UASB por sus siglas en inglés (Upflow anaerobic sludge blanket) en los últimos años ha tenido un gran impacto en la digestión anaeróbica principalmente en procesos donde se utiliza lodo granular como sustrato, ya que estos se caracterizan por tener una alta actividad y alta velocidad de sedimentación, permitiendo mantener altas concentraciones de biomasa en los reactores, sin la utilización de soportes o pasos posteriores de separación. Los reactores UASB son de fácil diseño y construcción, capaces de operar a altas velocidades de carga orgánica y con un bajo costo de operación, (ver figura 18).

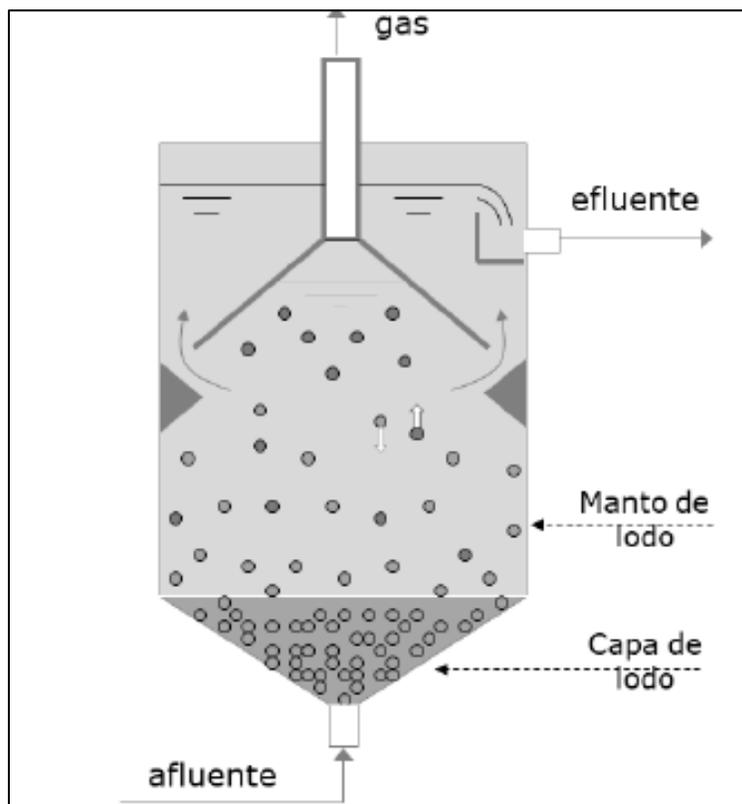


Figura 18. Reactor UASB (Manual técnico sobre tecnologías biológicas anaeróbicas aplicadas al tratamiento de aguas y residuos industriales. CYTED)

5.1.4 REACTOR DE DOS FASES

En este tipo de digestores se separa la etapa de solubilidad de la etapa de metanogénesis. El reactor empleado para la segunda etapa generalmente es de tipo granular, aptos para concentraciones de sólidos menores y en los que la mezcla se realiza a través del movimiento generado por las burbujas de biogás emanadas del sustrato mismo. Este tipo de reactores requieren un desarrollo de ingeniería y planificación previa, para una construcción a medida, lo que no les ha permitido tener un desarrollo comercial mayor.

5.2 VOLUMEN DEL REACTOR

Para realizar el cálculo del volumen de operación del digestor tanto de la fase de hidrolisis como de la fase metanogénica se obtiene a partir de la cantidad de sustrato diario a introducir y el tiempo de retención hidráulico. El volumen de sustrato es una mezcla de materia prima de nopal y agua en relación 1:0,4, ya que como bien se sabe, el Opuntia Ficus es una planta altamente hidratada, por lo que con una relación del 50% es suficiente para tener la mezcla en condiciones óptimas. De igual forma es importante tener en cuenta el espacio que ocupará el gas generado y su simultanea acumulación, por lo que, el volumen del gas se estima como un tercio del volumen de operación. Siendo así el cálculo se hace siguiendo la siguiente expresión.

$$Vol = Vsd \cdot t_R \cdot \left(1 + \frac{1}{3}\right) \quad (1)$$

Donde:

Vol: Volumen total del biodigestor [m³]

Vsd: Volumen de sustrato diario [kg]

T_R: Tiempo de retención hidráulico [días]

El tiempo de retención hidráulica está condicionado por la temperatura de trabajo del biorreactor, por lo que se debe considerar la temperatura en función de la variación estacional, dimensionando el tamaño en función de las condiciones más desfavorables,

ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL CACTUS NOPAL EN COLOMBIA.

Según la ubicación del proyecto, que se encuentra en dentro de la zona tropical en cercanías a la línea del ecuador, la variación estacional no es en gran medida, por lo que se estima el tiempo de retención mínimo en 40 días para su etapa inicial, para así obtener una producción de biogás óptima.

TABLA 5. ESTIMACIÓN VOLUMEN DEL DIGESTOR

Área	100	Ha
Productividad	100	Ton/ha/año
Sustrato diario	27.4	Ton/día
Tiempo de Retención	40	días
Volumen	1 460	m ³

Fuente. Elaboración Propia

5.3 DIMENSIONES DEL DIGESTOR

Según las lecciones aprendidas en países como México, se ha evidenciado que los reactores que mejor se ajustan para este tipo de biomasa son los reactores cilíndricos, por lo que este tipo de reactor será el seleccionado para la ejecución del proyecto. El cálculo del volumen final del biorreactor estará condicionado por las dimensiones del mismo, por lo que para el cálculo se emplea la siguiente ecuación.

$$\text{Volumen de cilindro} = \pi \cdot r^2 \cdot h \quad (2)$$

Donde:

r: radio del reactor [m]

h: Altura del reactor [m]

ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL CACTUS NOPAL EN COLOMBIA.

TABLA 6. DIMENSIONES DEL REACTOR

Altura	6	m
Diámetro	17.6	m
Volumen Total	1 460	m ³

Fuente. Elaboración Propia

5.4 CARACTERÍSTICAS DEL BIOGÁS

La mezcla de gas obtenida será el combustible para los motores de generación, por lo que para su pre-dimensionamiento se debe conocer el poder calorífico inferior, ya que este es el que limita el comportamiento del gas. La composición química del biogás generado determina su poder calorífico, entre más contenido de metano se encuentre dentro de la mezcla, mayor será su poder calorífico y por ende será mayor la energía generada. El poder calorífico se define como la cantidad de energía que se desprende por unidad de masa en un proceso de combustión.

