



FQF
Facultad de
Química y Farmacia

Departamento de Ingeniería Química

TRABAJO DE DIPLOMA

Título: Oportunidades de la generación de energía con biomasa cañera en la matriz energética cubana desde un enfoque de ciclo de vida.

Autor: Marianela Ruíz Guirola

Tutores: Dra. C. Elena R. Rosa Domínguez

Dr. C. Raúl Alberto Pérez Bermúdez

Santa Clara, julio 2021
Copyright©UCLV



FQF
Facultad de
Química y Farmacia

Department of Chemical Engineering

DIPLOMA THESIS

Title: Opportunities of energy generation with sugarcane biomass in the Cuban energetic matrix from a life cycle approach.

Author: Marianela Ruíz Guirola

Thesis Director: Dra. C. Elena R. Rosa Domínguez

Dr. C. Raúl Alberto Pérez Bermúdez

Santa Clara, julio 2021
Copyright©UCLV

Este documento es Propiedad Patrimonial de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, y se encuentra depositado en los fondos de la Biblioteca Universitaria “Chiqui Gómez Lubian” subordinada a la Dirección de Información Científico Técnica de la mencionada casa de altos estudios.

Se autoriza su utilización bajo la licencia siguiente:

Atribución- No Comercial- Compartir Igual



Para cualquier información contacte con:

Dirección de Información Científico Técnica. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Carretera a Camajuaní. Km 5½. Santa Clara. Villa Clara. Cuba. CP. 54 830

Teléfonos.: +53 01 42281503-1419

Pensamiento

Produce una inmensa tristeza pensar que la naturaleza habla mientras el
género humano no la escucha.

Víctor Hugo

Dedicatoria

Con mucho cariño dedico este trabajo a Dios por haberme regalado la vida, una hermosa familia, mis amigos y compañeros incomparables y por esta grandiosa oportunidad de realizar mi tesis de diploma. A mis padres, Gloria y Ernesto, por todo el amor, ejemplo, cariño, sacrificio, consejos y apoyo que me han sabido brindar a lo largo de toda mi vida. A mi hermano David Ernesto quien ha sido mi fortaleza, mi ejemplo y mi soporte en cada escalón de mi vida. A mi abuelita Raquel y mi abuelo Jorge que a pesar de que ya no están presentes me supieron ayudar y apoyar siempre. A toda mi familia que siempre han estado pendientes de que mis metas y sueños se cumplan.

Agradecimientos:

A mi familia, a mis tíos y en especial a mis padres y hermano, quienes me han dado cariño, apoyo y seguridad en los momentos que más lo necesitaba. Ellos han sido mi fuerza para avanzar examen a examen.

Dejo constancia de mis sinceros agradecimientos a mis tutores la Dra. Elena Rosa Domínguez y el Dr. Raúl Alberto Pérez Bermúdez quienes con paciencia y dedicación me han sabido guiar, orientar, resolver todas mis dudas y aconsejarme estos meses.

Quiero agradecer también a la Dra. Nancy López Bello quien ha compartido sus conocimientos, experiencias, y me ha apoyado a lo largo de mi formación académica.

Agradezco al profe Javier Cárdenas por tanta ayuda, por los valores compartidos durante tanto tiempo. Gracias a él también, ser universitaria dejó de ser un sueño.

Al departamento de Ingeniería Química por brindarme grandes profesores que además de transmitirme sus conocimientos, me han enseñado a enfrentar la vida.

A mis amigos más cercanos por demostrar su verdadera amistad al soportar charlas sobre el análisis de ciclo de vida y la matriz energética cubana.

A Sergio, Eduardo, Lidia y José por sus palabras de aliento, consejos y cariño me han dado el impulso necesario para el cumplimiento de una más de mis metas, además de compartir conmigo los buenos y malos momentos a lo largo de este proceso.

A mis compañeros de generación por esos momentos que vivimos juntos.

A la Revolución, al Sistema Educativo Cubano que ha contribuido a mi preparación profesional.

A todos quienes de una u otra forma me estuvieron apoyando siempre, muchas gracias.

Resumen

En Cuba es de vital importancia la mejora de la matriz energética actual, por tal motivo en este trabajo se desarrolló un diagnóstico de las condiciones actuales, el cual tuvo como herramienta el método teórico de búsqueda de datos a partir de las fuentes de información brindada por la Unión Eléctrica (UNE), que ayudó como base para la búsqueda de potenciales existentes en el país que pueden aportar al mejoramiento de la matriz, que se revertirá la situación actual de 78,1% de las energías no renovables a un 46 % para el 2030 si se emplea biomasa como materia prima para la generación. Se realizó a partir del análisis de ciclo de vida (ACV), el estudio del impacto que provocan las diferentes fuentes de energía en la generación de 1 kilovatio hora (kWh), donde como resultado de este estudio se obtuvo que las mayores contribuciones a las categorías de impacto se corresponden con la generación de electricidad mediante el crudo y el fuel, evidenciando que las energías renovables impactan en menor medida sobre estas categorías lo que hace atrayente su empleo en la ampliación de la matriz energética. El estudio se concentra en la influencia que puede tener la energía producida a partir de biomasa cañera para mejorar la sustentabilidad de la matriz energética nacional, demostrándose que puede ser factible la introducción de bioeléctricas con las que se puede generar 120kWh/tcaña. Se tomó como caso de estudio la UEB Heriberto Duquesne para demostrar que al realizar cambios tecnológicos como el secado de bagazo se puede generar 0.327 kWh/tcaña más que cuando este no se realiza, además de aportar 1.88 % de energía a partir de biomasa a la matriz energética actual, logrando pequeñas reducciones en todas las categorías de impacto.

Abstract

In Cuba, the improvement of the current energetic matrix is of vital importance, for this reason in this work a diagnosis of the current conditions was developed, which had as a tool the theoretical method of searching for data from the sources of information provided by the Electricity Union (UNE), that helped as the base for the search for existing potentials in the country that can contribute to the improvement of the matrix, which will revert the current situation of 78.1% of non-renewable energies to 46% by 2030 if biomass is used as raw material for generation. From the life cycle analysis (LCA), the study of the impact caused by the different energy sources in the generation of 1 kilowatt hour kWh) was carried out, where as a result of this study it was obtained that the highest contributions to the impact categories correspond with the generation of electricity through crude oil and fuel, showing that renewable energies have a lesser impact on these categories, which makes their use attractive in the expansion of the energetic matrix. The study focuses on the influence that energy produced from sugarcane biomass can have to improve the sustainability of the national energetic matrix, demonstrating that the introduction of bioelectric plants with which 120kWh / t sugarcane can be generated may be feasible. The UEB Heriberto Duquesne was taken as study case to demonstrate that when carrying out technological changes such as bagasse drying, 0.327 kWh / t sugarcane can be generated more than when this is not carried out, in addition to providing 1.88% of energy from biomass to the current energetic matrix, achieving small reductions in all impact categories.

Índice

Introducción.....	1
Capítulo 1: Revisión bibliográfica.....	5
1.1 Matriz Energética	5
1.1.1 Energías que forman parte de una matriz energética.....	6
1.2 Matriz de generación de energía eléctrica cubana.....	12
1.3 Uso de la biomasa con fines energéticos	15
1.3.1 Cogeneración con bagazo de caña	16
1.3.2 Proceso de cogeneración.....	16
1.3.3 Ventajas de la cogeneración	17
1.4 Análisis de Ciclo de Vida (ACV).....	21
1.4.1 Evolución histórica del ACV	21
1.4.2 El análisis del ciclo de vida como herramienta de evaluación ambiental	23
1.4.3 Metodología del ACV	25
1.4.4 SimaPro: aplicación informática para el ACV.....	26
1.5 Uso de la metodología de ACV en la evaluación de estrategias relacionadas con la matriz energética a nivel internacional	27
1.6 Conclusiones parciales	29
Capítulo 2: Metodología del Análisis del Ciclo de Vida aplicada a la matriz energética cubana.....	30
2.1 Objetivo y alcance.....	30
2.2 Análisis del inventario	32
2.2.1 Inventario de biomasa cañera cubana	34
2.3 Análisis de impactos	41
2.4 Interpretación de los resultados obtenidos.....	44
2.5 Proyección de la matriz energética en Cuba	48
2.6 Conclusiones parciales	50

Capítulo 3: Alternativas de uso de la biomasa para la generación de energía eléctrica en Cuba.....	52
3.1 Biomasa	53
3.1.1 Marabú	53
3.1.2 Biomasa Cañera	54
3.2 Bioeléctricas.....	58
3.2.1 Programa de las bioeléctricas	59
3.2.1 Diferencias entre el sistema de generación de energía eléctrica de un central y una bioeléctrica.....	61
3.2.3 Cambio del equipamiento energético	63
3.3 Combustibles adicionales	64
3.3.1 Marabú	64
3.3.2 Bagazo de tributarios	64
3.4 Secado del bagazo de los centrales tributarios	65
3.4.1 Ventajas del proceso de secado de bagazo	68
3.4.2 Tipos de secadores industriales.....	68
3.4.3 Proceso de secado de bagazo en central Heriberto Duquesne	69
3.5 Impacto ambiental de la instalación de las bioeléctricas	76
3.6 Introducción de cambios tecnológicos en la fabricación de azúcar	76
3.7 Conclusiones parciales	77
Conclusiones.....	78
Recomendaciones.....	79
Bibliografía.....	80
Anexos	89

Introducción

El consumo de los recursos naturales y la emisión de sustancias contaminantes, la preservación del medio ambiente y el desarrollo sostenible son cuestiones que preocupan a la sociedad en su conjunto. Las nuevas estrategias desarrolladas para reducir el impacto ambiental derivado de la actividad industrial se basan en un enfoque integral con una mayor eficiencia de la utilización de los recursos materiales y energéticos, incrementando simultáneamente la productividad y la competitividad. Ello involucra la introducción de medidas tecnológicas y de gestión que permiten reducir los consumos de materiales y energía, prevenir la generación de residuos, reducir los riesgos operacionales; a través de todo el ciclo de producción y en todas las fases de desarrollo. Las modificaciones tecnológicas e innovaciones a los procesos industriales aparecen como conclusión de un proceso de búsqueda de un mejor desempeño productivo. Todos estos elementos se integran en el concepto de Producciones más Limpias que hoy en día constituye un principio fundamental para el desarrollo de la actividad industrial (Contreras Moya, 2007), (Mellouk and Cuadra-Sanchez, 2014).

Una impronta de la época actual es el análisis integral de las soluciones propuestas, por lo que se necesita usar herramientas que contribuyan a lograr soluciones sostenibles como la metodología del Análisis del Ciclo de Vida (ACV) que integra todos los impactos ambientales ocurridos a lo largo del ciclo de vida del producto y los relaciona con problemas ambientales específicos. Además, permite establecer prioridades para definir las estrategias preventivas de mejoramiento del desempeño ambiental (Iglesias, 2005). El correcto empleo de la herramienta de análisis de ciclo de vida está normado por las ISO 14 040 e ISO 14 044 (Seija and Ignacio, 2012).

La matriz energética, mezcla energética o mix energético es la combinación de fuentes de energía primaria que se utiliza en una zona geográfica, la cual puede ser un país, un continente o todo el mundo. Esta no solo incluye las fuentes empleadas, sino también el porcentaje de cada fuente. En algunos casos es posible utilizar indirectamente la energía primaria. En otros es necesario transformarla en energía secundaria, normalmente electricidad, lo que supondrá inevitablemente una pérdida de energía en forma de calor. El mix energético en

un país elige lo que expondrá a mayores o menores coste, vulnerabilidad a subidas de precios internacionales, posibilidad de accidentes, dependencia exterior, déficit comercial, contribución al calentamiento mundial, efectos de la sequía, apagones y otras eventualidades. Por ellos se debe planificar cuidadosamente, esta no es estática, sino que evoluciona con el tiempo, debido a la variación del coste de las diferentes tecnologías de generación, consideraciones políticas o medioambientales.

La matriz energética primaria mundial da cuenta de la vital importancia que tienen los combustibles fósiles. Más del 80 % de la energía que mueve al mundo proviene de estas fuentes de energía. La matriz secundaria mundial, permite observar como el consumo y por lo tanto la generación de electricidad se ha quintuplicado en los últimos 40 años y como han aumentado su participación en las distintas fuentes primarias. El 40 % de todas las fuentes primarias de energías se utilizan para la generación eléctrica. La importancia del carbón se profundiza aportar el 40 % del combustible mundial para electricidad. También, ha crecido la participación de la energía hidroeléctrica con el 16 % y la nuclear con cerca del 8 %. El aporte de las energías renovables está creciendo, sin embargo, la participación de las energías solar, eólica y geotérmica es aún incipiente. La generación eléctrica a partir de este conjunto de fuentes es hoy el 2,8 % (“CEEPYS | Centro de Estudios de Energía, Política y Sociedad,” 2021).

La transformación de la matriz energética, abandonando las energías fósiles y sustituyéndolas por renovables, es fundamental para la descarbonización de la economía en la que el mundo se halla embarcado para luchar contra el cambio climático.

La definición de la matriz energética de cada nación depende de la disponibilidad de recursos naturales y de sus políticas públicas, es diferente para cada uno y no existe un patrón a seguir en común.

En Cuba actualmente la matriz energética está constituida por los siguientes tipos de energía: eólica con un 0.1 %, solar 0.2 %, hidráulica con un 0.5 %, diésel con un 3.3 %, biomasa con un 3.7 %, gas acompañante con un 14.1 %, Fuel con un 33.1 % y crudo con un 45 %. La producción de energía eléctrica depende mayoritariamente de combustibles fósiles por lo que en una prioridad nacional mejorar la eficiencia energética, incrementar la generación con fuentes

renovables, incrementar la exploración y exportación de petróleo, maximizar la generación con el gas acompañante del petróleo nacional. En un futuro se planea un cambio en dicha matriz y aumentar el porcentaje de las energías eólica, solar, biomasa e hidráulica (“Cuba apuesta por una energía más limpia, diversa y eficiente,” 2014).

Aunque se han hecho algunos aportes en este sentido todavía la matriz nacional está lejos de las metas trazadas, por lo que encontrar nuevas oportunidades para la que mejore la matriz energética nacional desde cada posible nicho se convierte en la problemática científica de las investigaciones.

En Cuba no se ha llevado a cabo un análisis de ciclo de vida de la matriz energética y de la influencia de cada tipo de fuente de generación en los impactos asociados a diferentes categorías.

Actualmente se están realizando numerosos estudios para incorporar la biomasa como fuente de energía, sin dudas esto constituye un reto que tiene dos aristas, una relacionada con la modernización de las estaciones de generación de energía a partir del bagazo de caña en los centrales azucarero y la otra con la implementación de nuevas bioeléctricas en el país.

Problema científico: En Cuba no se conoce el impacto asociado a los diferentes tipos de energía que conforman su matriz energética, siendo este análisis de gran importancia para la toma de decisiones sobre la necesidad de emplear fuentes renovables de energía como es el caso de la generación a partir de biomasa cañera. Además, las estrategias para lograr la incorporación de esta fuente de energía no han sido evaluadas integralmente en función de disminuir el impacto provocado por la generación de energía en Cuba. Para dar solución al problema se plantea la siguiente hipótesis:

Hipótesis: Si se conoce el impacto provocado por las diferentes fuentes de energía que componen la matriz energética cubana se estará en condiciones de evaluar el efecto que provoca la generación de electricidad a partir de biomasa cañera a partir de un estudio integral de las medidas necesarias para realizar este proceso en los centrales azucareros cubanos

Objetivo general: Proponer oportunidades de mejoras en la generación de electricidad en Cuba a partir de la biomasa cañera usando un enfoque de ciclo de vida.

Objetivos específicos:

1. Realizar un diagnóstico de la matriz energética actual en Cuba con enfoque de ciclo de vida.
2. Aplicar la metodología del ACV para la evaluación de los impactos en el proceso de generación energética empleando biomasa cañera como materia prima.
3. Analizar las oportunidades que ofrecen el uso de diferentes materias primas como biomasa para la cogeneración.
4. Establecer para el caso de estudio UEB Heriberto Duquesne los cambios necesarios para cogenerar más energía a partir de bagazo.

Capítulo 1: Revisión bibliográfica

1.1 Matriz Energética

El desarrollo de toda sociedad se observa en función de su posibilidad para acceder a los beneficios que brinda la tecnología principalmente en la solución de problemas habitacionales, de salud y alimentación. Este acceso a la tecnología se encuentra directamente vinculado al creciente uso de recursos energéticos, con una fuerte tendencia a incrementar la utilización de los recursos primarios para la generación de energía eléctrica. El consumo de recursos energéticos a nivel mundial en el período 1973 a 2019, pasó de 6101 megatoneladas equivalentes de petróleo (Mtoe) a 19.699 Mtoe. Para el mismo período los recursos energéticos utilizados en la generación de energía eléctrica, variaron de 6131 Teravatio-hora (TWh) a 28.816 TWh (Secretariat, 2010). A nivel mundial para el año 2019, si bien el consumo de recursos energéticos tuvo un aumento que significó 4,24 veces lo consumido en el año 1973, el incremento para la generación de energía eléctrica fue de 5,88, lo cual evidencia la mayor dependencia de la sociedad a la utilización de energía eléctrica en el consumo final. No obstante, este crecimiento, la generación de energía eléctrica solo representa entre el 17 a 19 % de la matriz energética total de un país, siendo el transporte el sector que mayores requerimientos energéticos evidencia. Debido a su facilidad de uso, y bajo impacto sobre el medio ambiente, en el punto de uso final, el consumo eléctrico está creciendo en forma constante. Este crecimiento se produce a nivel mundial con características que dependen de situaciones específicas de cada región y del desarrollo de la sociedad a la cual se vincula, por lo cual se observa un crecimiento con diferentes ritmos (Arnera et al., 2017; González et al., 2017).