Combustible	Fórmula	Peso Molecular	Poder Calorífico Mayor $\frac{MJ}{kg}$	Poder Calorífico Menor $\frac{MJ}{kg}$
Hidrógeno gas	H ₂	2	143,4	120,9
Metano	CH ₄	16	55,8	50,2
Propano	C ₃ H ₈	44	50,6	46,5
Butano		58	49,5	45,6
Fuel Oil			44	41,8
Petróleo			44	41,8
Keroseno	CH ₂	14	43	39,8
Fuel Oil Residual			44-45	37-42
Orimulsión			43	40
Diesel			42	38,5
Carbono	C	12	28	28
Gas Cuidad			32	
Coque			16-35	

Figura 19. Poder Calorífico de los principales combustibles (Álvaro Zúñiga. Universidad de Chile)

ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL CACTUS NOPAL EN COLOMBIA.

Tabla 7. Producción de Biogás anual

Área	100	Ha
Productividad	100	ton/ha/año
Generación de Gas	40	m ³ /t
Producción Total	10 000	ton/año
Producción Gas	400 000	Nm ³ /año

Fuente. Elaboración Propia

5.4.1 PODER CALORÍFICO DEL BIOGÁS

Se espera que el gas obtenido de la digestión anaeróbica del nopal presente las siguientes características fisicoquímicas, dejando así un alto volumen de metano en la mezcla, seguido por el dióxido de carbono, ver tabla 8.

TABLA 8. CARACTERÍSTICAS POR COMPONENTES DEL BIOGÁS

Elemento	Cantidad [%]	PM	PCS [MJ/kg]	PCI[MJ/kg]	Cantidad Nm ³ /año
CH ₄	58.5%	16	55.8	50.2	234 000
CO ₂	36.0%	44	-	-	144 000
H ₂ O	2.5%	18	-2.5	-2.5	10 000
N ₂	0.5%	28	-	-	2 000
H ₂	2.0%	2	13.4	120.9	8 000
O ₂	0.5%	32	-	-	2 000

Fuente. Elaboración propia

ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL CACTUS NOPAL EN COLOMBIA.

En función de la concentración de los compuestos presentes en la mezcla de biogás y el poder calorífico teórico por unidad de masa, se calcula la masa ocupada por cada sustancia siguiendo la ley de los gases ideales. Una vez conocida la masa de cada uno de los componentes del gas, y en función del poder calorífico superior e inferior, se determina el aporte de energía al gas de cada una de las sustancias presentes.

TABLA 9. APOORTE CALORÍFICO POR COMPUESTO DEL BIOGÁS

Elemento	Cantidad [Nm ³]	Masa [Kg]	PCS[MJ]	PCI [MJ]	C Promedio [MJ]
CH4	234 000	167 247.39	9 332 404.18	8 395 818.81	8 864 111.5
3O2	144 000	283 034.04			
H2O	10 000	8 040.74	-20 101.85	-20 101.85	-20 101.85
N2	2 000	2 501.56			
H2	8 000	714.73	9 577.41	86 411.15	47 994.28
O2	2 000	2 858.93			

Fuente. Elaboración propia

El poder calorífico total de la mezcla se estima en función del poder calorífico inferior, tomando el escenario más pesimista, dejando como resultado:

TABLA 10. PODER CALORÍFICO DEL BIOGÁS

Poder Calorífico del Gas	21.1553 MJ/Nm ³
PCI	5.8765 kWh/Nm ³

Fuente. Elaboración propia

ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL CACTUS NOPAL EN COLOMBIA.

5.5 SELECCIÓN DEL BIODIGESTOR

La selección del biodigestor se hace con base en el tipo de sustrato a digerir, el tiempo de retención hidráulico, y el pre-dimensionamiento previamente calculado. En la elección del biodigestor es importante tener en cuenta las características del biogás a generar, ya que dependiendo de la materia prima utilizada para la generación del biogás, se pueden generar sustancias de forma simultánea que pueden ser altamente perjudiciales para los componentes del reactor. En este caso, como se trata de una materia prima vegetal, la producción de NOx es muy baja. Para la selección del reactor se hace una comparativa entre las dos tecnologías más desarrolladas a la actualidad, las cuales corresponden a un reactor de mezcla completa y el reactor de flujo pistón. Se hace una tabla de comparación entre tecnologías y se verifica cual cumple con todas las condiciones del proyecto, (ver tabla 11). Si cumple se le dará un valor de 1, si no cumple se le dará un valor de 0; la tecnología que obtenga mayor puntaje, será la seleccionada, (ver tabla 12).

TABLA 11. MATRIZ DE COMPARACIÓN ENTRE TECNOLOGÍA DE REACTORES.

Características	Reactor mezcla completa	Reactor flujo pistón
1. Proceso continuo	1	1
2. Contenido de sólidos medios	1	1
3. Capacidad > 1500 m ³	1	0
4. Bajo costo de inversión.	1	0
5. Velocidad de carga media	1	1
6. Calidad de producción de biogás alta	1	1
7. Facilidad de mantenimiento	1	0

ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL CACTUS NOPAL EN COLOMBIA.

8. Prevención en la producción de fluidos de corto circuito	0	1
9. Facilidad de diseño y construcción	1	1
10. Durabilidad	1	1

Fuente. Elaboración propia

TABLA 12. MATRIZ DE SELECCIÓN DEL REACTOR

Tecnología	Reactor Mezcla Completa	Reactor Flujo Pistón
Puntaje	9	7

Fuente. Elaboración propia

Como se puede ver, la tecnología más apropiada para el proyecto es el diseño y construcción de un reactor de mezcla completa, ya que debido a la productividad esperada por las 100 ha de cosecha, el volumen del reactor supera la capacidad que pudiese brindar un solo reactor de flujo pistón, por lo que se tendría que hacer una configuración en paralelo de dos reactores, metodología que elevaría los costos.

El principal problema en los reactores de mezcla completa es la posibilidad de que se generen fluidos de corto circuito, pero esto se puede prevenir y minimizar, haciendo un exhaustivo control sobre la molienda y el tiempo de retención hidráulico.

6. EQUIPOS DE GENERACIÓN ELECTRICA

En este capítulo se va a realizar una breve descripción de los equipos empleados para la generación de energía eléctrica a partir del biogás generado en la digestión anaeróbica, de igual forma se muestra el procedimiento seguido para el cálculo del dimensionamiento de los motores y su posterior selección.

Cabe resaltar que el motor seleccionado es capaz de funcionar con la mezcla de biogás generada, por lo que no es necesario realizar un proceso de tratamiento al gas generado, ya que en el proyecto en total del gas generado, será empleado como combustible para la generación de energía y no tendrá otros fines como podría ser, el uso en automóviles, en donde el gas sí debería pasar por un proceso de desulfuración y deshidratación para elevar su concentración de metano.

6.1 DIMENSIONAMIENTO DEL MOTOR

Para realizar el cálculo del dimensionamiento del motor es importante conocer la composición química del mismo para saber si es necesario realizar un tratamiento previo antes de ser ingresado al motor y así evitar futuras averías por rápida corrosión. Una vez comprobado que el gas se encuentra dentro de los estándares de calidad correspondientes se identifica el flujo de biogás por día que va a llevar la planta y en función del poder calorífico del mismo se calcula la energía eléctrica generada siguiendo la siguiente ecuación. El caudal de biogás es el factor que determina la potencia eléctrica que se puede generar, por lo que es importante tener un factor de seguridad al momento de hacer la selección de equipos para evitar complicaciones en días atípicos.

ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL CACTUS NOPAL EN COLOMBIA.

$$EG = Q \cdot PCI \quad (3)$$

Donde:

EG: Energía generada [kW]

Q: Flujo de Gas [Nm³/h]

PCI: Poder Calorífico Inferior [kWh/Nm³]

TABLA 13. ENERGÍA GENERADA

Producción Gas	400 000	Nm ³ /año
Biogás Disponible	45.66	Nm ³ /h
Potencia Teórica	268.3	kW

Fuente. Elaboración propia

Es importante recalcar que esta metodología de cálculo está dada para condiciones normales, es decir, a temperatura igual a 0 y presión a nivel del mar 1 atm. Con la potencia esperada teórica se obtiene un primer acercamiento, de las características que debe tener el motor de la planta de generación.

6.2 SELECCIÓN DEL MOTOR

Una vez se ha obtenido el primer punto de referencia sobre la potencia eléctrica teórica, se hace el estudio de dos motores que se encuentran dentro de ese rango de potencia previamente establecido. El primero es un motor TEDOM de referencia Cento 220 y el segundo un motor JENBACHER de Tipo 2. Ambos motores son motores de cogeneración de energía, en donde la energía eléctrica será vertida a la red y la energía térmica generada, será utilizada para mantener la temperatura del digestor. Los criterios fundamentales para la selección del equipo se basan en el rango de potencia nominal y el consumo de

ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL CACTUS NOPAL EN COLOMBIA.

combustible. A continuación se muestra una tabla en donde se pueden ver en comparación las principales características de los motores, ver (tabla 14).

TABLA 14. COMPARACIÓN DE MOTORES ELÉCTRICOS.

MOTORES	TEDOM Cento 220	JENBACHER Tipo 2
Potencia Nominal [kW]	220	250
Rendimiento Total	87.7%	80.8%
Rendimiento Eléctrico	38.1%	36.4%
Rendimiento Térmico	49.6%	44.4%
Consumo de Combustible [Nm ³ /h]	42.68	52.65

Fuente. Elaboración propia

Es importante recalcar, que las características de funcionamiento descritas anteriormente corresponden para una frecuencia eléctrica de 60 Hz, frecuencia a la cual se opera en Colombia.

Como se puede observar el motor TEDOM, ofrece un mayor rendimiento total y principalmente un rendimiento eléctrico mayor, lo que es un factor importante a la hora de la selección y realizando la comparación entre el consumo de combustible se puede observar que el motor JEANBACHER, requiere un mayor consumo. Con las características establecidas anteriormente del ratio de producción y la generación de biogás, se tiene que el suministro teórico de combustible está en 45,66 Nm³/h, lo que deja como única opción el motor TEDOM Cento 220.

ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL CACTUS NOPAL EN COLOMBIA.

5.5.1 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

Los motores TEDOM son motores que emplean tecnología suiza y alemana en sus equipos ofreciendo un sistema compacto de alto rendimiento en la generación de energía. La gama Cento ofrece un amplio rango de potencia nominal que va desde 50 hasta 500 kW, lo que trae beneficios futuros si se plantea la opción de aumentar la productividad hasta un área de producción de 200 Ha.



Figura 20. Motor TEDOM (TEDOM Cogeneration-brochure. Combined Heat and Power.)

Es importante resaltar que el motor no sería capaz de trabajar a una potencia mínima del 50% de su potencia nominal, por lo que es indispensable garantizar el suministro y que en días atípicos de sub-producción, este valor no sea inferior al 50%. A continuación se muestra la ficha técnica del equipo del equipo de generación de energía eléctrica, separado en dos secciones, la sección del generador, ver (tabla 15) y la sección del motor, ver (tabla 16).

ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL CACTUS NOPAL EN COLOMBIA.

TABLA 15. FICHA TÉCNICA GENERADOR

Modelo	LSA 46.2 L9 LSA 46.2 VL12
Fabricante	Leroy Somer
Cos φ	1.0
Eficiencia en el punto de trabajo	95.1
Voltaje	400 V
Frecuencia	60 Hz

Fuente. Elaboración propia

TABLA 16.FICHA TÉCNICA MOTOR

Modelo	TB 170 G5 TW 86
Fabricante	Tedom
Numero de Cilindros	6
Arreglo de cilindros	En serie
Bore x stroke	130 x 150 mm
Desplazamiento	11 946 cm
Ratio de compresión	12:01
Revoluciones	1 500 rpm
Consumo de Aceite	0.3/0.5 g/kWh

Fuente. Elaboración propia

ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL CACTUS NOPAL EN COLOMBIA.

6.3 SALA DE MÁQUINAS

En la sala de máquinas comprende la sala de generación de energía eléctrica y la sala de control, ambas serán ubicadas contiguamente de tal forma que se permita optimizar el espacio de la locación. La sala de generación consta del motor TEDOM, el generador, su sistema de refrigeración y serán diseñadas las líneas de calefacción que irán al reactor y las líneas de transmisión de la energía eléctrica generada. La sala de control, albergará los equipos de monitoreo y control de toda la planta; de igual forma se almacenarán los equipos de protección establecidos por ley, con el fin de mantener el funcionamiento óptimo de la misma.

TABLA 17. CARACTERÍSTICAS SALA DE MÁQUINAS.

Sala de Maquinas	
Altura min [m]	3m
Área [m ²]	30m ²
T máxima [°C]	55°
T mínima [°C]	5°
Sistema Contraincendios	SI
Aislamiento térmico	SI
Control de gases y partículas	SI
Desconexión automática	SI
Equipos de seguridad personal	SI

Fuente. Elaboración propia

ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL CACTUS NOPAL EN COLOMBIA.

6.4 DISPOSICION FINAL DE LAS INSTALACIONES

Con los dimensionamientos realizados y la selección de equipos se propone la disposición y lo ubicación final de las instalaciones. Dicha disposición se realiza de forma que se pueda optimizar el mayor espacio posible y siguiendo los lineamientos anteriormente establecidos.