En países con altos estándares de confort, se observa la utilización de la electricidad en nuevas aplicaciones, o bien el reemplazo de otras formas de energía por electricidad, resultando así un consumo cada vez mayor. Se vislumbran en los hogares mayores consumos, ya sean por el uso de nuevos aparatos, como por la inserción del transporte vehicular eléctrico, y la tendencia creciente a la incorporación de otros servicios basados en las tecnologías de la matriz energética y sistema eléctrico. De este modo, progresivamente resultarán

más exigentes los requerimientos del suministro eléctrico, exigiendo mayores estándares en calidad, confiabilidad y economía (Arnera et al., 2017).

1.1.1 Energías que forman parte de una matriz energética

Durante mucho tiempo, los combustibles fósiles —incluidos el carbón, el petróleo crudo y el gas natural— han sido la principal fuente de energía comercial para producción industrial, calefacción y transporte. Los hidrocarburos, especialmente el petróleo, también han sido utilizados en la industria farmacéutica, la construcción y la industria del vestido, en fertilizantes, alimentos, productos de plástico y pinturas.

La inclusión en la matriz energética de nuevas fuentes de energía, entre otras la nuclear y las renovables —eólica, solar, geotérmica, hidráulica y las producidas con biomasa— ha sido mínima, debido al alto costo y al insuficiente desarrollo de las tecnologías. En el caso de la energía nuclear, hay otras consideraciones relacionadas con la seguridad, en particular la eliminación a largo plazo de los desechos radioactivos. Sin embargo, el reconocimiento de los efectos ambientales dañinos de la excesiva dependencia de los combustibles fósiles, junto con la preocupación cada vez mayor por la disponibilidad de algunos combustibles de este tipo y su capacidad de hacer frente a la creciente demanda de energía a nivel mundial, ha puesto de relieve la necesidad de una combinación más amplia de fuentes de energías menos contaminantes. Por lo tanto, las energías renovables, en particular los biocombustibles, despiertan cada vez más interés; además, a partir de la crisis del petróleo de 1973, la crisis de oferta de energía ha alertado a las autoridades de todos los países, tanto desarrollados como en desarrollo, sobre la necesidad de dejar de depender de una sola fuente de energía. Las crisis más recientes, a consecuencia de las cuales en julio de 2008 el precio del petróleo llegó a un máximo de 150 dólares americanos por barril, también han servido de recordatorio de la conveniencia de una combinación más variada de fuentes de energía. La ampliación de esa combinación en todo el mundo plantea una serie de graves problemas, para hacer frente a los cuales se requieren medidas estratégicas e inversiones de gran magnitud, en particular en el sector público, a fin de facilitar el desarrollo de nuevas fuentes, que actualmente son muy costosas o que crean externalidades negativas propias, como ocurre con algunos biocombustibles. Para atender

estos problemas los formuladores de políticas tienen que aplicar un enfoque holístico e integral a la seguridad energética que les permita comparar en forma realista las disyuntivas existentes con otros objetivos de las políticas de desarrollo.

El sistema energético mundial ha estado dominado históricamente por combustibles que emiten grandes volúmenes de gases de efecto invernadero. Originalmente, la leña fue el principal combustible industrial, pero su empleo se redujo después del descubrimiento del carbón, que se consume más lentamente y produce mucho más calor. A partir de fines del siglo XVIII, el carbón pasó a convertirse en el combustible preferido y fue el propulsor de la Revolución Industrial. El empleo de petróleo se expandió rápidamente desde 1945 hasta llegar a suplantar al carbón en los años sesenta, a medida que aumentaba la demanda de combustible para los medios de transporte. Hoy en día, el sistema energético mundial es mucho más complejo, y dispone de muchas fuentes que compiten entre sí y vectores energéticos prácticos y de buena calidad. En conjunto, los combustibles fósiles satisfacen alrededor del 80 % de las necesidades mundiales de combustibles, mientras la leña, la energía hidroeléctrica y la energía nuclear cubren el porcentaje restante. En los últimos treinta y cinco años el gas natural ha visto aumentar su participación en el mercado a más de una quinta parte, gracias a su abundancia, su eficiencia, sus numerosos usos y la emisión de un volumen de gases de efecto invernadero mucho menor que el producido por el carbón y el petróleo. Las fuentes renovables de energía registraron un incremento similar (5 %) de la participación en el mercado en el mismo período, pero el carbón ha vuelto a despertar interés, a pesar de ser un combustible muy contaminante, y su demanda podría aumentar si se perfeccionara más las técnicas no contaminantes de uso del carbón. Aunque las reservas convencionales de petróleo crudo se están reduciendo, el potencial que presentan las arenas bituminosas, que ya forman parte de la producción total de crudo, y el carbón es enorme y podría sostener la industria de combustibles fósiles por cierto tiempo, en función del ritmo del desarrollo tecnológico, lo que a su vez influirá en el costo de la extracción de petróleo de las arenas bituminosas. En la figura 1 se observa que la parte correspondiente al petróleo en el total del suministro de energía disminuyó un

10% en poco más de tres décadas (1973-2007), pero la nueva información disponible sobre demanda mundial de energía entre 1990 y 2007 revela que la mayor parte de la reducción se produjo entre 1973 y 1990, lo que muy probablemente haya obedecido a las dos crisis del petróleo. De hecho, en el período 1990-2007 el porcentaje de la demanda mundial de energía correspondiente al petróleo disminuyó apenas un 2,6, del 36,7 al 34,1 %. A lo largo del periodo 2007 al 2020, la demanda diaria de este producto experimentó un ascenso considerable. Concretamente, en el año 2018, dicha demanda ascendía a 99,3 barriles por día. La Organización de Países Explotadores de Petróleo (OPEP) previó que en el 2020 se lograría un hundimiento histórico de la demanda mundial de petróleo debido a la paralización por la pandemia que provocó un impacto brutal, extremo y de magnitud mundial en el mercado del petróleo ya que se lograría disminuir de 6.85 millones de barriles al día. Pero las estadísticas demostraron que esto no fue así sino que a pesar de dicha pandemia la demanda de petróleo aumentó en 1.6 millones de barriles al día.

Se prevé que el consumo mundial de energía, incluida la de fuentes renovables, aumentará un 45 % hasta el año 2030. Para que pudiera darse un incremento de tal magnitud a partir de los niveles actuales, se requeriría una inversión de 25 a 30 billones de dólares, es decir superior a un billón al año durante los próximos veinte años. Según las proyecciones de la Agencia Internacional de Energía, el petróleo crudo seguirá siendo la principal fuente de energía en todo el mundo y cubrirá el 77 % del aumento de la demanda entre 2007 y 2030. Esto supone un incremento de cerca de 85 a 105 millones de barriles diarios (mb/d) entre 2008 y 2030. Las proyecciones también indican que la demanda de carbón crecerá un 53 % entre 2007 y 2030 y la de gas natural registrará un alza del 42% en el mismo período. Estas proyecciones dejan en evidencia un grave problema: el sector energético representa el 60 % de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero, por lo que es un importante factor del calentamiento atmosférico. Por otra parte, las fuentes baratas y fiables de energía son esenciales para el crecimiento económico sostenible, la mejora de las condiciones de vida y la superación de la pobreza en los países en desarrollo. De hecho, gran parte de las inversiones que se realicen en las próximas décadas en el sector energético se centrarán en los países en desarrollo, por lo que la

energía es el elemento crucial de la confluencia entre el clima y los desafíos del desarrollo. En las siguientes figuras se observan como la matriz energética mundial cambia a medida de pasan los años.

Oferta de energía primaria, 1973 y 2007

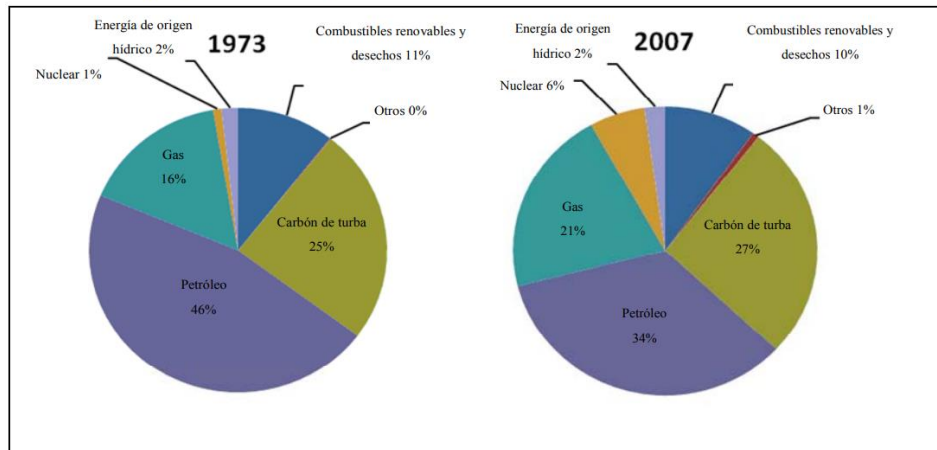


Figura 1: Energía primaria 1973 y 2007. Fuente: (González, E y col., 2017. La matriz energética global y sus tendencias, in: 1º Congreso de Energías Renovables y Arquitectura Bioclimática. CABER 2017.)



Figura 2: Energía primaria 2019. Fuente: (Wikipedia.)

La mayor parte de la infraestructura energética de los países en desarrollo aún no ha comenzado a construirse, lo que explica la insuficiencia y el alto costo de los servicios de energía en muchos países del mundo en desarrollo. Dada esta situación, podría ser menos costoso y más fácil adoptar un modelo basado en energías renovables que reorientar la infraestructura existente. Sin embargo, lo

más probable es que todo esfuerzo de gran envergadura orientado a la reducción de las emisiones exija enormes inversiones, superiores a las necesarias en un contexto caracterizado por altas emisiones. Por lo tanto, en muchos países la falta de financiación asequible y previsible sigue siendo el principal obstáculo que dificulta la transición a una trayectoria de desarrollo con bajas emisiones y alto crecimiento.

Para lograr una combinación energética que produzca bajas emisiones podría recurrirse a una amplia gama de fuentes, entre otras la eólica, la geotérmica, la solar, la hídrica y la biomasa. Aunque algunas de estas se están convirtiendo rápidamente en fuentes convencionales de energía, el bajo grado actual de desarrollo tecnológico y el alto costo de la mayoría de ellas limita las posibilidades de integración en la matriz energética mundial a una escala significativa en el futuro previsible. La energía eólica es una de las fuentes renovables de amplio uso en la actualidad.

La energía geotérmica, que se origina bajo la superficie de la Tierra, se explota sólo en unos pocos lugares. El vapor procedente de pozos geotérmicos se emplea para producir energía eléctrica y térmica. El uso de este tipo de energía renovable va en rápida expansión (20 % anual). Para el aprovechamiento de la energía solar se utilizan células fotovoltaicas, que permiten producir electricidad, o colectores de energía para calentar agua. Esta forma de energía es conveniente para muchos habitantes de áreas rurales, que suelen estar desconectados del sistema en red debido al alto costo de la conexión. La hidroenergía tiene un enorme potencial, pero hasta ahora se ha aprovechado menos de un tercio de los recursos hídricos mundiales, debido a la sensibilidad que despierta su dimensión ambiental y las colosales proporciones de la reubicación de las comunidades que se verían afectadas por la construcción de represas.

Hay otras formas de energía cinética, que incluyen la energía de las olas y la energía mareomotriz, que se encuentran en una etapa de desarrollo incipiente y, por lo tanto, no forman parte de la combinación energética mundial. La mayor parte de la energía generada con biomasa es de origen vegetal. Los países en desarrollo son los mayores consumidores de biomasa, dado que los biocombustibles tradicionales, entre otros la madera, representan alrededor de

una tercera parte del total de energía que consumen, pero no son fuentes eficientes.

Por tercer año consecutivo el consumo de energía creció 1 %, muy por debajo del promedio de 1.8 % de la última década. Los valores de las diferentes fuentes de energía están expresados en millones de toneladas de petróleo equivalente (mtpe). Las energías con mayor participación en la matriz energética mundial en 2016 son el Petróleo, el Gas Natural y el Carbón, una tendencia que se mantiene ya varias décadas.

La transición hacia una matriz energética con mayor participación de las energías renovables es un proceso gradual, progresivo y lento. Las energías convencionales seguirán presentes mayoritariamente en la composición de la matriz energética. Las opciones de renovables que tome un país difieren según disponibilidad de recursos, costo de la tecnología, marcos de políticas, entre otros factores. Los Emiratos Árabes Unidos prefieren la solar; China es líder en la energía térmica en aplicaciones de calefacción de agua y espacio; Ucrania y Polonia dependen de la bioenergía. Mientras que América del Sur se apoya en la hidráulica (González et al., 2017).

Sánchez (2014), expone que, a pesar de los esfuerzos de muchos países por diversificar su matriz energética con fuentes de energía renovable, en realidad siguen siendo los hidrocarburos como el petróleo, el carbón y el gas natural los principales medios para la producción de energía. Coria (2014) resalta que, una nueva matriz energética, sin duda, deben desempeñar un papel protagónico las energías renovables, por las enormes ventajas que éstas representan en comparación con las energías convencionales, que son mucho más contaminantes. Define las diferentes fuentes renovables de energía, pero no llega a mostrar la matriz energética. Dafermos et al. (2015), parten de un análisis de las políticas y de las necesidades del país en el contexto de los límites biofísicos del planeta, como base para proponer orientaciones y directrices estratégicas de política pública en el ámbito energético. Se establecen los porcentajes de participación de los diferentes portadores energéticos en la matriz energética. Del Río (2016), plantea que la matriz energética contribuye a la definición de las normas colectivas y que estructuran las relaciones energéticas y Ortiz (2018), expone una transición energética, se refiere a la manera en que

los diferentes sectores de la sociedad participan en la toma de decisiones asociadas al sistema eléctrico; ambos autores no presentan definiciones de matriz energética. Algunas de las características comunes que presentan experiencias sistematizadas sobre este tema se destacan a continuación (Martínez Hernández, 2018):

- Promueven la eficiencia energética, a partir de la inclusión de fuentes renovables de energía y de algunos niveles de coordinación de recursos, información, participación ciudadana, aunque de forma limitada y solo en el consumo ((Fudge and Peters, 2009); (Fudge et al., 2013); (Heinbach et al., 2014); (Fudge et al., 2016)).
- Reconocen la importancia de propiciar sinergia y redes de actores ((Haxeltine and Seyfang, 2009); (Seyfang et al., 2014)).
- Se refieren solamente a aspectos vinculados a la infraestructura energética (Bolton and Foxon, 2013) y a la importancia de iniciativas regionales (Oteman et al., 2014).
- Destacan a las fuentes renovables de energía como oportunidad de inversión (Gailing and Röhring, 2016).

1.2 Matriz de generación de energía eléctrica cubana

Cuba al igual que todos los países del mundo presentan una demanda de electricidad, en la siguiente figura se aprecia la demanda actual de Cuba al sistema eléctrico.

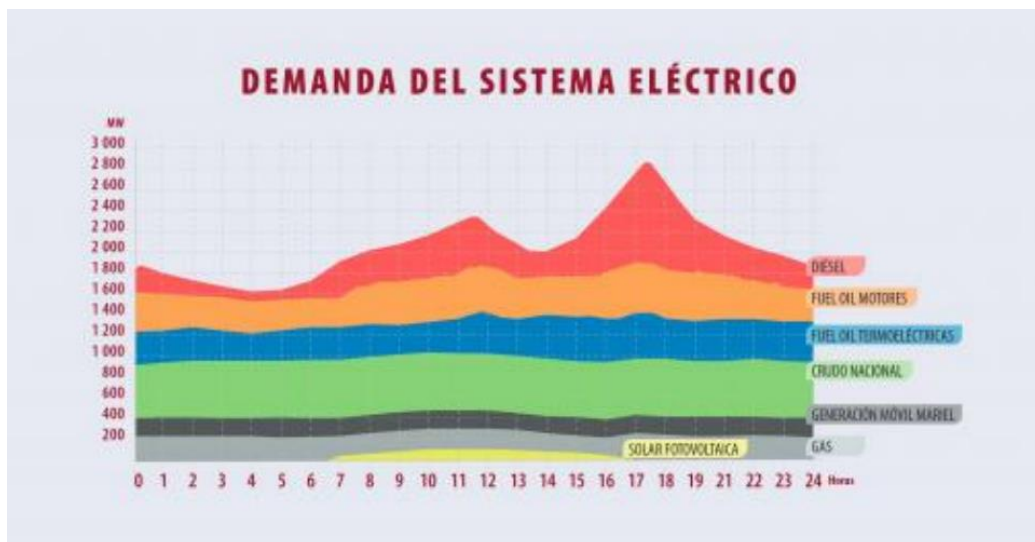


Figura 3: Demanda del sistema eléctrico cubano. Fuente: (Arnera, P.L y col., 2017. Matriz energética y sistema eléctrico: estrategia e integración.)

El 95 % de toda la electricidad que se consume en el país se produce con combustibles fósiles. Para cubrir la demanda de electricidad, la Unión Eléctrica (UNE) emplea, primero, los combustibles menos costosos, y va incorporando en el proceso de generación eléctrica todos los combustibles hasta llegar al diésel, el más caro. En la siguiente figura se observa el consumo de los combustibles en Cuba, además de especificar cuáles son importados y cuales nacionales.



Figura 4: Consumo de combustibles. Fuente: (Arnera, P.L y col., 2017. Matriz energética y sistema eléctrico: estrategia e integración.)