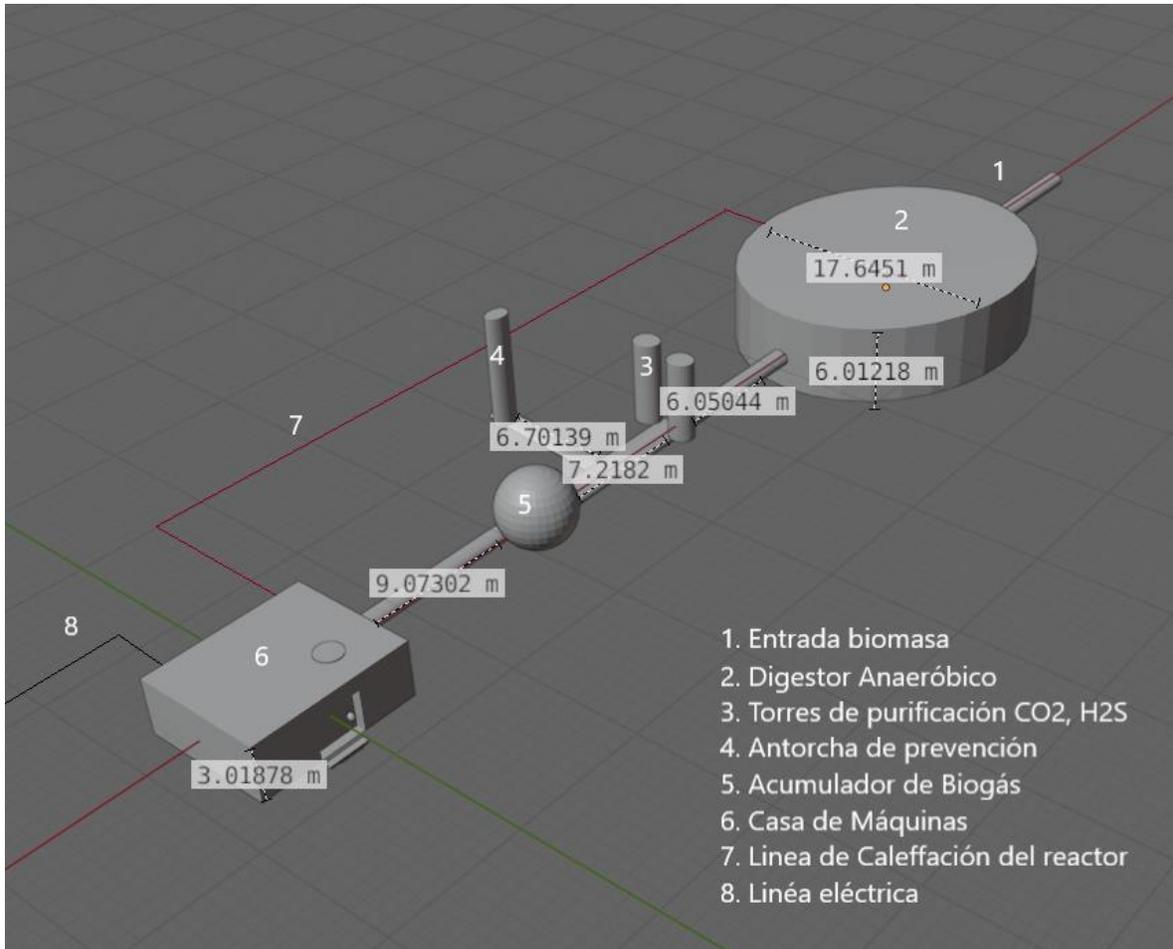


Figura 21. Configuración y disposición de las instalaciones

ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL CACTUS NOPAL EN COLOMBIA.



Figura 22. Ubicación de las instalaciones

ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL CACTUS NOPAL EN COLOMBIA.

7. ANÁLISIS ECONOMICO Y MEDIOAMBIENTAL

En el siguiente capítulo se presenta el análisis de económico y de sensibilidad, que permite determinar la viabilidad del proyecto bajo las condiciones dadas y 3 escenarios más. El análisis se realiza incluyendo todos los incentivos propuestos por la Ley 1715 de 2014 para proyectos de generación de energía con fuentes no convencionales. Entre los incentivos resaltan, lo incentivos de renta, los incentivos contables y los incentivos arancelarios. Así mismo se describe el impacto ambiental del proyecto, como la posible reducción de emisiones de gases de efecto invernadero de la planta.

7.1 COSTOS PRIMARIOS

Con el fin de justificar los resultados que se presentan en este capítulo a continuación se describen los principales factores que se tienen en cuenta para la estimación de la viabilidad técnico-económica del proyecto.

7.1.1 COSTOS DE INVERSIÓN (CAPEX)

Se establecen cuatro determinantes que componen los costes de inversión, que corresponden al balance de planta, el costo de los equipos de generación de energía eléctrica y de biogás, el costo de interconexión al sistema interconectado nacional y el costo de la ejecución del proyecto.

Se asume que la totalidad de los equipos de origen extranjero, por lo que la maquinaria, elementos y equipos empleados en el proyecto serán en su totalidad importados, por lo que no es necesario identificar los costos de desarrollo ni de balance de planta. Debido a la finalidad del proyecto y según el decreto 2143 de 2015, se fija que los quipos y maquinaria empleada estarán exentos de IVA. Los costos de inversión se detallan a continuación, ver Tabla 18.

ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL CACTUS NOPAL EN COLOMBIA.

TABLA 18. RELACIÓN DE COSTOS DE INVERSIÓN

Costos de Diseño	
Potencia Nominal [kW]	220
Horas de funcionamiento [hr]	7 500
Grupo generador [US/kWh]	0.04
Balance de planta [US/kW]	800
Costo de conexión al SIN [US/kW]	150
Costos de desarrollo [US/kW]	1.5

Fuente. Elaboración propia

Los gastos que se contemplan en todo el proyecto incluyen el diseño de ingeniería, montaje e instalación de la planta, inversión de equipo, adquisición del terreno para el cultivo y diseño de la planta, lo mismo que los costos adicionales que refieren a costos por transacción de licencias y otros costos de carácter legal.

El balance de planta reúne todo lo relacionado con el diseño e instalación del digestor y equipos necesarios para el tratamiento del sustrato, como también el compresor de biogás. El grupo generador incluye el motor y los equipos de generación.

TABLA 19. COSTOS DE INVERSIÓN- CAPEX

Costos de inversión	USD
Grupo del reactor	\$176,000
Grupo generador	\$66,000
Conexión al SIN	\$33,000

ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL CACTUS NOPAL EN COLOMBIA.

Ejecución del Proyecto	\$330
Procesos de producción	\$20,000
Otros	\$10,000
TOTAL	\$305,330

Fuente. Elaboración propia

Es importante resaltar que según el decreto 2143 de 2015 por el cual se modifican los nuevos lineamientos para la aplicación de incentivos establecidos en la Ley 1715 de 2014, los equipos, elementos y maquinaria empleados en el proyecto están excluidos de IVA por lo cual este valor corresponde al valor sin IVA el cual a su vez es el valor final de los productos.

7.1.2 COSTOS DE OPERACIÓN OPEX

Los costos de operación se dividen en dos componentes, los costos fijos y los costos variables. Los costos fijos corresponden a los costos de funcionamiento del proyecto, es decir, los que no se ven afectados por cambios en la producción o en la generación de energía eléctrica, dentro del rango de producción determinado. Se considera como costo fijo los salarios del personal encargado en la planta y un costo de mantenimiento preventivo anual.

La estructura salarial para el personal encargado se realiza en función de los parámetros mínimos para poner la planta en funcionamiento. El rango salarial se fijan en función de los rangos salariales actuales. La tabla 20, muestra detalladamente los salarios establecidos y el costo que estos conllevan en la ejecución del proyecto.

ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL CACTUS NOPAL EN COLOMBIA.

TABLA 20. ESTRUCTURA SALARIAL

Cargo	Cantidad	Sueldo liquido unitario [USD/mes]	Sueldo bruto Total [USD/mes]
Operadores	3	300	900
Ing. Civil	1	1 000	1 000
Ing. Eléctrico	1	1 000	1 000
Ing. Energético	1	1 000	1 000
Guardia	2	300	600

Fuente. Elaboración propia

En los costos variables se tienen en cuenta los costos de producción anual de biomasa, que van en función del ratio de producción anual, la energía producida y costos ocasionales por complicaciones o prevenciones.

Los costos de operación por la venta de energía no se tienen en cuenta, ya que según la Ley 99 de 1993 el impuesto de 4% sobre la venta de energía es aplicable para plantas mayores a 10 MW y los demás cobros que se efectúan para grandes productores que establece la ley 1715 de 2014 son para productores con una potencia mayor a 1MW, es decir el proyecto se acoge a todos los beneficios de productores de pequeña escala, Potencia < 1MW. Los costos totales por operación se detallan a continuación, ver tabla 21.

ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL CACTUS NOPAL EN COLOMBIA.

TABLA 21. COSTOS DE OPERACIÓN OPEX

Costos de Operación	USD/Año
Equipo de personal	\$54,000
Costos de Mantenimiento	\$1,000
Costos en producción	\$12,000
TOTAL	\$67,000

Fuente. Elaboración propia

Estos costos se tienen en cuenta para el año 0, periodo de diseño y construcción de la planta, ya que posteriormente, los costos de operación se reducen. En los años siguientes se tienen en cuenta los costos variables de producción, los costos de mantenimiento preventivo, y el equipo de personal mínimo de seguridad (tres operarios y los dos guardias).

7.2 INGRESOS

En la estimación de los ingresos se consideran dos grandes factores, las ganancias por venta de energía al sistema interconectado nacionales y los ingresos por bonos de carbono.

7.2.1 INGRESOS POR VENTA DE ENERGÍA

Para establecer los ingresos a obtener por venta de energía se tiene en consideración el precio por kWh en el sistema interconectado nacional. El precio en Colombia fluctúa dependiendo de la región, por lo que para el caso de estudio se establece un valor promedio anual fijado para todo el país.

ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL CACTUS NOPAL EN COLOMBIA.

De acuerdo a la Unidad de Planeación Minero Energética el precio del kWh promedio en Colombia está fijado en USD \$0.133, para el sector residencial y un precio en bolsa de USD \$0.091 de, siendo uno de los países latinoamericanos con mayor precio de la energía.

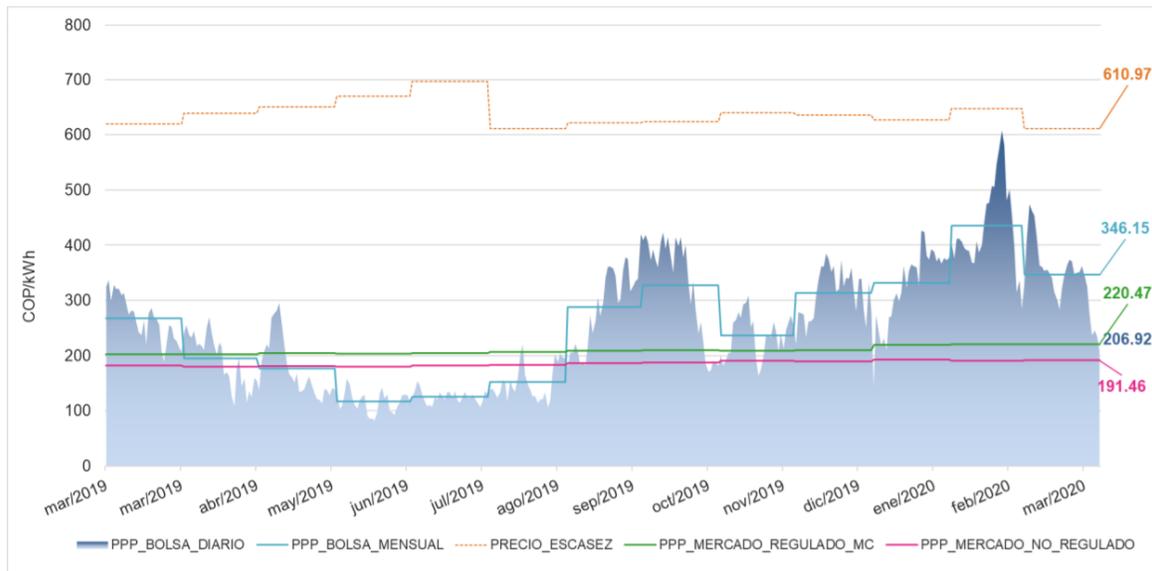


Figura 23. Precio del kwh en bolsa (XM, Informe precios y transacciones, Marzo 2020.)

Con base en la proyección hecha por la UPME y el porcentaje de inflación del país, se establecen los precios de venta del kWh para los años siguientes y así obtener los ingresos por venta de energía eléctrica al Sistema Interconectado Nacional.

ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL CACTUS NOPAL EN COLOMBIA.