El 48 % de los combustibles empleados en la generación es importado, a precios que, además del producto, tienen incluidos valores de primas impuestas por los

suministradores para resarcirse del posible riesgo de ser sancionados debido a la aplicación de las leyes estadounidenses del bloqueo a Cuba, a lo cual se suman los costos de los fletes y seguros. El combustible hay que traerlo de lugares que no están cercanos al país.

En resumen, la generación, transmisión y distribución de la electricidad es un proceso costoso, en el cual el presupuesto del Estado emplea una masa de subsidio alta para cubrir los costos de la electricidad. Por eso, es importante la transformación de la matriz de generación, para lograr una mayor participación de las fuentes renovables de energía en la generación eléctrica y la utilización de los combustibles nacionales, como el crudo nacional, en la generación de electricidad. Ese objetivo está recogido en la política de desarrollo de las fuentes renovables de energía y la eficiencia energética, y dentro del programa que define la estrategia del sector hasta 2030 e incluye, además, el Programa de desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional y el Programa Petrolero, enfocado a seguir incrementando la producción del petróleo nacional. En la figura 5 se aprecia la generación de energía en Cuba y en la figura 6 como se manifiesta los consumos.

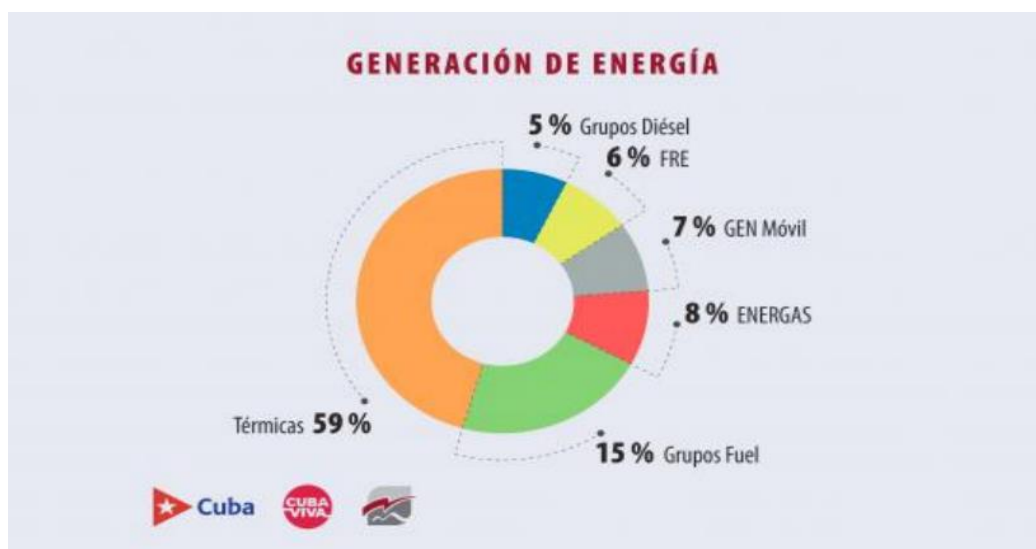


Figura 5: Generación de energía. Fuente: (Arnera, P.L y col., 2017. Matriz energética y sistema eléctrico: estrategia e integración.)

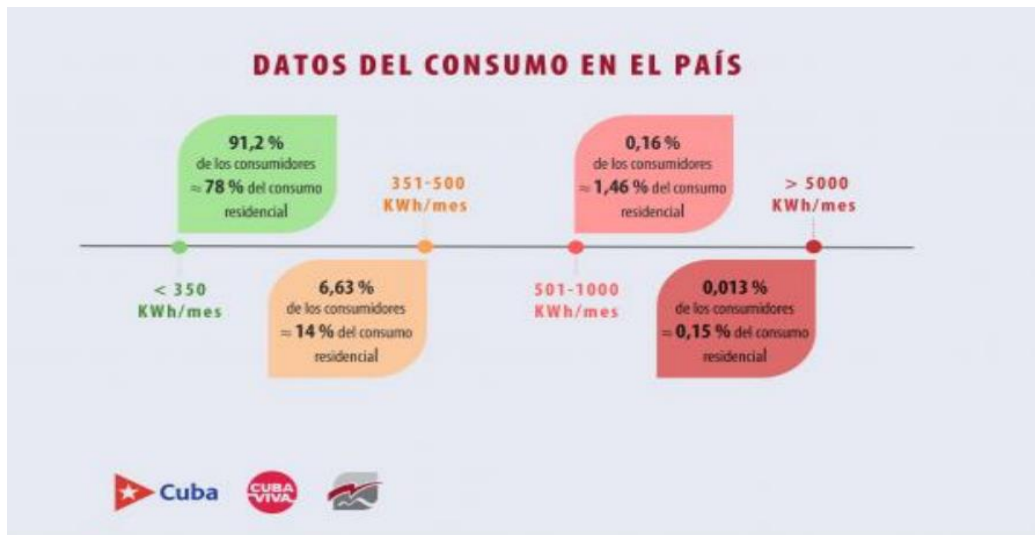


Figura 6: consumo de Cuba. Fuente: (Arnera, P.L y col., 2017. Matriz energética y sistema eléctrico: estrategia e integración.)

En el sector residencial cubano el consumo de energía eléctrica se comporta de la siguiente manera:

- El 91.2 % de los consumidores utilizan menos de 350 kWh/mes, lo que representa el 78 % del consumo total del sector residencial.
- El 6.63 % de los consumidores emplean entre 351 y 500 kWh por mes, lo que representa el 14 % del consumo total del sector residencial.
- El 97 % de los consumidores está por debajo de 500 kWh por mes.
- El 2.02 % de los consumidores utilizan entre 501 y 1 000 kWh/mes, lo que representa el 6.42 % del consumo total del sector residencial.
- El 0.16 % de los consumidores emplean entre 1 000 y 5 000 kWh por mes, lo que representa el 1.46 % del consumo total del sector residencial.
- 125 consumidores (0.013 % del total) utilizan más de 5 000 kWh/mes, lo que representa el 0.15 % del consumo total del sector residencial (Castro, 2021).

1.3 Uso de la biomasa con fines energéticos

La biomasa es la abreviatura de masa biológica y resulta el conjunto de la materia orgánica de origen vegetal o animal, los materiales que producen su transformación natural o artificial, son:

- Cultivos energéticos, productos del manejo del bosque sin valor comercial y plantaciones energéticas.
- Bagazo, paja de caña, marabú, aserrín y residuos de aserraderos.
- Cáscara de arroz, afrecho de café, residuos agrícolas, ganaderos y forestales.
- Aceites vegetales, crudos o usados.
- Excretas animales (porcino, vacuno, avícola, entre otros).
- Residuos sólidos urbanos.

1.3.1 Cogeneración con bagazo de caña

La cogeneración con bagazo de caña captura el calor creado por medio del proceso de generación de electricidad; de esta forma se crea calor y energía eléctrica de manera simultánea. Este tipo de solución puede beneficiar a todo tipo de empresas, pues posee una recuperación de inversión en un plazo de tres a cinco años, así como una reducción de costos de energía hasta de un 40 por ciento. Este es un procedimiento mediante el cual se produce de forma simultánea energía eléctrica, mecánica y térmica. El sector azucarero ha sido señalado por estudios nacionales e internacionales como aquel de mayor potencial de cogeneración por su disponibilidad de biomasa, en especial el bagazo. Este subproducto, derivado de procesos de cosecha y molienda de caña, constituye la fuente primaria de energía para la cogeneración.

1.3.2 Proceso de cogeneración

Este proceso corresponde a la generación de energía como parte del proceso productivo, bien sea de azúcar o de etanol. Los ingenios desde sus inicios han utilizado el bagazo de la caña (combustible renovable) como combustible para alimentar sus calderas y utilizar el vapor como energía para el funcionamiento de sus procesos. La cogeneración entonces, utiliza la energía en forma de calor producida por el bagazo para generar vapor y luego mediante el uso de turbogeneradores, la energía eléctrica. El vapor de escape del turbogenerador entonces, va al proceso productivo mientras que la electricidad es mayoritariamente utilizada para su consumo propio y una porción se vende a la red nacional. Parte del bagazo también se utiliza en la industria papelera como fuente de fibra, lo cual evita la tala de árboles (Ramirez, 2017).

1.3.3 Ventajas de la cogeneración

Los principales beneficios de la cogeneración son:

- **Combustible renovable:** la cogeneración en el sector sucro-energético colombiano utiliza el bagazo como combustible para la generación de energía térmica. Esto significa que no se están utilizando combustibles fósiles para la obtención de la misma sino biomasa, la cual se puede sembrar y cosechar las veces que sean necesarias, permitiendo así tener combustible disponible en el largo plazo. En el caso del Valle del Cauca, existen fincas que han sembrado caña de azúcar por más de 100 años y registran óptimos rendimientos, como ocurre en aquellos lugares donde se ha aplicado.
- **Reducción de emisiones de gases efecto invernadero:** al ser el bagazo un combustible de biomasa, no se utilizan combustibles fósiles para la cogeneración, lo cual reduce la emisión de gases efecto invernadero, ayudando así a la mitigación del calentamiento global.
- **Generación distribuida:** la cogeneración es una alternativa para estimular el desarrollo de generación distribuida, es decir que no haya concentración en una región generadora. Esto implica que, al distribuir la generación en la geografía colombiana, se reducen las pérdidas del sistema por concepto de transporte y hace menos vulnerable al sistema frente a eventuales cortes de transmisión por derrumbes o voladuras de torres.
- **Firmeza al sistema:** además de la menor concentración regional en la generación, la matriz colombiana depende en cerca de 78 % de la generación hidráulica. Esta depende a su vez de las precipitaciones y caudales de los ríos que alimentan los embalses. Durante el verano, la disponibilidad de agua se reduce. En el caso del sector sucro-energético, en verano es cuando el campo tiene una mayor aptitud para la cosecha, por lo que se tiene un mayor abastecimiento de caña en los ingenios y por lo tanto hay abundancia de combustible para la cogeneración.
- **Diversificación de la matriz energética:** Las diferentes alternativas de cogeneración, bien sea con biomasa o con otros energéticos, estimulan la utilización de diferentes alternativas energéticas, lo cual diversifica la utilización de combustibles.

- Eficiencia energética: El mayor aprovechamiento del combustible mediante la implementación de tecnologías más eficientes implica un uso racional de la energía y se genera un claro estímulo a la implementación de acciones de incremento de la eficiencia energética para generar excedentes comercializables en la red de interconexión nacional (Ramírez, 2017).

1.3.4 Uso de la cogeneración en el mundo

En el presente epígrafe se puede apreciar la utilización de la cogeneración con biomasa en países europeos, en América Latina y su uso en Cuba.

1.3.4.1 Uso de biomasa en la cogeneración en Europa

En la Unión Europea, actualmente el 11 % de la generación eléctrica es fruto de la cogeneración. Sin embargo, existen grandes diferencias entre los estados miembros, las cuales varían entre 0 % y 42,8 %. De acuerdo con los datos de Eurostat, no hay cogeneración en Malta, muy poca en Chipre (0,3 %) y en Grecia (1,6 %). Dinamarca tiene la mayor participación dentro de su generación, alcanzando el 42,8 %, seguido de Letonia (40,9 %). Existe un gran potencial en los nuevos estados miembros, particularmente por la necesidad de renovación de los esquemas de calefacción, para actualizarlos a sistemas modernos que además de distribuir calor, puedan distribuir energía eléctrica. En China e India, la cogeneración participa con cerca del 13 % y 5 % de la generación, respectivamente. La Agencia Internacional de Energía -IEA - proyecta que para 2030, la participación de la cogeneración dentro de la generación se incrementará a 28 % y 26 % en China e India, respectivamente, siempre y cuando se cuente con políticas e incentivos adecuados. En China el potencial de crecimiento está determinado por su amplia base industrial. En EE.UU. la cogeneración tiene una larga historia en el sector industrial. Este sector es responsable de aproximadamente el 25 % del total de consumo de energía del país. Actualmente la cogeneración aporta cerca del 12 % de la generación y representa cerca del 9 % (85 giga-Watt (gW) en 3.300 lugares) de la capacidad de generación total. La capacidad de cogeneración está concentrada principalmente en los estados que tienen gran consumo industrial, como por ejemplo industria petroquímica y refinerías de petróleo. Solo Texas contribuye

con el 20 % de la capacidad instalada de cogeneración y los 5 mayores estados cogeneradores aportan la mitad de la capacidad instalada (Ramirez, 2017).

1.3.4.2 Uso de biomasa en la cogeneración en América Latina

La trascendencia de la cogeneración de energía en el mundo y los proyectos para llevarla a cabo, han experimentado un importante desarrollo, y dentro de las causas de este cambio, se pueden considerar, el alza en los precios de los combustibles, el avance de la tecnología en las energías renovables y las políticas de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) que están plasmadas en las metas de los diferentes países. La participación actual de la generación en Centroamérica (Costa Rica, El Salvador, Guatemala, Honduras, Panamá y Nicaragua), está compuesta por un 42 % de energía hidráulica, 37 % de generación térmica con base en diésel, 7 % de generación térmica con base en carbón, 5 % de generación geotérmica, 3 % de eólica y 6 % de cogeneración. De otro lado, México tiene un gran potencial de biomasa de residuos agrícolas, y con el uso de nuevas tecnologías para la cogeneración de energía eléctrica, se estima que para el año 2025 los 57 ingenios del país alcancen un potencial técnico máximo de cogeneración de 1.025 Mega-Watt (MW) y neto de 979 MW, de acuerdo con estimaciones realizadas por la Secretaría de Energía de México – SENER – con base en el crecimiento anual de cogeneración a partir de bagazo que ha experimentado la industria en los últimos 5 años. En el caso de Brasil, los planes de expansión de cogeneración de la mano con la expansión del sector sucro-alcoholero, indican que pasarán de tener una capacidad instalada de 10 gW en 2010 a más de 30 gW en 2020. Esto implica que la participación de la cogeneración será de un 18 % de la matriz energética brasilera en ese año (Ramirez, 2017).

1.3.4.3 Uso de biomasa en la cogeneración en Cuba

El aprovechamiento de la biomasa forestal con fines energético se debe hacer siguiendo criterios de sostenibilidad en aras de proteger los bosques. La biomasa cañera es el portador energético renovable cuyo uso está más difundido en Cuba. En la Isla la potencia instalada hasta el 2019 para la cogeneración de energía eléctrica y térmica en la industria azucarera asciende a los 600 MW. A escala mundial la biomasa es responsable del 10 % del suministro global de

energía primaria, 35 % de los cuales es para servicios energéticos modernos. En el 2020 se alcanzó hasta el 20 % de la demanda global de generación de energía eléctrica. Pero la biomasa en la matriz energética actual tiene una incidencia del 3.7 %. El uso de la biomasa para cogenerar energía térmica y eléctrica en la rama azucarera, los centrales operativos están interconectados al Sistema Electroenergético Nacional (SEN) y en el 2020 generaron 509 gWh. Los más eficientes generaron 55 kWh por cada tonelada de caña molida, muy por debajo de lo alcanzable si se emplearan tecnologías más eficientes disponibles en el mundo (Bravo Hidalgo, 2015).

Cuba tiene en servicio 56 centrales azucareros, con medios capaces de generar vapor y electricidad para satisfacer el proceso fabril azucarero, y vender excedentes eléctricos al SEN del país, en tanto operen con la eficiencia que se requiere, pero los planes gubernamentales establecen pasar para 2030 el 24 por ciento de la energía del país que se genera a fuentes renovables así que se debe ir al empleo de plantas de cogeneración de alta eficiencia. Por lo que las autoridades cubanas priorizan el montaje de 17 plantas bioeléctricas cercanas a refinerías de azúcar para elevar la generación de energía que se entrega al SEN. Esas plantas son de alta eficiencia y se instalan en centrales azucareros seleccionados por disponer de suficiente área forestal. Esas bioeléctricas, sumadas a las 39 refinerías azucareras restantes, que también recibirán inversiones para mejorar la eficiencia productiva, cuentan con un plan para entregar en 2030 a la red eléctrica nacional el 14 por ciento de la energía de Cuba. Esto no se puede lograr con las actuales instalaciones de los ingenios; por tanto, hay que hacerlo incorporando plantas de alta eficiencia que produzcan más de 20, 35, 50 y 62 megavatios, de acuerdo con la capacidad de molida de caña de las fábricas seleccionadas y la tecnología y presión de vapor que se instale. Los planes prevén la explotación de las nuevas bioeléctricas hasta 300 días al año, y que una vez concluida la zafra azucarera, que dura 150 días como máximo, el resto del tiempo se generaría electricidad con el aprovechamiento de biomasa forestal. Esa biomasa tiene un mayor valor calórico que el propio bagazo de la caña de azúcar, y permitirá aportar ingresos superiores al proyecto y, por supuesto, reducir el tiempo de recuperación de la inversión.

En la central provincia de Ciego de Ávila, se construyó una moderna planta aledaña al municipio de Ciro Redondo, que ha sido la primera instalada en la isla (Ver figura 7). Con ese potencial instalado, pudiera generar 800 kilovatios-hora ahora está en su inicios pero puede generarlo, sumando todas las centrales en operaciones, aún con las bajas eficiencias registradas a partir de limitaciones tecnológicas actuales, ese sector tendría un valioso potencial para vender un 15 por ciento de la energía generada al SEN (“ESPECIAL: Cuba aspira a generar más electricidad con el sector azucarero| Spanish.xinhuanet.com,” 2021).



Figura 7: Bioeléctrica de Ciro Redondo. Fuente: (Hernández, B., 2018. Oportunidades de inversiones en Bioeléctricas.)

1.4 Análisis de Ciclo de Vida (ACV)

En el presente epígrafe se muestra la evolución histórica del ACV, su análisis como herramienta de evaluación ambiental, el contenido de cada una de las partes de la metodología del ACV las cuales serán aplicadas a la matriz energética cubana en el Capítulo 2. Por último se muestra el software SimaPro, aplicación informática para el ACV.

1.4.1 Evolución histórica del ACV

El análisis del ciclo de vida es una técnica que empezó a utilizarse en Estados Unidos en los años sesenta. Su evolución histórica se divide en dos períodos: el primero va desde los años sesenta hasta finales de los ochenta y el segundo, comenzó en 1990 y continúa en nuestros días.

El análisis del ciclo de vida fue originalmente desarrollado en la década del 70 a raíz de la crisis energética. Inicialmente, se limitó a simples balances de materia

y energía a lo largo del proceso de generación y consumo energético, con vistas a identificar oportunidades de ahorro de energía a través de la cadena de producción y consumo. Dada la estrecha relación existente entre el consumo energético, el consumo de recursos materiales y las emisiones de residuos, no fue difícil evolucionar hacia el ACV tal como se le conoce en la actualidad.

En la medida que el requerimiento de minimización de consumo de recursos y de generación de emisiones se generalizó en el mundo industrializado, la herramienta de ACV fue madurando progresivamente. El gran salto metodológico fue dado a comienzos de la presente década, con las contribuciones de la Agencia de Protección Ambiental (EPA), e instituciones ambientales europeas, tales como la Oficina Federal del Ambiente, Bosques y Paisajes (BUWAL), el Centros para Estudios Medioambientales (CML), entre otros. En su forma actual, el ACV constituye una herramienta de gestión ambiental y diseño de procesos menos contaminantes. Ha sido incorporado en el desarrollo de los sistemas de eco etiquetado, en la formulación de guías para el desarrollo de “productos ambientalmente favorables” y en las normas ISO. Las normas ISO poseen varios estándares asociados a la conducción de ACV:

- Norma ISO 14040: presenta los principios generales y requerimientos metodológicos del ACV de productos y servicios.
- Norma ISO 14041: guía para determinar los objetivos y alcances de un estudio de ACV y para realizar el análisis de inventario.
- Norma ISO 14042: guía para llevar a cabo la fase de evaluación de impacto ambiental de un estudio de ACV.
- Norma ISO 14043: guía para la interpretación de los resultados de un estudio de ACV.
- Norma ISO 14048: entrega información acerca del formato de los datos que sirven de base para la evaluación del ciclo de vida.
- Norma ISO 14049: posee ejemplos que ilustran la aplicación de la guía ISO 14041.

Junto al ACV existe un conjunto de herramientas complementarias que permiten evaluar las cargas ambientales, con diferente resolución y con distintos límites del sistema estudiado. Algunas de éstas son:

- Evaluación de impacto ambiental: herramienta para la toma de decisiones que incluye la identificación, cuantificación y valoración de los impactos ambientales asociados a un proyecto
- Evaluación de tecnologías: herramienta de diseño de procesos menos contaminantes, cuyo objetivo es evaluar comparativamente diferentes opciones tecnológicas, sobre la base de sus atributos ambientales, técnicos, económicos, sociales, etc.
- Análisis de riesgos: evalúa posibles accidentes, considerando la probabilidad de ocurrencia y las consecuencias sobre las personas, las instalaciones y el medio ambiente. Permite identificar y evaluar medidas de prevención y control.
- Análisis de intensidad de recursos: evalúa la cantidad de materiales y energía que se utiliza en un sistema de producción asociado a un producto o servicio, a lo largo de su ciclo de vida. Trabaja sobre el total de materia y energía, sin especificar la naturaleza y composición específica.
- Evaluación de desempeño ambiental: es una herramienta interna que provee al sistema de gestión con información ambiental objetiva y verificable sobre el desempeño de una organización. Se debe seleccionar indicadores ambientales adecuados para describir la interacción con el medio ambiente. Se aborda en las normas ISO 14031 (“Análisis del Ciclo de Vida.pdf,” n.d.).

1.4.2 El análisis del ciclo de vida como herramienta de evaluación ambiental

En la actualidad, legar a las futuras generaciones un medio ambiente apto para la continuidad de la civilización se ha convertido en una de las principales preocupaciones de la humanidad. En el marco de la globalización de las economías no es posible estar al margen de esta preocupación. En estos días, los consumidores son más exigentes, tanto en la conservación de los recursos naturales y en la protección del medio ambiente, como en la calidad de los productos y servicios que reciben. Por tal motivo, la industria enfrenta el reto de producir con alta calidad y satisfacer las expectativas de los consumidores y de otras partes interesadas en el tema de la protección del medio ambiente (Rodríguez, 2003).

En cada una de estas instancias se generan impactos ambientales diversos, los que deben ser tomados en consideración cuando se desea evaluar el efecto de un proceso sobre el medio ambiente. El análisis del ciclo de vida (ACV) consiste en evaluar cada uno de los efectos ambientales generados a lo largo de la vida del producto, vale decir, desde las fuentes de recursos primarios (desde su “cuna”), hasta el consumo y disposición final (hasta su “tumba”). Ello permite identificar los impactos sobre los diferentes compartimentos ambientales más allá de los límites de la planta productiva. Dichos impactos inducidos pueden, en muchos casos, ser de mayor relevancia que aquellos ocasionados directamente por el proceso de manufactura del producto. Por ejemplo, la sobre-explotación y una gestión inadecuada del recurso forestal pueden degradar significativamente la calidad del suelo, con los consiguientes impactos negativos sobre la tasa de renovabilidad del recurso y sobre la calidad de las aguas superficiales, debido al arrastre de sedimentos y material orgánico disuelto derivados de procesos erosivos (“Análisis del Ciclo de Vida.pdf,” n.d.).

El ciclo de vida de un producto inicia con la extracción de las materias primas y termina cuando la vida útil del producto finaliza, convirtiéndose en un residuo que ha de ser gestionado adecuadamente. Durante la fabricación, las empresas deben evaluar el impacto ambiental que tiene su proceso, además tienen la responsabilidad sobre el impacto que ocasionan las partes involucradas en el proceso hasta que el producto llega al cliente consumidor, por ejemplo, proveedores, distribuidores y consumidores. Esta cadena, que va ‘desde el nacimiento hasta la tumba’ es lo que se denomina ciclo de vida de un producto (Rodríguez, 2003).

El ACV es una poderosa herramienta de gestión ambiental que puede ser de suma utilidad para ayudar en la toma de decisiones por parte de quienes tienen a su cargo los destinos de las empresas, ya sea que se emplee sola o conjuntamente con otras herramientas tales como la evaluación del riesgo y la evaluación del impacto ambiental. Dicha información, combinada con datos económicos, sociales y laborales, puede ser utilizada por los sectores para la toma de decisiones estratégicas importantes, lo cual amplía sus aplicaciones más allá del terreno ambiental.

En concreto, el ACV permite dar respuesta a cuestiones como:

- Comparativa entre dos procesos diferentes de fabricación de mismo producto.
- Comparativa entre dos productos de diferente naturaleza que tienen aplicaciones similares.
- Comparativa entre las diferentes etapas del ciclo de vida de un mismo producto.

1.4.3 Metodología del ACV

El ACV de un producto es una metodología que intenta identificar, cuantificar y caracterizar los diferentes impactos ambientales potenciales, asociados a cada una de las etapas del ciclo de vida de un producto. Básicamente, se enfoca al rediseño de productos bajo el criterio de que los recursos energéticos y materias primas no son ilimitados y que, normalmente, se utilizan más rápido de cómo se reemplazan o como surgen nuevas alternativas. Por tal motivo, la conservación de recursos privilegia la reducción de la cantidad de residuos generados (a través del producto), pero ya que éstos se seguirán produciendo, el ACV plantea manejar los residuos en una forma sustentable –desde el punto de vista ambiental– minimizando todos los impactos asociados con el sistema de manejo (Rodríguez, 2003).

El ACV es una técnica iterativa que permite ir incrementando el nivel de detalle en sucesivas iteraciones, de acuerdo con la metodología propuesta por la normativa ISO 14040 puede dividirse en cuatro etapas.

En la primera etapa se define motivo del estudio y utilización prevista de los resultados del análisis del ciclo de vida, además de describir el sistema objeto de estudio de acuerdo a unidad funcional, flujo referencia, límites del sistema, requisitos calidad de datos, hipótesis planteadas, metodología de evaluación y categorías de impacto consideradas.

En una segunda etapa de análisis de inventario del ciclo de vida se realiza una recogida de datos de entrada y salidas (materia, energía) de todos los procesos unitarios contenidos en los límites del sistema, es decir se relaciona toda la información cualitativa y cuantitativa requerida para conformar el Inventario del Ciclo de Vida (ICV). En la práctica, el ICV es una lista de emisiones y recursos utilizados. Cuando se trabaja con sistemas que impliquen varios productos, en

esta etapa se procede a asignar los flujos de materia y energía, así como las emisiones al medio ambiente asociadas a cada producto o subproducto.

En la Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida (EICV) los datos del inventario se transforman en indicadores sobre los impactos potenciales al medio ambiente, salud humana, disponibilidad de recursos naturales de ser posible, a un solo indicador global.

Finalmente en la última etapa se interpretan los resultados del inventario y de la evaluación de impactos, de acuerdo al alcance y objetivo del estudio reportándose las conclusiones del estudio y las propuestas de mejora ambiental, analizando la sensibilidad e incertidumbre para comprobar la fiabilidad de las conclusiones (Gil et al., 2011).

En la siguiente figura se observan las cuatro etapas de la metodología del ACV.

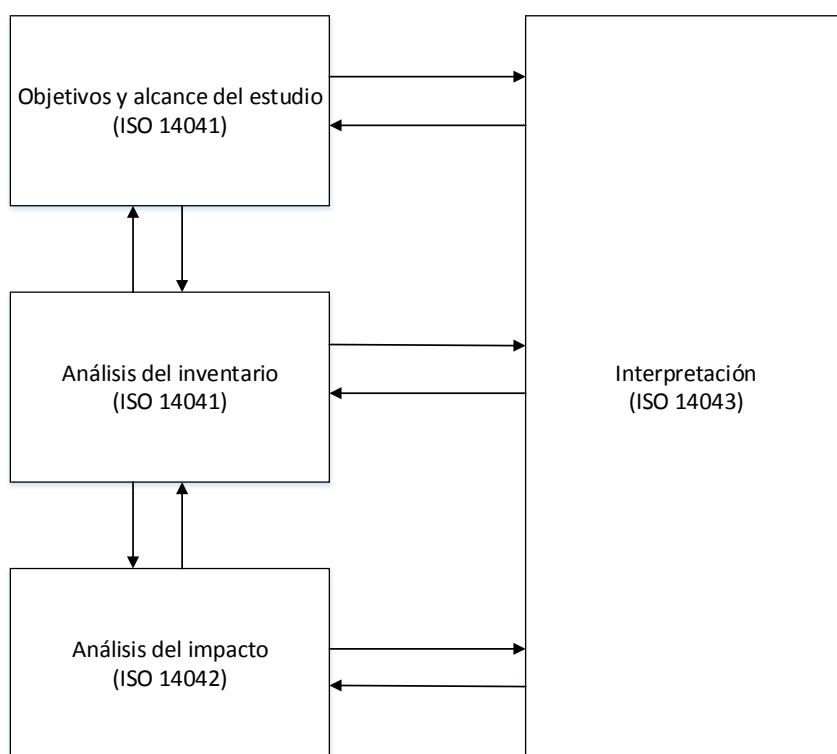


Figura 8: Esquema de la metodología del ACV. Fuente: (Elaboración propia del autor.)

1.4.4 SimaPro: aplicación informática para el ACV

El sistema de medición y avance de la productividad (SimaPro) es una herramienta de gestión que contribuye a la consecución del trabajo docente en las empresas que la aplican. Con sus dimensiones de calidad, productividad,

género y relaciones laborales, el SimaPro es un instrumento para promover la dignificación del trabajo, la autoestima personal y laboral de los trabajadores, y los intereses propios de la empresa. Es un software analítico utilizado para medir la huella ambiental de productos y servicios de una manera objetiva y con alto nivel de transparencia. Es una herramienta única para el uso académico: es preciso, cuenta con fundamentos científicos y proporciona un alto nivel de transparencia; en software fundamental a nivel empresarial para desarrollar planes de acción que le permitan medir y alcanzar sus metas de sustentabilidad, ya sea al interior de la organización o en toda la cadena de suministros (Gil et al., 2011).

Los servicios que ofrece son: (Goedkoop et al., 2016, 2008)

- Facilidad para modelar procesos, con guías de ayuda para el usuario.
- Posibilidad de crear ICV parametrizados y compararlos.
- Conexión directa con Excel y bases de datos.
- Posibilidad de realizar análisis de impactos por cada fase del modelo.
- Análisis de incertidumbre aplicando el método de Monte Carlo y la Matriz de Pedigree.
- Interfaz gráfica para la visualización de resultados.
- Análisis de los puntos débiles.
- Análisis complejos para el tratamiento y reciclaje de residuos.
- Asignación de cargas ambientales en los procesos.
- Permite el cálculo de la huella de carbono, hídrica y ecológica.

1.5 Uso de la metodología de ACV en la evaluación de estrategias relacionadas con la matriz energética a nivel internacional

La evaluación del ciclo de vida también se ha utilizado para evaluar diferentes sistemas de energía. El ACV tiene como objetivo dar cuenta de todos los flujos de materiales, directos o indirectos, inducidos por un ciclo energético. Dado que los flujos inducidos ocurren en muchos puntos geográficamente diferentes bajo una variedad de diferentes condiciones, no es factible modelar el destino de todas las emisiones. Por lo general, solo las emisiones totales de los gases de efecto invernadero u otros contaminantes son evaluados. Este enfoque puede justificarse para los gases de efecto invernadero y otros contaminantes con largo

tiempos de residencia en la atmósfera. Para dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, ozono y partículas, sin embargo, este enfoque no es satisfactorio. En países donde la mayor parte de la electricidad se produce a partir de la combustión de combustibles fósiles (por ejemplo, EE.UU., 61 %), las emisiones son mayores que en los países que utilizan menos en la producción de energía (por ejemplo, Suiza, 3 %). El uso de combustibles a base de biomasa da como resultado emisiones que son aproximadamente un orden de magnitud más baja que las emisiones de combustibles fósiles. En los casos en que se necesite electricidad para el proceso de conversión, las suposiciones sobre la fuente de electricidad dictan los resultados.

En la Universidad de Wisconsin-Madison en el 2002 realizó el ACV para dos sistemas de generación de electricidad, un ciclo combinado natural de 620 MW planta de gas y un sistema fotovoltaico integrado en el edificio de 8kW. Los resultados de ACV aumentan drásticamente la tasa de emisión de gases de efecto invernadero para el sistema gas natural. La tasa de emisión para el ciclo de vida de la planta de gas natural de ciclo combinado (469 toneladas CO₂ - equivalente por giga-Watt equivalente por hora (gW e h)), fue un 23 % más alto que la tasa de emisión de la operación de la planta solo (382 toneladas de CO₂ / gW e h). Este aumento se debe principalmente al ciclo del combustible emisiones de las cuales las emisiones de metano representan más de la mitad. El ACV ilustra que el sistema fotovoltaico tiene en su ciclo de vida emisiones de gases de efecto invernadero bajo, pero no nulo con una tasa de emisión de 39 toneladas de CO₂ / gW e h. Este valor es más alto que otros sistemas nucleares y renovables estudiados anteriormente, incluida la fisión nuclear (15 toneladas CO₂ / gW e h), viento (14 toneladas CO₂ / gW e h) y futura fusión (9 toneladas CO₂ / gW e h) tecnologías. La tasa de emisión fotovoltaica (39 toneladas de CO₂ / gW e h) es insignificante en comparación con la planta de gas natural (469 Toneladas CO₂ / gW e h) o un carbón previamente estudiado planta (974 toneladas CO₂ / gW e h).

En el artículo *Mitigar el cambio climático con energías renovables y de alta eficiencia. Componentes y sistemas de energía eléctrica de Hammons*, en el año 2001, se evalúa el papel de las tecnologías renovables y las turbinas de gas de alta eficiencia para la mitigación del cambio climático y predice que

aproximadamente la mitad de las nuevas construcciones utilizará tecnología de turbinas de gas con el uso del ACV.

En el artículo de Ito en el año 1997 *el estudio de escenarios de control de GEI por Análisis de Ciclo de Vida. Energía Conversión y gestión* incorpora un enfoque ACV para evaluar cinco escenarios de energía suministrada a largo plazo. Concluye que un escenario de uso intensivo de energías renovables con adecuado contenido de energía nuclear contenido logra reducciones de carbono, pero afirma que el escenario de uso intensivo de energía nuclear es atractivo desde el punto de vista económico, medioambiental y de riesgo.

El autor Hayhoe en 1999 con su artículo *Costos de los objetivos de reducción de gases de efecto invernadero múltiples para EE. UU.* mediante el análisis de ciclo de vida analizó la importancia de incorporar las emisiones de metano de los ciclos del combustible de gas en los objetivos de reducción de gases de efecto invernadero de EE. UU.

1.6 Conclusiones parciales

1. La matriz energética cubana actual tiene altos porcentajes de recursos no renovables para la generación de energía eléctrica
2. El Análisis del Ciclo de Vida como herramienta podría facilitar la mejor evaluación de potencialidades de diferentes materias primas en la matriz energética y la evaluación del desempeño ambiental de procesos.
3. Se constata en la revisión realizada numerosos estudios donde se aplica el ACV para evaluar el impacto que provocan diferentes fuentes de energía en una matriz energética.
4. En Cuba son escasos los estudios realizados sobre el impacto de su matriz energética
5. En Cuba existen potencialidades para mejorar la cogeneración a partir de bagazo de caña y por lo tanto impactar en la matriz energética nacional.