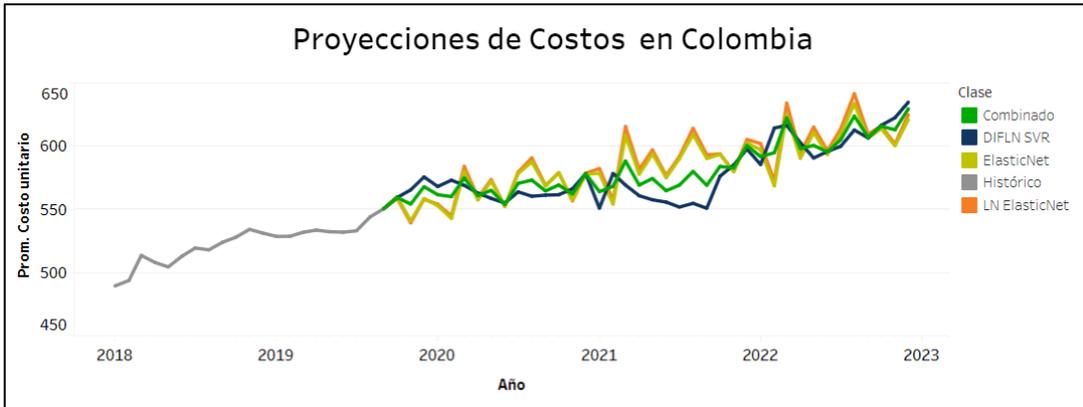


Figura 24. PROYECCIÓN PRECIOS KWH (UPME Boletín estadístico.)

Para un primer año 1 y con un tiempo de funcionamiento de 7500 hr del motor generador se obtiene que los ingresos resultantes por la venta de energía en bolsa serían de \$65,046 USD.

TABLA 22. INGRESOS POR VENTA DE ENERGÍA PERIODO 1

Ingresos por venta de Energía	
Precio energía eléctrica USD/kWh	0.091
Energía Generada año kW	628 650
Ingresos por venta de Energía USD	\$65,046

Fuente. Elaboración propia

7.3 INGRESOS POR BONOS DE CARBONO

Los bonos de carbono CERs, por sus siglas en inglés (Certified Emission Reductions), son un mecanismo propuesto en el Protocolo de Kyoto para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y que han tenido mayor impacto desde el acuerdo de París.

Los bonos de carbono pueden ser comercializados a diferentes precios de mercado. Una posibilidad es venderlos al precio que las naciones unidad establece para proyectos de

ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL CACTUS NOPAL EN COLOMBIA.

FNCER en Colombia que cumplan con los certificados de emisiones reducidas, en este caso se asignaría un valor de aproximadamente 5 USD por tonelada de emisiones reducida.

Otra alternativa es venderlo de forma directa en el mercado nacional e internacional en donde los precios son fijados por el Europea Emission Trading Scheme (EU ETS). Los valores fijados por la comisión europea son normalmente utilizados para proyectos realizados en la Unión Europea, mientras que para proyectos para los que no aplica este escenario, el gobierno de Reino Unido ha elaborado una lista de precios, con sus predicciones basados en tres alternativas, bajo, medio y alta. Estos costos representan el valor estimado que los agentes contaminantes deberían pagar por tonelada de gas de efecto invernadero emitido, ver figura 25.

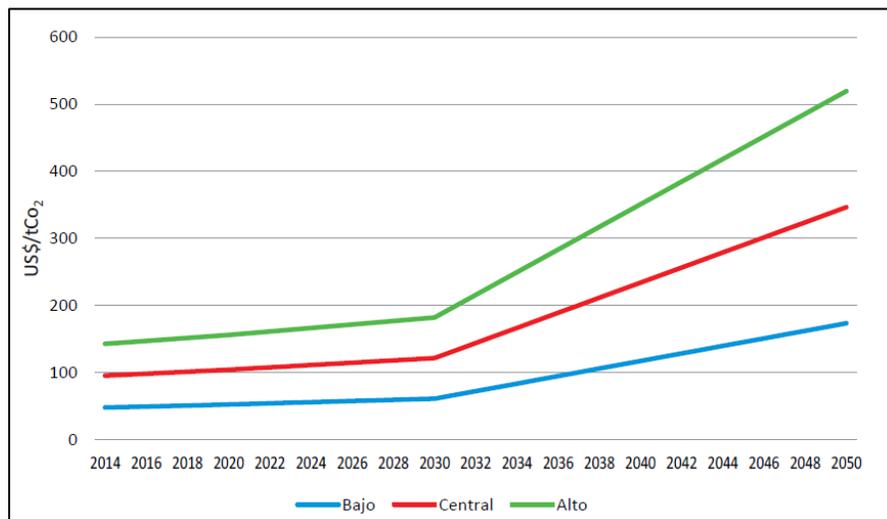


Figura 25. Precios de carbono (DECC, 2014)

Dado la naturaleza y localización del presente proyecto se van a considerar un precio similar pero inferior a los precios promedios para el mercado de venta directa en el mercado nacional. De esta forma en el año 2019 en Colombia el precio interno promedio del bono

ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL CACTUS NOPAL EN COLOMBIA.

de carbono tuvo un valor de 20 USD, mientras que en el mercado internacional se cotizó en 26 USD.

El nopal que es el principal sustrato empleado en el proyecto, si se empleara como biocombustible en sustitución de gas natural empleado en vehículos, tendría la propiedad de capturar 70 toneladas de CO₂ por hectárea por año, mitigando el impacto ambiental del sector de la automoción. Como en enfoque de este proyecto es la generación de energía eléctrica con el biogás generado, se estima una reducción de emisiones de 30 toneladas de CO₂ por hectárea por año, dejando así un impacto de 3000 Ton de CO₂ evitadas.

TABLA 23. INGRESOS POR BONO DE CARBONO P1

Captación de CO2	
Ton CO2 evitado/Ha/año	30
Ton CO2 evitado/año	3 000
USD/tonCO2	\$15
Ingresos por Bono CO2	60 000

Fuente. Elaboración propia

7.4 VIABILIDAD ECONOMICA

Se realiza el estudio de viabilidad económico, en función de los ingresos y egresos estimados anteriormente. Se calcula el valor actual neto (VAN) y la tasa interna de retorno (TIR), para un periodo de tiempo igual a 20 años y de igual forma se realiza el cálculo de valor neto de la planta.

ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL CACTUS NOPAL EN COLOMBIA.

De acuerdo con el Banco de la República de Colombia, la inflación en el país al 30 de abril de 2020 se sitúa en 3.51%, valor que se considera para los cálculos posteriores.

TABLA 24. VAN – TIR

INVERSIÓN INICIAL	-\$305,330.00
VAN	\$798,592.63
TIR	20%

Fuente. Elaboración propia

La generación de energía comienza pasados 6 meses de la puesta en marcha de la planta, ya que es el tiempo que se demora la primera cosecha y que corresponde al año 0. El flujo de caja se tiene en cuenta a partir del año 1 de haber puesto en marcha el grupo generador. En este primer año se tiene un flujo de caja positivo igual a \$70,549.