Capítulo 2: Metodología del Análisis del Ciclo de Vida aplicada a la matriz energética cubana

La herramienta del análisis de ciclo de vida (ACV) ha sido utilizada intensivamente en muchos productos y servicios a nivel mundial, y el caso de la generación de energía eléctrica no es la excepción, sin embargo, existe una falta de conclusiones consistentes sobre el impacto en el ciclo de vida de las distintas tecnologías estudiadas (Cortines González, 2017).

A continuación serán desarrollados el objetivo y alcance de dicha metodología, el análisis de inventario, de los impactos, la interpretación de los resultados. También se mostrara la proyección de la matriz energética en Cuba para el 2030 al realizar una comparación con la matriz actual.

2.1 Objetivo y alcance

Para definir el objetivo del análisis de ciclo de vida se decide plantear la metodología del análisis de ciclo de vida de la matriz energética actual y comparar los impactos ambientales de dicha matriz con la matriz futura, mientras que el alcance especifica todos los detalles de la metodología, como el sistema del producto, la unidad funcional y los límites del sistema. La unidad funcional describe la función principal del sistema analizado. El flujo de referencia, relacionado a la unidad funcional, es la cantidad de producto en el que se basan los resultados del estudio. Los límites del sistema determinan qué procesos unitarios deberán incluirse dentro del ACV.

La investigación comienza con una revisión de la matriz energética que permita comprender cómo podría generarse una metodología adecuada para un contexto regional en Cuba. La unidad funcional será definida como 1 kWh. Para definir el alcance del sistema a evaluar es necesario conocer las cuatro opciones de estudio entre las que se puede escoger:

- De la cuna a la tumba: Incluye la cadena de producción de energía y materiales y todos los procesos desde la extracción de materias primas, pasando por la producción, transporte y uso hasta llegar a la deposición final y el fin del ciclo de vida del producto.

- De la cuna a la puerta: Incluye todos los procesos desde la extracción de la materia prima, pasando por su producción hasta llegar al producto terminado y listo para su uso. Este enfoque permite determinar los impactos ambientales de la producción del producto estudiado.
- De la puerta a la tumba: Incluye los procesos de uso y deposición final, i.e. fin del ciclo de vida del producto (todo lo que ocurre post-producción). Permite medir los impactos ambientales de un producto posterior a su producción.
- De la puerta a la puerta: Incluye los procesos de la fase de producción, permite determinar los impactos ambientales de un paso del ciclo de vida de un producto (Cortines González, 2017).

En la figura 9 se observa la distribución de los alcances que existen.

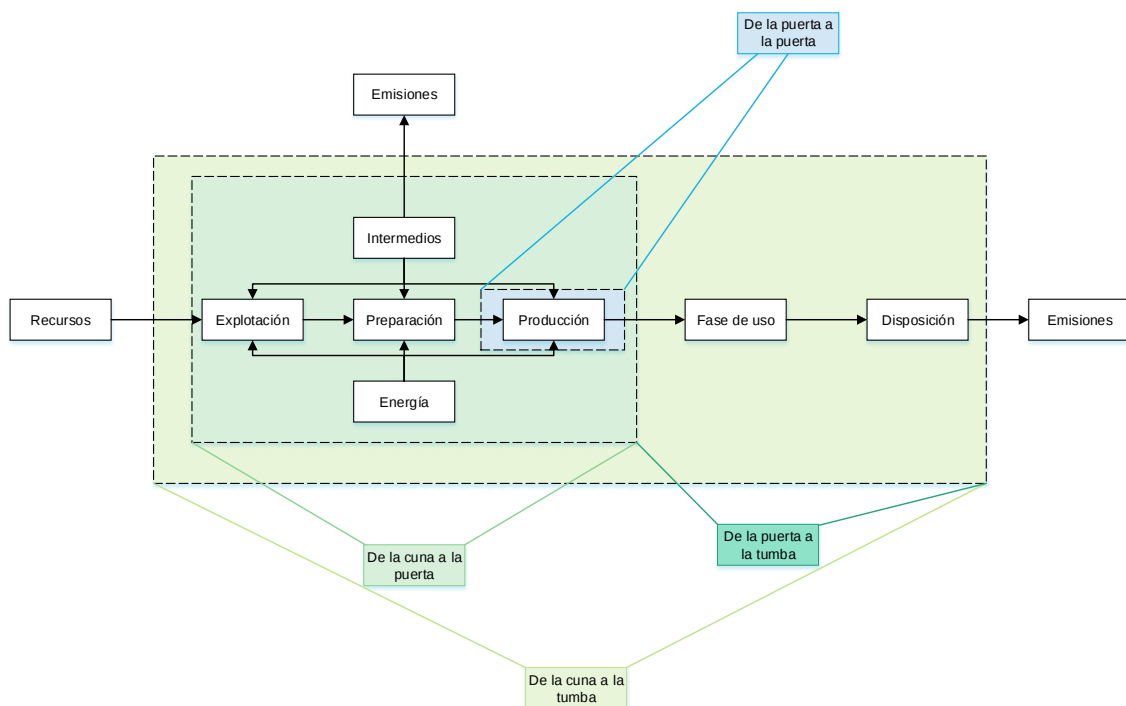


Figura 9: Distribución de alcance del sistema que existen. Fuente: (Elaboración propia del autor.)

El análisis de ciclo de vida no considerará los impactos ambientales generados por la transmisión y la distribución de energía, por lo que los resultados obtenidos se remitirán únicamente a un análisis “desde la cuna a la puerta” abarcando el proceso del producto energía desde su generación indiferente del tipo de

tecnología abordado hasta que se deposita el kWh de energía en el sistema de transmisión.

En la siguiente figura se especifica el alcance que se tendrá en cuenta en este trabajo para comprender cuáles serán los datos necesarios para realizar el inventario de ciclo de vida.

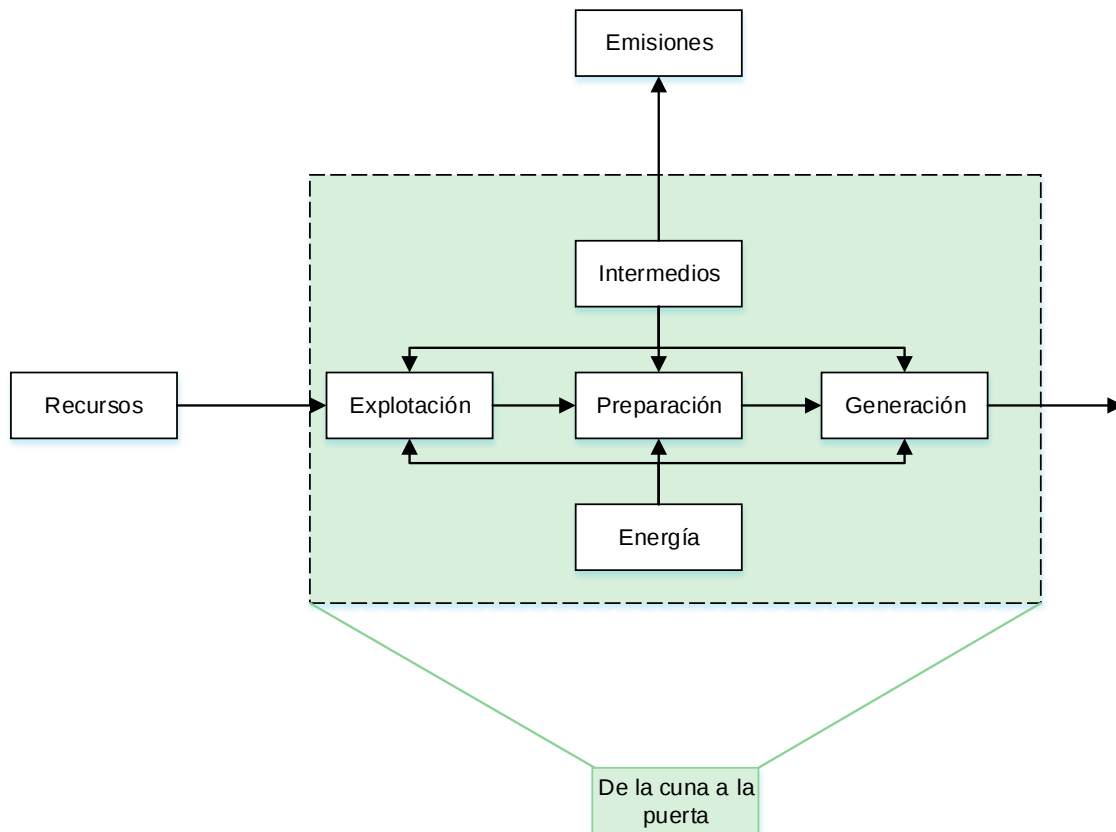


Figura 10: Alcance del sistema. Fuente: (Elaboración propia del autor.)

2.2 Análisis del inventario

La matriz energética actual en Cuba como se muestra en la figura 11 presenta solo un 4.5 % de generación de electricidad mediante fuentes renovables.

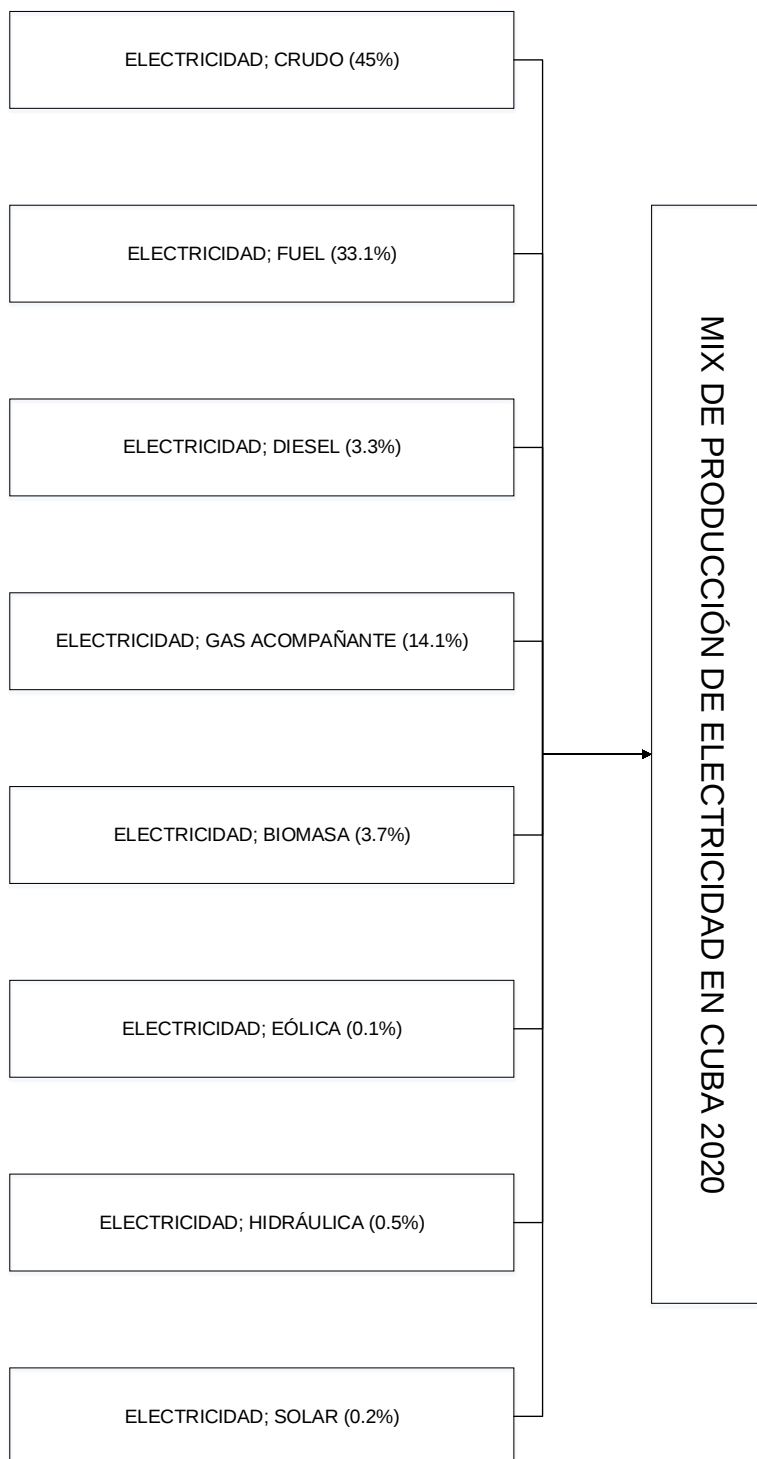


Figura 11: Porcentaje de contribución de cada tipo de energía a la matriz energética cubana. Fuente: (Elaboración propia del autor.)

El inventario del análisis de ciclo de vida es definitivamente la actividad más intensiva en tiempo para un estudio de éste tipo. Sin embargo, para este estudio se aprovecharon las modelaciones ya existentes en la base de datos Ecoinvent 3 ya que modelar la producción de electricidad con una perspectiva de análisis

de ciclo de vida requiere, a lo menos, un registro de las proporciones de energía generadas por cada tecnología, su producción energética, tiempo de vida, distancia de transporte de los recursos naturales y la extracción de recursos. Los inventarios de cada una de las energías fueron modificados de acuerdo a las condiciones de generación en Cuba mediante datos ofrecidos por Oficina Central UNE.

Como el objetivo de este trabajo está relacionado con la incorporación de la energía a partir de biomasa se realizó con mayor precisión el inventario de la generación de energía a partir de este recurso considerando trabajos precedentes realizados en esta industria (Gil et al., 2013). La evaluación del impacto se realizó sin considerar los procesos de infraestructura.

2.2.1 Inventario de biomasa cañera cubana

En la siguiente tabla se resumen datos empleados. En el anexo 1 aparece la fuente de referencia de cada dato utilizado en la siguiente tabla.

Tabla 1: Datos utilizados para el inventario

	Unidad	Cantidad
Entradas conocidas de la naturaleza (recursos)		
Uso del suelo	m ² /kg caña	0,14
Agua	m ³ /kg caña	0,01
Entradas conocidas de la tecnosfera (materiales/fuel)		
Diésel	kg/kg caña	0,01
Pesticidas utilizados		
Diurón	kg/kg caña	8,26E-06
Glifosato	kg/kg caña	2,03E-05
Gesapox 80	kg/kg caña	9,98E-06

	Unidad	Cantidad
MSMA 72	kg/kg caña	1,50E-05
Sal de amina 72	kg/kg caña	5,22E-06
Éster isoclítico 48	kg/kg caña	2,43E-05
Asulox 40	kg/kg caña	5,22E-05
Gramoxona	kg/kg caña	6,97E-07
Amigan 65	kg/kg caña	3,48E-06
Merlin 75	kg/kg caña	2,46E-07
Sulfatante 90	kg/kg caña	4,61E-06
Fertilizantes utilizados		
Urea	kg/kg caña	0,003
Superfosfato triple de urea	kg/kg caña	0,00085
Cloruro de potasio	kg/kg caña	0,0028
Ceniza	kg/kg caña	0,28
Vinaza	kg/kg caña	1,68
Emisiones al aire		
Óxido de nitrógeno	kg/kg caña	2,48E-06
Emisiones al agua		
Pesticidas	kg/kg caña	6,84E-10
Total nitrógeno	kg/kg caña	1,71E-07
Emisiones a la tierra		

	Unidad	Cantidad
Pesticidas	kg/kg caña	1,37E-07
Salidas conocidas a la tecnosfera. Productos y coproductos.		
Vapor	kg/kg bag	2,2
Bagazo	kg/kg caña	0,33

Fuente: (Gil et al., 2013.)

Con estos datos se pudo obtener el inventario necesario para introducir en el software SimaPro. Para la generación de 1kWh es necesario 10,62 kg de vapor. Partiendo de esta base se realizaron los diferentes balances con datos precedentes de otros trabajos consultados.

$$2.20 \frac{kg_{vapor}}{kg_{bagazo}} * 10.62 \frac{kWh}{kg_{vapor}} = 23.36 \frac{kWh}{kg_{bagazo}}$$

Aquí tenemos el valor de kg de bagazo para generar 1 kWh, pero todos los datos están referidos a los kg de caña, por lo que:

$$0.33 \frac{kg_{bagazo}}{kg_{caña}} * 23.36 \frac{kWh}{kg_{bagazo}} = 7.71 \frac{kWh}{kg_{caña}}$$

Ahora que tenemos ya los kg de caña necesarios para la generación de 1 kWh, entonces:

En los recursos de la naturaleza:

Uso del suelo:

$$0.14 \frac{m^2}{kg_{caña}} / 7.71 \frac{kWh}{kg_{caña}} = 7.71 \frac{m^2}{kWh}$$

Agua:

$$0.14 \frac{m^3}{kg_{caña}} / 7.71 \frac{kWh}{kg_{caña}} = 0.018 \frac{m^3}{kWh}$$

Mientras que en las entradas de materiales:

Diésel:

$$0.01 \frac{kg}{kgcaña} / 7.71 \frac{kWh}{kgcaña} = 0.001 \frac{kg}{kWh}$$

En los pesticidas utilizados están:

Diurón:

$$8.26 * 10^{-6} \frac{kg}{kgcaña} / 7.71 \frac{kWh}{kgcaña} = 1.07 * 10^{-6} \frac{kg}{kWh}$$

Glifosato:

$$2.03 * 10^{-5} \frac{kg}{kgcaña} / 7.71 \frac{kWh}{kgcaña} = 2.63 * 10^{-6} \frac{kg}{kWh}$$

Gesapox 80:

$$9.98 * 10^{-6} \frac{kg}{kgcaña} / 7.71 \frac{kWh}{kgcaña} = 1.29 * 10^{-6} \frac{kg}{kWh}$$

MSMA 72:

$$1.50 * 10^{-5} \frac{kg}{kgcaña} / 7.71 \frac{kWh}{kgcaña} = 1.94 * 10^{-6} \frac{kg}{kWh}$$

Sal de amina 72:

$$5.22 * 10^{-6} \frac{kg}{kgcaña} / 7.71 \frac{kWh}{kgcaña} = 6.77 * 10^{-7} \frac{kg}{kWh}$$

Éster isoclítico 48:

$$2.43 * 10^{-5} \frac{kg}{kgcaña} / 7.71 \frac{kWh}{kgcaña} = 3.16 * 10^{-6} \frac{kg}{kWh}$$

Asulox 40:

$$5.22 * 10^{-5} \frac{kg}{kgcaña} / 7.71 \frac{kWh}{kgcaña} = 6.77 * 10^{-6} \frac{kg}{kWh}$$

Gramoxona:

$$6.97 * 10^{-7} \frac{kg}{kgcaña} / 7.71 \frac{kWh}{kgcaña} = 9.04 * 10^{-8} \frac{kg}{kWh}$$

Amigan 65:

$$3.48 * 10^{-6} \frac{kg}{kgcaña} / 7.71 \frac{kWh}{kgcaña} = 4.51 * 10^{-7} \frac{kg}{kWh}$$

Merlin 75:

$$2.46 * 10^{-7} \frac{kg}{kgcaña} / 7.71 \frac{kWh}{kgcaña} = 3.19 * 10^{-8} \frac{kg}{kWh}$$

Sulfatante 90:

$$4.61 * 10^{-6} \frac{kg}{kgcaña} / 7.71 \frac{kWh}{kgcaña} = 5.98 * 10^{-7} \frac{kg}{kWh}$$

Pero en el software se introducen pesticidas totales entonces, se suman cada uno de estos.

En los fertilizantes:

Urea:

$$0.003 \frac{kg}{kgcaña} / 7.71 \frac{kWh}{kgcaña} = 0.0004 \frac{kg}{kWh}$$

Superfosfato triple de urea:

$$0.0008 \frac{kg}{kgcaña} / 7.71 \frac{kWh}{kgcaña} = 0.0001 \frac{kg}{kWh}$$

Cloruro de potasio:

$$0.003 \frac{kg}{kgcaña} / 7.71 \frac{kWh}{kgcaña} = 0.0004 \frac{kg}{kWh}$$

Ceniza:

$$0.28 \frac{kg}{kgcaña} / 7.71 \frac{kWh}{kgcaña} = 0.04 \frac{kg}{kWh}$$

Vinaza:

$$1.68 \frac{kg}{kgcaña} / 7.71 \frac{kWh}{kgcaña} = 0.22 \frac{kg}{kWh}$$

En las emisiones tenemos:

Al aire, óxido de nitrógeno:

$$2.48 * 10^{-6} \frac{kg}{kgcaña} / 7.71 \frac{kWh}{kgcaña} = 3.22 * 10^{-7} \frac{kg}{kWh}$$

Al agua, pesticidas:

$$6.84 * 10^{-10} \frac{kg}{kgcaña} / 7.71 \frac{kWh}{kgcaña} = 1.07 * 10^{-11} \frac{kg}{kWh}$$

Total de nitrógeno:

$$1.71 * 10^{-7} \frac{kg}{kgcaña} / 7.71 \frac{kWh}{kgcaña} = 2.22 * 10^{-8} \frac{kg}{kWh}$$

A la tierra, pesticidas:

$$1.37 * 10^{-7} \frac{kg}{kgcaña} / 7.71 \frac{kWh}{kgcaña} = 1.77 * 10^{-8} \frac{kg}{kWh}$$

En la tabla 2 se reflejan los resultados obtenidos mediante los balances.

Tabla 2: Inventario de biomasa

	Unidad	Cantidad
Entradas conocidas de la naturaleza (recursos)		
Uso del suelo	m2/kWh	0,018
Agua	m3/kWh	8,36E-04
Entradas conocidas de la tecnosfera (materiales/fuel)		
Diésel	kg/kWh	0,0013
Pesticidas utilizados		
Diurón	kg/kWh	1,07E-06
Glifosato	kg/kWh	2,63E-06
Gesapox 80	kg/kWh	1,29E-06
MSMA 72	kg/kWh	1,94E-06
Sal de amina 72	kg/kWh	6,77E-07
Éster isoclítico 48	kg/kWh	3,16E-06

	Unidad	Cantidad
Asulox 40	kg/kWh	6,77E-06
Gramoxona	kg/kWh	9,04E-08
Amigan 65	kg/kWh	4,51E-07
Merlin 75	kg/kWh	3,19E-08
Sulfatante 90	kg/kWh	5,98E-07
Total de pesticidas	kg/kWh	1,87E-05
Fertilizantes utilizados		
Urea	kg/kWh	0,0004
Superfosfato triple de urea	kg/kWh	0,0001
Cloruro de potasio	kg/kWh	0,0004
Ceniza	kg/kWh	0,04
Vinaza	kg/kWh	0,22
Emisiones al aire		
Óxido de nitrógeno	kg/kWh	3,22E-07
Emisiones al agua		
Pesticidas	kg/kWh	8,87E-11
Total nitrógeno	kg/kWh	2,22E-08
Emisiones a la tierra		
Pesticidas	kg/kWh	1,77E-08

Fuente: (Elaboración propia del autor.)

El inventario de las otras energías por orden de porcentaje que componen la matriz energética cubana se encuentra en los Anexos 2-8.

2.3 Análisis de impactos

Los resultados serán presentados a través de las categorías de impacto ambiental y sus correspondientes factores de equivalencia, que permiten normalizar los diversos impactos en una unidad de medición única. En la siguiente tabla se aprecian las categorías de impacto que se tendrán en cuenta en este trabajo.

Tabla 3: Categorías de impacto ambiental.

Categoría de impacto	Unidad
Calentamiento global	kg CO ₂ eq
Agotamiento del ozono estratosférico	kg CFC11 eq
Radiación ionizante	kBq Co-60 eq
Formación de ozono, salud humana	kg NO _x eq
Formación de material particulado	kg PM _{2.5} eq
Formación de ozono, ecosistemas terrestres	kg NO _x eq
Acidificación terrestre	kg SO ₂ eq
Eutroficación de agua dulce	kg P eq
Eutroficación Marina	kg N eq
Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4-DCB
Ecotoxicidad de agua dulce	kg 1,4-DCB
Ecotoxicidad marina	kg 1,4-DCB
Toxicidad humana cancerígena	kg 1,4-DCB

Categoría de impacto	Unidad
Toxicidad humana no cancerígena	kg 1,4-DCB
Uso terrestre	m ² crop eq
Escasez de recursos minerales	kg Cu eq
Escasez de recursos fósiles	kg oil eq
Consumo de agua	m ³

Fuente: (Elaboración propia del autor.)

A continuación, se brinda una descripción detallada de alguna de las categorías de impacto ambiental tales como el calentamiento global, agotamiento del ozono estratosférico, la radiación ionizante, la acidificación, la eutrofización, la ecotoxicidad y la toxicidad. En el Anexo 9 se aprecia el potencial de alguna de estas categorías.

Calentamiento global: Los mecanismos del efecto invernadero pueden observarse como su nombre lo dice, en un invernadero. Los mismos efectos ocurren también en gran escala en nuestra atmósfera. Las ondas cortas de radiación solar entran en contacto con la superficie terrestre y son, en parte absorbidos (calentamiento directo) y parcialmente reflejados como radiación infrarroja (dependiendo del albedo de la superficie de contacto). Lo reflejado es absorbido por gases de efecto invernadero en la tropósfera y vuelven a ser irradiados en todas direcciones, muchos de ellos de vuelta a la Tierra. Esto resulta en un efecto de calentamiento de la superficie terrestre.

Agotamiento del ozono estratosférico: es la reducción de la capacidad protectora de esta y por ende en una mayor exposición de la superficie terrestre a la radiación ultravioleta los cuales pueden tener impactos severos sobre la salud humana y el medio ambiente del planeta.

Radiación ionizante: cuando esta impacta en la parte más alta de la atmósfera, produce una lluvia de rayos cósmicos que exponen constantemente a todo objeto sobre la tierra. Cierta porción impacta los gases en el aire y los transforma a material radioactivo (tales como tritio y carbono 14).

Acidificación: La acidificación del suelo y el agua ocurre predominantemente a través de la transformación de contaminantes en ácidos. Esto conlleva la disminución en el valor del pH del agua de lluvia y niebla desde 5.6 a 4 y menos. El dióxido de azufre y el óxido de nitrógeno y sus respectivos ácidos producen contribuciones relevantes a esta situación. Esto daña los ecosistemas, siendo la desaparición de los bosques su impacto más conocido y relevante. La acidificación tiene daños directos e indirectos: nutrientes desapareciendo de los suelos, incremento en la solubilidad de metales en los suelos o incluso corrosión en construcciones y materiales de obra.

Eutrofización: Enriquecimiento de nutrientes en ciertos lugares que puede ser tanto acuática como terrestre. Contaminantes, aguas de deshecho son los principales contribuyentes a la eutrofización. En el agua se obtiene como resultado un acelerado crecimiento de algas, lo que previene el paso de los rayos de sol a zonas de mayor profundidad. Esto conlleva a una disminución en la generación de fotosíntesis y por tanto en la producción de oxígeno. Además, el oxígeno es requerido para los procesos de descomposición de algas; se provoca entonces, una retroalimentación negativa que disminuye la cantidad de oxígeno en el agua que puede conllevar la asfixia de peces y el aumento de descomposición anaeróbica. Aumenta entonces, la producción de sulfuro de hidrógeno y metano, que pueden desencadenar entre otros efectos en la destrucción de ecosistemas.

Ecotoxicidad: Hay varios factores que intervienen en la ecotoxicidad terrestre provocando el deterioro del suelo, como inadecuados sistemas de utilización, conflictos socio-económicos (incendios, incorporaciones sucesivas de biocida, metales pesados, solventes, plásticos, etc.) en la marina debemos señalar que el agua lleva presente contaminantes en suspensión o disueltos en ella, pudiendo destacar microbios, detergentes sintéticos y contaminantes metálicos. El principal problema en cuanto a la marina es la facilidad que presentan algunas especies para concentrar estos contaminantes en su organismo.

Toxicidad humana y ecológica: El método para el cálculo de impacto de la toxicidad sigue en revisión para la comunidad científica ligada al estudio de análisis de ciclo de vida. El potencial de toxicidad humana (HTP) busca estimar el impacto negativo de un proceso en la salud humana. La toxicidad ecológica

busca medir impactos en el ecosistema, separándolos en terrestres (TETP) y acuáticos (AETP).

2.4 Interpretación de los resultados obtenidos

Con el modelo ya caracterizado y las categorías de impacto definidas se utilizará el software SimaPro, metodología Recipe para obtener los impactos ambientales esperados. Este proceso se repetirá en varias ocasiones de acuerdo al escenario utilizado.

Como se puede apreciar en la figura al analizar la generación de 1kWh excluyendo los procesos de infraestructura de la matriz energética cubana, en la categoría del calentamiento global las fuentes de energías que más contribuyen son el crudo con un 49,6 %, luego el fuel con un 38.3 %, le sigue el gas acompañante con un 7.3 %, luego con esta el diésel con 4.6 %. Mientras que en el agotamiento del ozono estratosférico el que más afecta es el crudo con un 76.2 %, luego está la comercialización de la electricidad con un 14.45 % seguido del fuel con un 4 %, le sigue el gas acompañante con un 3.9 %.

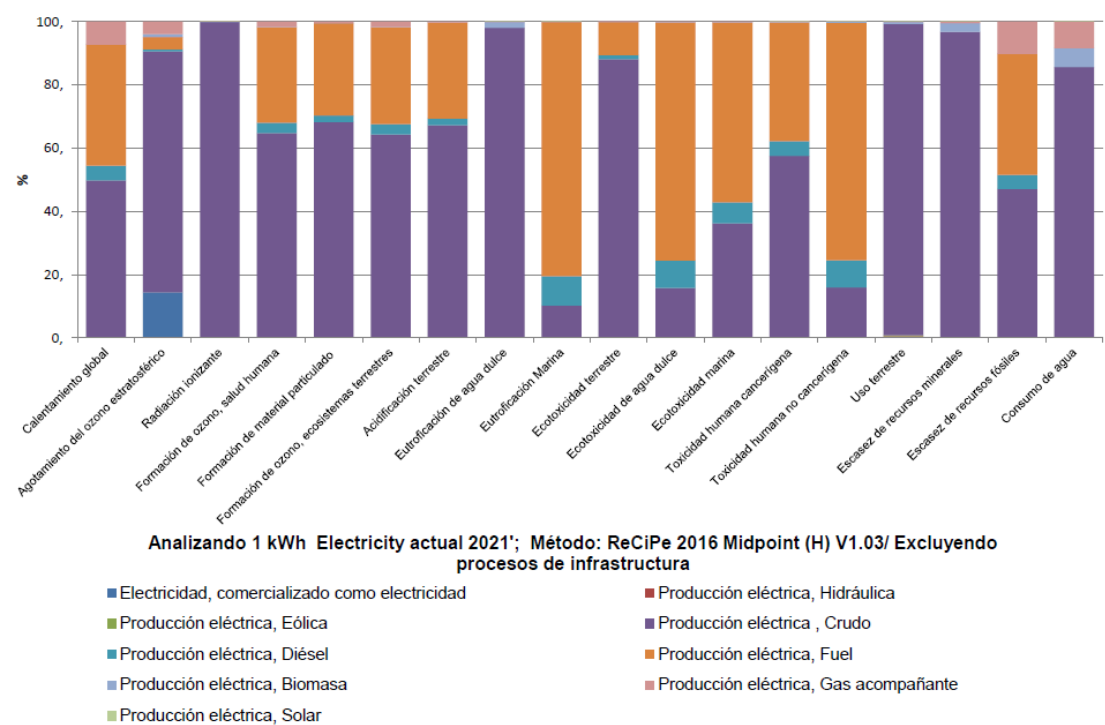


Figura 12: Perfil ambiental de la matriz energética cubana actual. Fuente: (Software SimaPro.)

La radiación ionizante se ve afectada con un 99.8 % con el crudo. En la formación de ozono, salud humana afecta el crudo con un 64.8 % luego el fuel con un 30.16%, le sigue el diésel con un 3.26 %, luego con esta el gas acompañante con un 1.66 %.

La siguiente categoría sería la formación de material particulado donde el crudo nuevamente es el que más lo afecta con un 68.29 %, luego el fuel con un 29.18%, le sigue el diésel con un 2.04 %.

En la formación de ozono, ecosistemas terrestres se ve afectado con 64.27 % de crudo, luego el fuel con un 30.64 %, le sigue el diésel con un 3.23 % y el gas acompañante con 1.66 %.

La acidificación terrestre el que más afecta es el crudo con un 64.24 % seguido del fuel con un 30.3 %, le sigue el diésel con un 2.11 %. La eutroficación de agua dulce también se ve afectado con un 98 % por el crudo solo que en este caso afecta con un 1.79 % la biomasa. En la eutroficación marina afecta de primero el fuel con 80.3 %, luego el crudo con 10.26 % y por último el diésel con 9.29 %.

En la ecotoxicidad terrestre se ve afectada con el crudo por un 88 %, le sigue el fuel con 10.46 %; en la ecotoxicidad de agua dulce afecta el fuel con 75.29 % luego el crudo con 15.79 % y el diésel con 8.7 %.

En la ecotoxicidad marina afecta el fuel con 56.96 % luego el crudo con 36.25 % y el diésel con 6.6 %. Toxicidad humana cancerígena la energía que más afecta es el crudo con 57.58 %, le sigue el fuel con 37.6 % y el diésel con 4.59 %. Toxicidad humana no cancerígena afecta el fuel con 74.98 %, luego el crudo con 15.93 % y el diésel con 4.59 %.

El uso terrestre se ve afectado con un 98 % por el crudo y un 0.69 % de biomasa. La escasez de recursos minerales también lo afecta el crudo con 96.77 % y la biomasa con 2.79 %.

En la escasez de recursos fósiles el primero que lo afecta es el crudo con 47.1%, luego el fuel con 38.28 %, le sigue el gas acompañante con 10.17 % y por último el diésel con 4.42 %.

El consumo de agua se ve afectado con un 85,65 % de crudo, luego el gas acompañante con 8.42 % y la biomasa con 5.92 %.

Es importante señalar que cada categoría de impacto posee su propia unidad de medida y por tanto no siempre las dimensiones serán comparables. A continuación, se presenta los resultados del análisis por categorías de impacto.

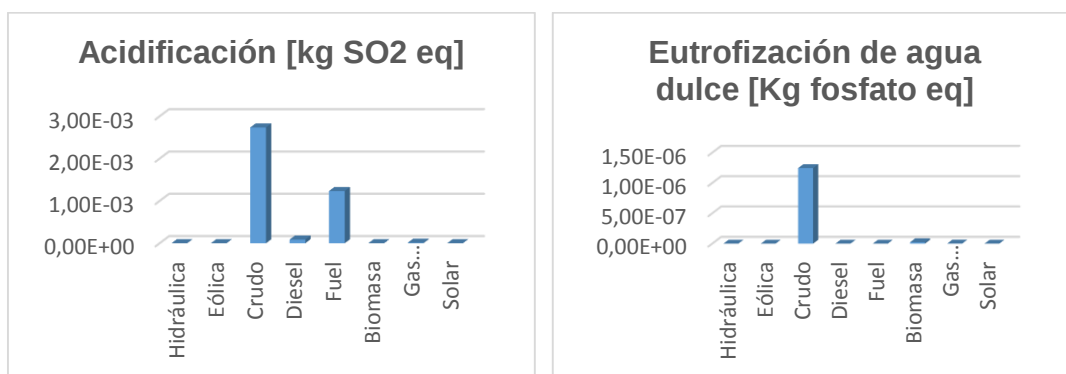


Figura 13: Impacto unitario de acidificación (izquierda) y eutrofización de agua dulce (derecha). Fuente: (Elaboración propia del autor.)