Para el cálculo de amortización, se tienen en cuenta los ingresos respectivos al segundo semestre del año 0, con un valor de \$51,120 y que corresponden a los ingresos por venta de energía y por bono de carbono. Dentro de los egresos se tienen en cuenta los beneficios tributarios dispuestos por la Ley 1715 de 2014. Para el año 1 se estima un valor neto de -\$250,661 alcanzando una amortización en el año 9.

ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL CACTUS NOPAL EN COLOMBIA.

TABLA 25. AMORTIZACIÓN

Año	USD/kWh	Ingresos por venta	Bono de Carbono	Egresos	Valor Neto	Flujo de Caja
0	0.091	\$28,620	\$22,500	-\$372,330	-\$321,210	-\$372,330
1	0.094	\$59,249	\$46,580	-\$35,280	-\$250,661	\$70,549
2	0.098	\$61,329	\$48,214	-\$39,333.86	-\$180,451	\$70,210
3	0.101	\$63,482	\$49,907	-\$43,156.84	-\$110,219	\$70,232
4	0.105	\$65,710	\$51,658	-\$46,742.26	-\$39,593	\$70,626
5	0.108	\$68,016	\$53,472	-\$50,083.75	\$31,811	\$71,404
6	0.112	\$70,404	\$55,349	-\$52,344.70	\$105,219	\$73,408
7	0.116	\$72,875	\$57,291	-\$54,702.66	\$180,682	\$75,463
8	0.120	\$75,433	\$59,302	-\$57,161.66	\$258,255	\$77,573
9	0.124	\$78,080	\$61,384	-\$59,725.90	\$337,994	\$79,738
10	0.129	\$80,821	\$63,538	-\$62,399.71	\$419,953	\$81,960

ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL CACTUS NOPAL EN COLOMBIA.

11	0.133	\$83,658	\$65,768	-\$65,187.65	\$504,192	\$84,239
12	0.138	\$86,594	\$68,077	-\$68,094.42	\$590,769	\$86,577
13	0.143	\$89,634	\$70,466	-\$71,124.93	\$679,744	\$88,975
14	0.148	\$92,780	\$72,940	-\$74,284.30	\$771,179	\$91,435
15	0.153	\$96,036	\$75,500	-\$77,577.82	\$865,138	\$93,959
16	0.158	\$99,407	\$78,150	-\$81,011.03	\$961,684	\$96,546
17	0.164	\$102,897	\$80,893	-\$84,589.68	\$1,060,884	\$99,200
18	0.169	\$106,508	\$83,733	-\$88,319.74	\$1,162,805	\$101,921
19	0.175	\$110,247	\$86,672	-\$92,207.44	\$1,267,516	\$104,711
20	0.182	\$114,116	\$89,714	-\$96,259.24	\$1,375,087	\$107,571

ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL CACTUS NOPAL EN COLOMBIA.

7.5 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

A continuación se van a analizar y comparar 4 escenarios posibles dentro del proyecto. El primer escenario es aquel en donde se tienen en cuenta los incentivos tributarios y arancelarios dispuestos por la ley 1715 de 2014 para proyectos de energías renovables como a su vez, los ingresos por venta los bonos de carbono; dicho escenario hace referencia a los cálculos anteriormente realizados.

En el segundo escenario se mantendrán los ingresos por la venta de bonos de carbono, pero no se acogerá a los beneficios dispuestos por la Ley 1715 de 2014. En escenario número 3, tendrá en cuenta los beneficios tributarios, pero no dispondrá de los ingresos por venta de carbono. Finalmente en el último escenario no se tendrán en cuenta ni los beneficios tributarios dispuestos por la Ley ni los ingresos por venta de carbono.

Para los escenarios con beneficios tributarios se ha contemplado una acogida a la ley 1715 de 2014 logrando así estar exento de IVA y aranceles, obtener una depreciación acelerada de los equipos al 20% anual y una reducción del 50% sobre renta anual en los primero 5 años. En los demás escenarios se ha contemplado un porcentaje de IVA y Arancel del 29% con una deducción de renta anual del 1.4% del valor de la inversión y una depreciación lenta de 5% anual.

Tabla 26. Características económicas

Inversión Inicial sin Aranceles y Beneficios	\$305,330
Inversión Inicial con aranceles e IVA	\$381,663
IVA	25%
Arancel	29%
Deducción a la renta con beneficios	0.40%
Deducción a la renta sin beneficios	1.40%
Precio de la energía	0.091 USD/kWh

ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL CACTUS NOPAL EN COLOMBIA.