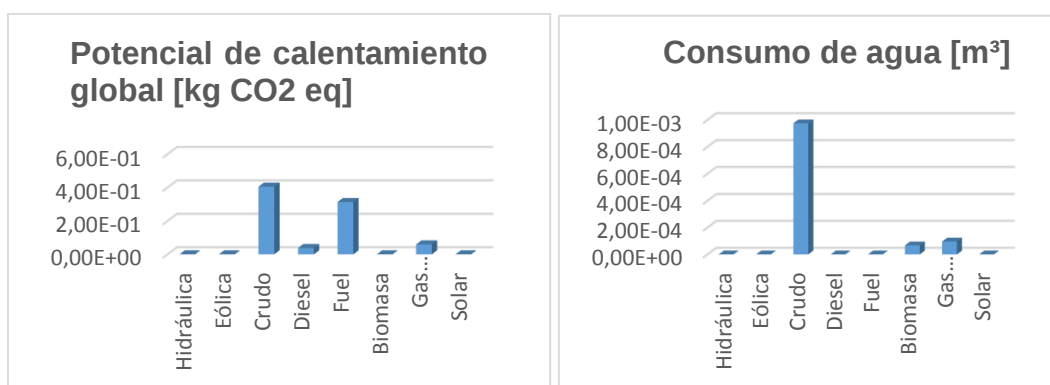


Figura 14: Impacto unitario del calentamiento global (izquierda) y consumo de agua (derecha). Fuente: (Elaboración propia del autor.)

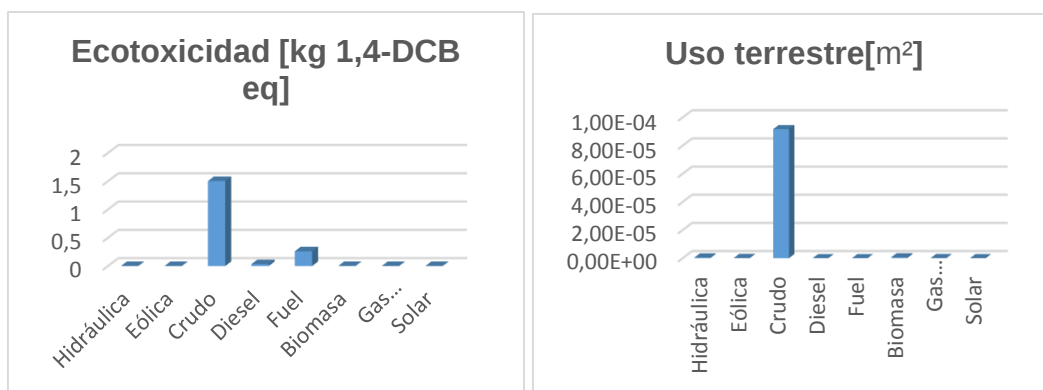


Figura 15: Impacto unitario de ecotoxicidad (izquierda) y uso terrestre (derecha). Fuente: (Elaboración propia del autor.)

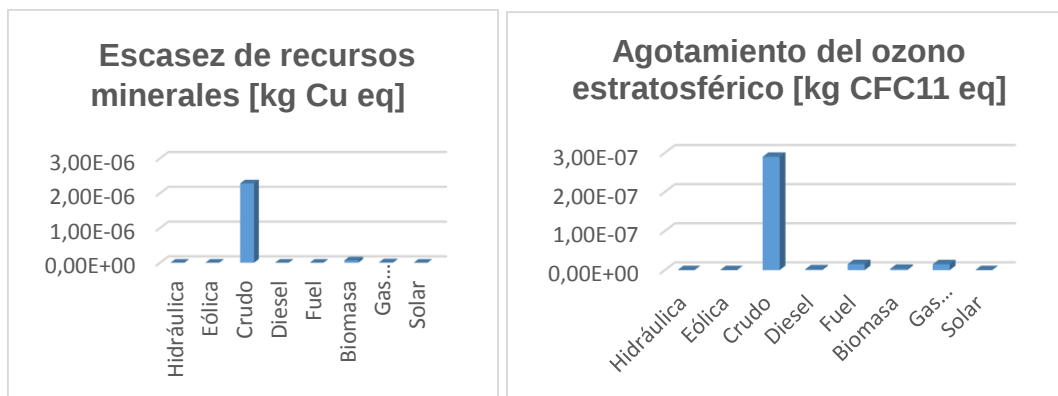


Figura 16: Impacto unitario de escases de recursos minerales (izquierda) y agotamiento del ozono estratosférico (derecha). Fuente: (Elaboración propia del autor.)

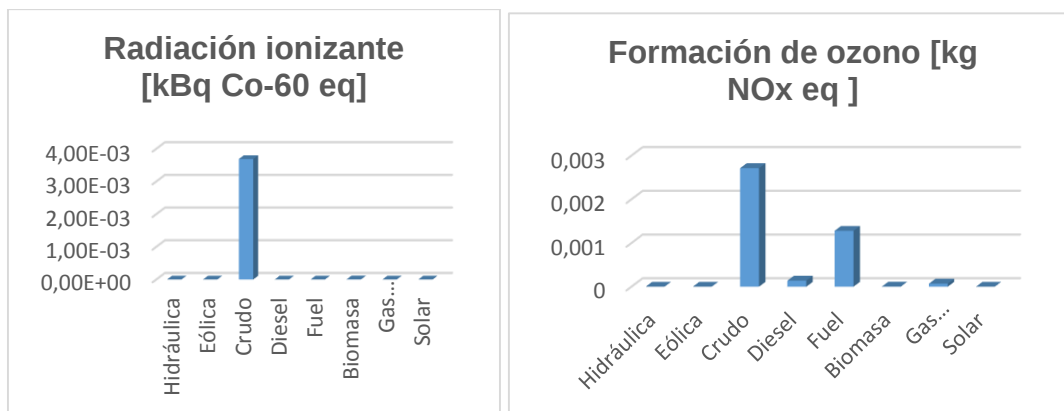


Figura 17: Impacto unitario de escases de radiación ionizante (izquierda) y formación de ozono (derecha). Fuente: (Elaboración propia del autor.)

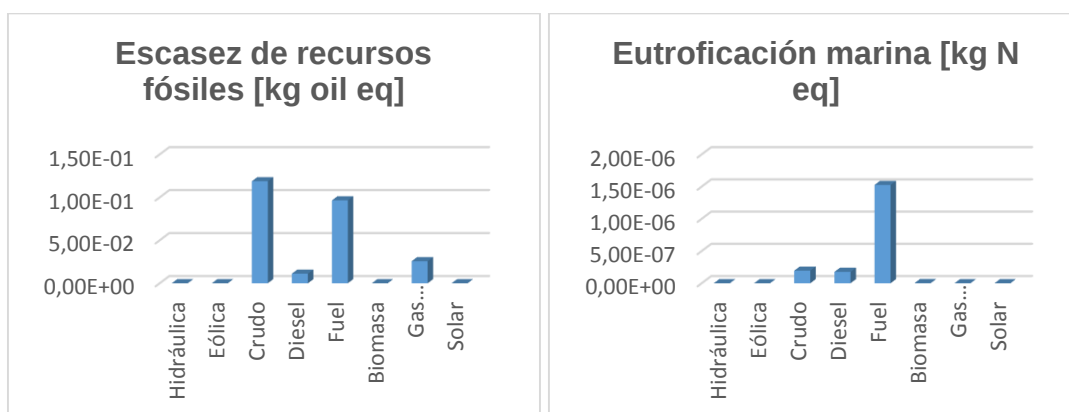
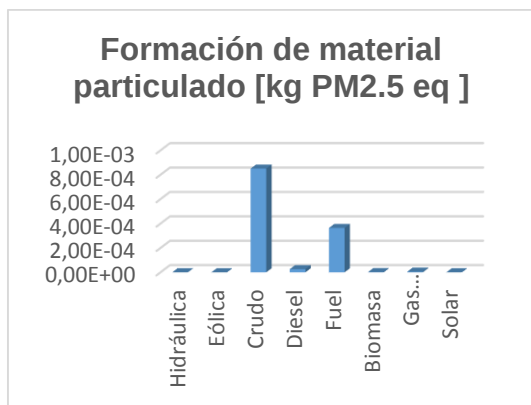


Figura 18: Impacto unitario de escases de escases de recursos fósiles (izquierda) y eutroficación marina (derecha). Fuente: (Elaboración propia del autor.)



*Figura 19: Impacto unitario de escases de formación de material particulado.
Fuente: (Elaboración propia del autor.)*

Las mayores contribuciones a las 18 categorías de impacto se corresponden con la generación de electricidad mediante el crudo y el fuel debido fundamentalmente a las emisiones generadas de CO₂, de freón 11, de cobalto-60, de óxido nítrico (NO) y dióxido de nitrógeno (NO₂), material particulado 2.5, dióxido de azufre, fósforo, nitrógeno, 1.4 diclorobenceno, por kWh producido, además de los consumos de recursos fósiles y agua. Se puede observar como existen fuentes las cuales no afectan en ninguna de las categorías tales como la generación de electricidad mediante la energía eólica, hidráulica, solar. Un aumento del porcentaje de estas energías lograría una disminución considerable de las emisiones en la generación de electricidad en Cuba.

En los resultados obtenidos se puede observar que la energía eólica, la hidráulica, la solar y la biomasa son las de mejores rendimientos ambientales, siendo las que menos impactos generan en todas las categorías de impacto estudiadas. Por lo que es necesario una matriz energética donde prevalezcan este tipo de energías así se lograría una menor cantidad de emisiones para el medio ambiente, Cuba ya está trabajando en esa proyección.

2.5 Proyección de la matriz energética en Cuba

El proyecto de Cuba para el 2030 pretende aumentar el uso de energías renovables aumentando el porcentaje de producción de electricidad mediante estas fuentes ya que así contribuiríamos a la sustitución de importaciones de materias primas imprescindibles para la transformación de las otras fuentes no renovables en energía eléctrica, además de aprovechar las fuentes que ayudan

a una menor contaminación del planeta ya sea en energía solar, hidráulica, eólica, como se aprecia en la figura 20.

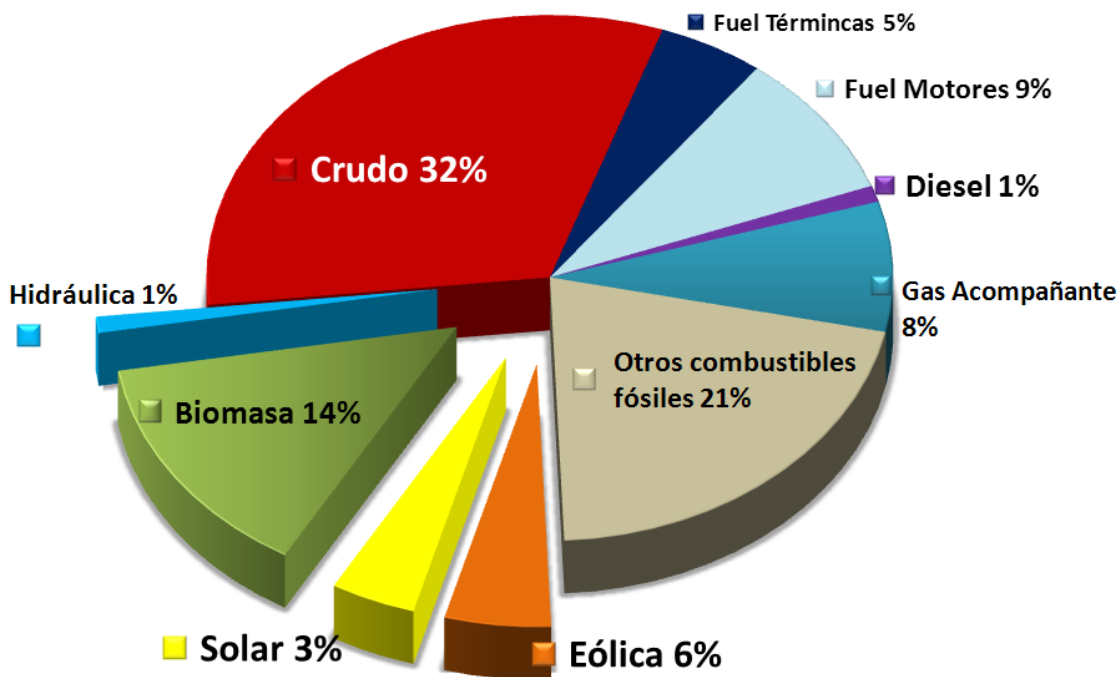


Figura 20: Proyección de la matriz energética cubana para el año 2030. Fuente: (Oficina Central UNE (Unión Eléctrica).)

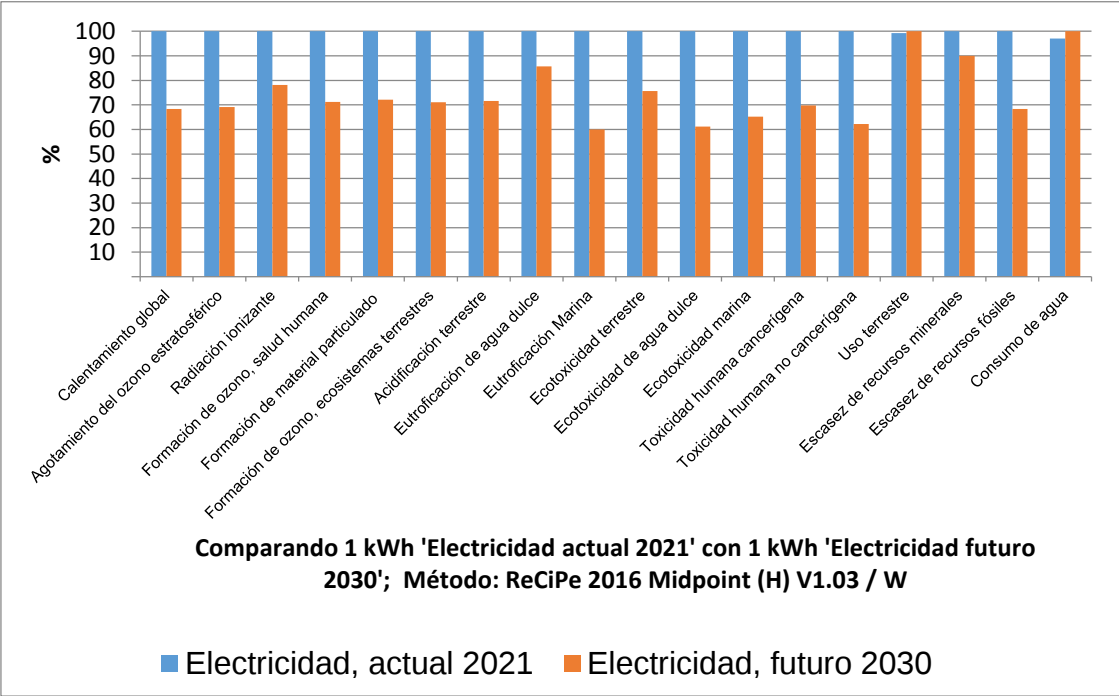


Figura 21: Comparación de los perfiles ambientales de la matriz energética cuba actual y futura. Fuente: (Software SimaPro.)

En la figura 21 se puede ver como en 16 categorías de impacto la matriz energética actual afecta en el 100 % mientras que la futura a pesar de afectar es en un porcentaje menos, en la categoría del calentamiento global la proyección para el 2030 solo afecta en 68.37 %. Por otra parte, en el agotamiento del ozono estratosférico la futura proyección solo afectaría en un porcentaje de 69. La radiación ionizante afecta en un 78.2 %. En la formación de ozono, salud humana se ve afectada en un porcentaje de 71.25.

La siguiente categoría sería la formación de material particulado en esta la matriz futura afectaría en 72.18 %. En la formación de ozono, ecosistemas terrestres se afecta en 71.13 %. A la acidificación terrestre le afectara en un 71.58 %. La eutroficación de agua dulce también se verá afectada en 85.63 %.

En la eutroficación marina la proyección afectaría a esta categoría en 59.99 %. En la ecotoxicidad terrestre le afectaría un 75.65 %; en la ecotoxicidad de agua dulce será una afectación del 61.15 %. En la ecotoxicidad marina un 65.27 %. A la toxicidad humana cancerígena un 69.78%.

Mientras que a la toxicidad humana no cancerígena le afectaría un 62.19 %. A la escasez de recursos minerales 89.93 %, y en la escasez de recursos fósiles 68.35 %. Solo existen dos categorías de impacto donde la proyección de la matriz afectaría más que la matriz actual estas son el consumo de agua donde afectara en el 100 % mientras que la matriz actual afectara un 97.07 % y el uso terrestre donde nuevamente la proyección afectara al 100 % solo que la matriz actual afecta en un 99.28 %.

Como se muestra en la figura 21 se logran reducciones entre un 20 % y un 40 % aproximadamente en 16 de las 18 categorías de impacto, donde solo dos categorías de impacto tienen un pequeño valor por encima de la matriz actual, el consumo de agua y uso terrestre tienen ligeros incrementos 2.93 % y 0.7 % respectivamente debido a mayores terrenos ocupados por parques eólicos, fotovoltaicos y un ligero incremento de la energía hidráulica.