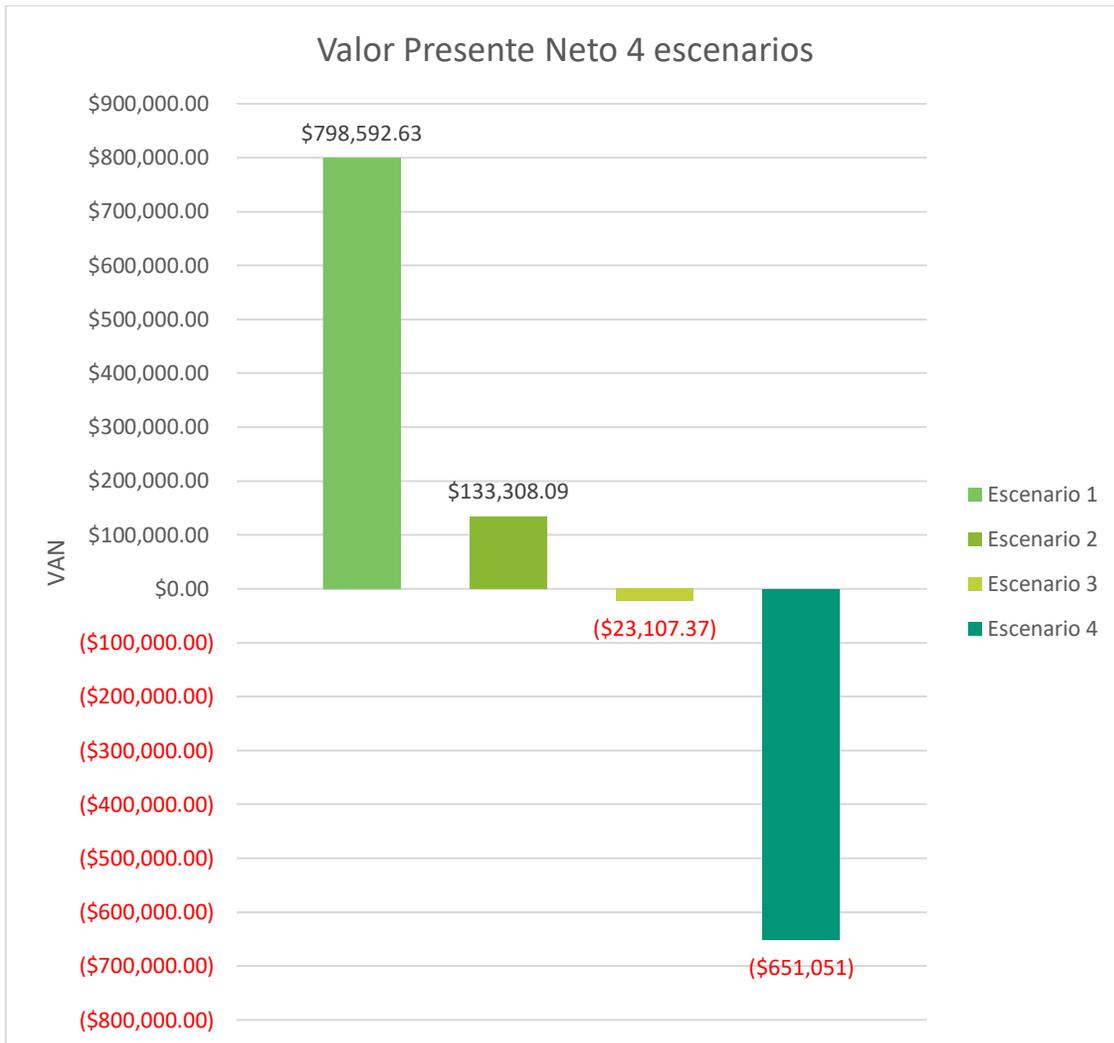


Figura 26. VAN 4 escenarios

Como se puede observar el escenario 1 y 2 son los escenarios positivos, lo que deja ver la importancia de los beneficios tributarios y arancelarios y principalmente los beneficios obtenidos de la venta de los bonos de carbono en ambos escenarios. En los escenarios 3 y 4 se obtienen valores VAN negativos, lo que haría el proyecto económicamente inviable. En el escenario 3 bastaría con reducir los gastos de inversión y obtener un precio de venta de la energía más favorable para obtener valores positivos. El último escenario muestra la imposibilidad de desarrollo del proyecto bajo esas condiciones.

ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL CACTUS NOPAL EN COLOMBIA.

8. CONCLUSIONES

A partir del estudio de biomasa realizado, se considera a la *Opuntia Ficus Indica* como un candidato óptimo para ser empleado como combustible en la generación de energía eléctrica por medio de digestión anaeróbica. De igual forma y debido a la resistencia a las altas temperaturas y sequías y un factor de crecimiento relativamente alto se puede determinar que sus costos de producción y utilización en la degradación sean bajo en comparación de otras biomásas.

La selección de equipos se hizo con base en las características del biogás generado, para así optimizar el proceso de degradación y de generación de energía eléctrica. A su vez la selección deja abierta la posibilidad de una expansión, gracias al aumento en el ratio de producción generando así un incremento en la energía generada y una reducción en costos operativos.

Se logró determinar que para un área de producción de 100 Ha con una productividad de 100 ton/Ha/año de nopal se requiere de un motor de generación de energía eléctrica con una potencia nominal de 220kW, el cual fue seleccionado a partir del balance energético entre el gas generado por el proceso de digestión anaeróbica y el consumo de combustible del motor.

El proyecto requiere una inversión total inicial correspondiente a \$305,330, y para el cual en el año 0 se estiman unos gastos de operación de \$67,000. Generando así unos gastos totales iniciales de \$372,330 en el año 0, año de partida del proyecto. Dentro de los costos de inversión el digestor anaeróbico es el que tiene mayor aportación, teniendo una participación del 58% sobre el CAPEX. Por lo que si se desea realizar una reducción en el valor de inversión inicial se deberá considerar más opciones de reactores de los considerados en este informe.

ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL CACTUS NOPAL EN COLOMBIA.

Es importante resaltar que la favorable rentabilidad del proyecto se debe en gran medida a la venta de los bonos de carbono, por lo que se hace indispensable en caso de no tener esta alternativa, buscar locaciones donde el precio de la energía en bolsa sea mayor, y así obtener mayores ingresos por la venta de energía o lograr pactar un precio de venta a un usuario no registrados o a un agente generador a un precio más favorable.

Con una tasa del 3.51% de inflación y dentro de un escenario de estudio a 20 años se obtiene un VAN de \$798,592.63 con una tasa interna de retorno de 20%, lo que comprueba que el proyecto se determina rentable bajo las condiciones propuestas anteriormente.

En general el desarrollo del proyecto traería beneficios altamente positivos como lo son la diversificación de la canasta energética actual del país, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, la generación de empleo y abre la posibilidad a nuevas líneas de investigación que permitan profundizar en la generación de energía eléctrica a partir de material lignoceluloso no convencional.

ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL CACTUS NOPAL EN COLOMBIA.

BIBLIOGRAFÍA

1. **Petroleum, British.** *BP Energy Outlook.* 2019.
2. **S.A., XM.** *Informe General del Mercado Febrero 2020.* 2020.
3. **Forum, World Economic.** *Global Energy Architecture Performance Index Report.* Geneva : s.n., 2017.
4. **Gomez, Claudius Da Costa.** *Biogas as an energy option: an overview.* Germany : Woodhead, 2013.
5. **Rintala, Prasad Kaparaju. Jukka.** *Generation of heat power from biogas for stationary applications: boilers, gas engines and turbines, combined heat and power (CHP) plants and fuel cells.* Finland : s.n., 2013.
6. **Thamsiroj, Jerry D. Murphy. Thanasit.** *Fundamental Science and Engineering of the anaerobic digestion process for biogas production.* Ireland : s.n., 2013.
7. **Fedebiocombustibles.** *Noletín N° 176 - Biocombustibles.* 2018.
8. **Energy, XUA.** *Transformas para Diversificar la energía.* Bogotá : s.n., 2020.
9. *Opuntia ficus.indica cladodes as feedstock for ethanol production by Kluyveromyces marxianus and Saccharomyces cerevisiae.* **Olukayode O. Kuolo, James C. du Preez.** 2013.
10. **Pérez, Candelario Mondragón- Salvador.** *Cactus (Opuntia spp.) as forage* FAO. 2002.
11. *Nopal, fuente excepcional de energía renovable limpia y sustentable. El oro verde de Mexico. El Santo Grial de las Energías Renovables.* **Madera, Miguel Aké.** Mexico : s.n., 2014.
12. *Producción de Biogás con nopal.* **Arvizu, José Luis.** Mexico : s.n., 2015.

ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL CACTUS NOPAL EN COLOMBIA.

13. **Agency, International Energy.** *Statistics- Renewables Information.* 2019.

14. *Anaerobic digestion of different feedstocks: Impact on energetic and environmental balances of biogas process.* **Jacopo Bacenetti, Marco Negri.** s.l. : ELSEVIER, 2013.