2.6 Conclusiones parciales

1. En la matriz energética cubana predomina el uso de combustible fósil para la generación de electricidad, por lo que se aportan las mayores contribuciones al

impacto ambiental asociado a diferentes categorías tales como el calentamiento global, agotamiento del ozono, eutroficación, ecotoxicidad entre otras.

2. Con el uso de la metodología de ACV quedó demostrado que con la incorporación de energías renovables en la matriz energética se logran reducciones considerables en la mayoría de las categorías de impacto.

3. Es posible lograr la incorporación de energías renovables en un 14 % para el 2030 de acuerdo a inversiones planificadas e informadas por la UNE.

Capítulo 3: Alternativas de uso de la biomasa para la generación de energía eléctrica en Cuba

La situación actual de la energía en Cuba está caracterizada por diferentes factores entre los que se encuentra la baja utilización de las Fuentes Renovables de Energía (FRE). Lo anterior queda evidenciado en la matriz energética nacional, representada en un 95.5 % de combustibles fósiles, destacando el consumo de crudo que asciende hasta un 45 %. Por otra parte, el papel de las FRE es todavía incipiente y solo un 4.5 % de la matriz pertenece a energías renovables, siendo la biomasa el sector más destacado con un 3.7 %.

En su plan de acción, Cuba ha trazado una política de desarrollo de la fuentes de energías renovables hasta el 2030, que prevé una matriz energética nacional con un crecimiento de hasta un 24 % perteneciente a energías renovables, donde se destaca la futura utilización de la biomasa (14 %), principalmente a través del desarrollo de Bioeléctricas en los centrales azucareros, el uso del biogás y el marabú. Además, en dicha política se ha previsto el desarrollo e implementación de las demás energías renovables y un amplio programa de sustitución de equipos altos consumidores por otros más eficientes, así como el uso de sistemas de iluminación y cocción energéticamente más eficientes.

Al comparar la Matriz Energética Nacional actual con la propuesta para el 2030 se observa la disminución del uso de los combustibles fósiles y el aumento del uso de la energía renovable, siendo la biomasa una de las principales fuentes de energía renovable en las aspiraciones futuras del país.

La disminución de los impactos ambientales provocados producto de la incorporación de fuentes de energía renovables usando el ACV constituye un incentivo para realizar estudios técnicos, económicos y ambientales del uso de las mismas en Cuba, específicamente en este trabajo se realiza el análisis del uso de biomasa cañera.

A continuación se mostrara la biomasa como fuente energética, su clasificación, así como los tipos utilizados en Cuba.

3.1 Biomasa

La biomasa fue la fuente energética más importante para la humanidad hasta el inicio de la revolución industrial, cuando quedó relegada a un segundo lugar por el uso masivo de combustibles fósiles. Se entiende por biomasa toda la materia orgánica susceptible de ser utilizada como fuente de energía. El origen de la energía de la biomasa puede ser tanto animal como vegetal y puede haber sido obtenida de manera natural o proceder de transformaciones artificiales que se realizan en las centrales de biomasa. Esta materia se convierte en energía al aplicarle distintos procesos químicos.

La biomasa se puede clasificar en tres grandes grupos:

- Biomasa natural: es la que se produce en la naturaleza sin la intervención humana.
- Biomasa residual: son los residuos orgánicos que provienen de las actividades de las personas.
- Biomasa producida: son los cultivos energéticos.

Dentro de la biomasa una de las más importantes para la generación de energía eléctrica es la biomasa leñosa. Cuba es un país en el cual no existen grandes bosques, sin embargo, es un país eminentemente agrario contando con grandes áreas verdes llenas de caña de azúcar de donde se puede obtener el bagazo y los residuos agrícolas cañeros necesarios para el proceso de producción de energía mediante biomasa. Sin embargo, cabe destacar que estas áreas se ha visto afectadas e invadidas en los últimos años por una planta leñosa como lo es el marabú, diezmando las zonas cañeras aunque abriendo una nueva oportunidad de producir energía a partir de una planta con una mayor capacidad de crecimiento sin coste alguno.

3.1.1 Marabú

La *dichrostachys cinerea* más conocida como el marabú es una especie de planta nativa del viejo mundo. Este es un arbusto pequeño que alcanza por lo común alturas máximas de 4 a 5 metros y excepcionalmente en suelos propicios y húmedos alcanza hasta 10 metros de altura y hasta 18 cm de diámetro. Sus troncos son bastante tortuosos, con numerosas ramificaciones gruesas y finas, muy espinosas que suelen formar entramados impenetrables. En Cuba

constituye la más importante entre las plantas invasoras e indeseables por lo que es importante su utilización en la transformación de energía eléctrica.

3.1.2 Biomasa Cañera

La biomasa cañera está compuesta por el bagazo y los residuos agrícolas cañeros (RAC). Solo considerando su valor energético, en los cañaverales se almacena suficiente energía solar como para sustituir una tonelada de petróleo equivalente a diez toneladas de caña limpia que se cosechan.

El bagazo presenta características desfavorables para su almacenamiento y manipulación, producto de su baja densidad que lo hace un material muy voluminoso; esto obliga a que para almacenarlo a granel haya que disponer de grandes locales, conocidos como “casas de bagazo”, o convertirlo en “pacas” mediante su prensado. En ambos casos es recomendable guardarlo bajo techo para evitar su fermentación y deterioro, no obstante, el almacenamiento a la intemperie es factible y se emplea en varios países.

Los RAC están constituidos por las hojas verdes y secas de la caña y por pedazos de su tallo. Pueden emplearse con el objetivo de sustituir el petróleo y la leña como combustibles complementarios y de arranque y para ahorrar bagazo y suministrarlo como materia prima a otras industrias. También han servido para suplir déficit energético en los centrales producto de inestabilidades en la molienda. Adicionalmente constituyen un extraordinario potencial para la generación de electricidad en los propios ingenios o en centrales termoeléctricas. En la tabla 4 se muestra el calor específico de combustión del bagazo y la RAC los cuales pueden ser utilizados como combustibles alternativos en la generación de energía eléctrica.

Tabla 4: Biomasa cañera

Calor específico de combustión del bagazo seco (kJ/kg)	Superior: 17.29 - 18.93
	Inferior: 18.90 - 19.65
Calor específico de combustión de los RAC secos(kJ/kg)	Superior: 15.90 - 18.80
	Inferior: 14.05 - 16.76

Fuente: (Rubio-González et al., 2019.)

3.1.2.1 Residuos Agrícolas Cañeros

La caña de azúcar es una especie que se caracteriza por ser muy eficiente en el proceso fotosintético, y por tener una elevada capacidad para producir grandes cantidades de biomasa. Los residuos agrícolas que genera, se pueden utilizar para la alimentación animal, reciclar nutrientes y en forma de materia orgánica dentro del agrosistema, como cobertura vegetal del suelo para mantener la humedad y evitar la erosión, controlar plantas indeseables, pero en este estudio el objetivo se centra en su empleo como combustibles para la producción de electricidad ya que cuatro toneladas de residuos equivalen en energía eléctrica a lo producido por una tonelada de carbón (“Nota_Informativa_Marzo_2016_Aprovechamiento_de_residuos_de_cosecha_de_la_ca_a_de_az_car.pdf,” n.d.).

Los residuos agrícolas cañeros (RAC o paja de caña) son de gran interés como material combustible para los centrales azucareros, con el objetivo de eliminar el petróleo y la leña como combustibles adicionales o para ahorrar bagazo y suministrarlo como materia prima a otras industrias tales como las bioeléctricas, también han servido para suplir el déficit energético en los centrales producto de la inestabilidad en la molida.

Origen de los RCA:

- Centros de acopio de caña para su procesamiento (corte y limpieza) y trasbordo a carros de ferrocarril.
- Centros de limpieza donde a la caña se le quita la paja (limpieza) y se transborda a carros de ferrocarril.
- Recolección directa en el campo.

La utilización de los RAC como combustibles en la producción de electricidad, es una posibilidad real, aunque no exenta de riesgos y dificultades. En varios países tales como Cuba, Tailandia ya se emplean con bastante amplitud, aunque en otros aún su empleo es inexistente. En Cuba, la existencia de un programa nacional para el incremento de la generación de electricidad a base de biomasa cañera, ha hecho resurgir el interés en los RAC como combustibles complementarios de las bioeléctricas, nombre que se ha dado a las nuevas instalaciones energéticas de los ingenios azucareros, con altos parámetros de

vapor y alta eficiencia para la generación eléctrica. Este interés está dado por el hecho de que el bagazo producido en zafra no es suficiente para generar durante al menos 300 días al año, para alcanzar buenos indicadores financieros de la inversión, por lo que serán necesarios combustibles complementarios. Uno de los problemas que enfrenta el uso de los RAC como combustible, en muchos países, es que la mayor parte de la caña se quema antes de la cosecha, lo que reduce significativamente la cantidad de residuos disponibles. Un ejemplo documentado es Sudáfrica donde se quema alrededor del 90 %, lo mismo ocurre en Guatemala, EEUU (La Florida) y México, entre otros países.

Los RAC en su estado original no pueden ser utilizados como combustible, pues sus partes constituyentes son demasiado largas para ser asimiladas por los conductores de bagazo a las calderas y además, se atascan en los embudos a través de los cuales cae el bagazo desde los conductores hasta el horno, por ello, para su suministro a las calderas los RAC deben ser picados, generalmente hasta una granulometría similar a la del bagazo, esto se consigue mediante juegos de cuchillas y molinos cañeros típicos, aunque la tendencia actual en el diseño de las instalaciones procesadoras de RAC, es el empleo solo de cuchillas horizontales.

Los RAC constituyen un combustible renovable cada año y su potencial es equivalente a 0.12 millones de toneladas de combustible convencional, por cada millón de toneladas de azúcar crudo que se produzca. Estos normalmente se dejan secar varios días en las plataformas de los centros de acopio y limpieza antes de su envío al ingenio, por eso su humedad típica es alrededor del 20 %.

Las propiedades como combustible de los RAC tienen gran dependencia de varios factores, entre los principales están:

- Estado de la caña en el momento de la cosecha: verde o quemada
- Sistema de cosecha de la caña: manual o mecanizado.
- Características del suelo (tipo)
- Lugar de recolección: campo o centros de limpieza

Un análisis inmediato de los componentes de los RAC y su comparación con el bagazo puede verse en la siguiente tabla:

Tabla 5: Componentes de los RAC y su comparación con el bagazo.

Análisis inmediato de los componentes de los RAC (%)				
Componente	RAC			Bagazo
	Hojas secas	Hojas verdes	Cogollos	
Humedad	13.5	67.7	82.3	50.2
Ceniza	3.9	3.7	4.3	2.2
Carbón (fijo)	11.6	15.7	16.4	18
Volátiles	84.5	80.6	79.3	79.9

Fuente: (Rubio-González et al., 2019.)

Resulta interesante el mayor contenido de ceniza y menor contenido de carbono fijo respecto al bagazo, la variación de la humedad de los componentes de los RAC resulta en puntos extremos (13.5 a 82.3 %). El contenido de ceniza y su composición química resultan muy importantes por el impacto de estos elementos químicos en los metales de las calderas en particular cuando se opera a altos parámetros del vapor (Rubio-González et al., 2019).

Se reconoce la utilidad del empleo de los RAC como combustible, sobre todo en co-combustión con bagazo y carbón y se le asignan como ventajas:

- El ser un combustible renovable y no incrementar su uso el efecto invernadero
- Gran disponibilidad
- Buenas propiedades como combustible

Ahora bien, se le reconocen como desventajas:

- Su baja densidad energética debido a su dispersión en el campo, lo que encarece su recolección.
- Su baja densidad de bulto lo que encarece su transportación
- Alto contenido de cloro, álcalis (sobre todo potasio) y ceniza. Esta última con baja temperatura de fusión que incrementa el ensuciamiento y crea peligros de afectación a los metales de las calderas.

Para lograr que estas biomásas den un impacto positivo y lograr llegar al 14 % de generación de energía eléctrica a partir de la biomasa es necesario un cambio en los centrales azucareros, para esto se plantean las bioeléctricas las cuales son las únicas que van a ser capaces de elevar el 3.7 % de generación de energía eléctrica a partir de la biomasa en la matriz actual.

3.2 Bioeléctricas

Una Bioeléctrica es la planta de cogeneración del ingenio (calderas, turbogeneradores, tratamiento de agua, almacén de biomasa y enlace con el SEN), pero con equipos de alta eficiencia que aseguran un índice de generación de electricidad por tonelada de caña molida superior a 100 y mayor cantidad de electricidad excedente del proceso azucarero para vender a la Unión Eléctrica de Cuba. Producirá electricidad con alta eficiencia a cogeneración durante la zafra y en un sistema de condensación de vapor entre zafras (Hernández Martínez, 2018).

El incremento de la eficiencia de los ciclos termodinámicos con la elevación de sus parámetros es un hecho conocido. Lo anterior se pone totalmente de manifiesto cuando en el ciclo termodinámico Rankine, utilizado tradicionalmente en la industria azucarera para la producción de potencia, se aumentan la presión y la temperatura del vapor que generan las calderas para su empleo en los turbogeneradores que producen la electricidad. Esto se traduce en un incremento de la cantidad de electricidad generada por unidad de masa de caña molida (kWh/tcaña) la que puede ser vendida aumentando los ingresos económicos. Pero, la elevación de los parámetros implica un aumento de los costos inversionistas y esto obliga a un balance entre ganancias por eficiencia y costos por inversión. De hecho, entonces, la elevación de los parámetros no es una decisión meramente técnica, sino una decisión técnica y económica (Rubio-González et al., 2018).

Desde hace décadas y en particular en la actualidad, la utilización de la biomasa cañera constituye una fuente renovable de energía muy importante para la generación de electricidad y la promoción de un desarrollo sostenible. En Cuba, recientemente, se ha aprobado un programa nacional para el incremento de la generación de electricidad con biomasa cañera. A los efectos de estos estudios se entiende como biomasa cañera el bagazo o mezclas de bagazo con paja de

caña. Este residuo agrícola cañero es empleado como combustible en Cuba desde hace años (Rubio-González and Rubio Rodríguez, 2018).

3.2.1 Programa de las bioeléctricas

El incremento de la eficiencia energética es una necesidad y una oportunidad de inversión en la industria azucarera por lo que se propone un programa de bioeléctricas. En la confección del programa nacional se valoraron los 56 ingenios del país y finalmente se seleccionaron 25 para instalar bioeléctricas en ellos. En la siguiente tabla se observa la distribución de las bioeléctricas por Norma Potencial y presiones.

Tabla 6: Cantidad de bioeléctricas según la norma potencial.

Instalación	Norma Potencial (tcaña/día)					Total
	4600	6500	8000	9000	13000	
Bioeléctricas	9	7	1	6	2	25
a 67 bar	9	7			1	17
a 87 bar			1	6	1	8

Fuente: (Rubio-González et al., n.d.)

En el propio proceso de selección se fueron adoptando criterios evaluativos que conforman la esencia de lo que aquí se expone. La ubicación geográfica de los 25 seleccionados se muestra en la Figura 22. En el anexo 10 se encuentra la relación de las 25 bioeléctricas y sus tributarios (Rubio-González and Rubio Rodríguez, 2018).



Figura 22: Ubicación geográfica y potencia en el programa nacional de las 25 bioeléctricas. Fuente: (Rubio, A., Rubio, M., 2018. Integración y esquemas energéticos para el máximo aprovechamiento de la biomasa cañera en la generación de electricidad.)

En la Tabla 7 se muestran algunos datos de los tres proyectos ya en ejecución en la actualidad.

Tabla 7: Proyecto de las bioeléctricas.

Proyectos de bioeléctricas en ejecución (Capacidad de molida, t/día)	Potencia real (MW)	La Bioeléctrica pertenecerá a:	El ingenio pertenecerá a:
Ciro Redondo (7 000)	62	Empresa Mixta Biopower	Empresa Azucarera Ciego de Ávila
Héctor Rodríguez (4 600)	20	Empresa Azucarera Villa Clara	Empresa Azucarera Villa Clara

Jesús Rabí (4 600)	20	Empresa Azucarera Matanzas	Empresa Azucarera Matanzas
-----------------------	----	----------------------------------	----------------------------------

Fuente: (Rubio-González and Rubio Rodríguez, 2018.)

De esos tres proyectos la única activa actualmente es la bioeléctrica de Ciro Redondo (Ver figura 7, Capítulo 1)

3.2.1 Diferencias entre el sistema de generación de energía eléctrica de un central y una bioeléctrica

La estrategia para la instalación de las bioeléctricas viene dada por las diferencias que presenta este con el sistema de generación de electricidad de un central.

Los centrales cubanos actuales trabajan en un sistema a contrapresión esto quiere decir que el vapor generado en las calderas a bajas presiones de 18 – 28 bar y bajas temperaturas de 320 – 400 °C del central viajan hacia la turbina, todo el vapor generado pasa por esta ya que de este sale la cantidad de vapor que necesita el central para trabajar a la presión necesaria ya que los centrales utilizan el empleo del vapor de escape de los turbogeneradores para el proceso de cocción y fabricación del azúcar. En este sistema mientras mayor cantidad de vapor consume el central es decir mayor vapor pase por la turbina se va a generar mayor cantidad de energía eléctrica. El problema de este sistema es que entre el punto de entrada de vapor a la turbina y el de salida no se aprovecha la exergía que le queda al vapor hasta llegar a la condensación por lo que el salto entálpico es menor. Con este sistema el central puede generar aproximadamente 40 kWh/ tcaña, con una potencia real de 1.5 hasta 12 MW. Estos estudios se realizan en los periodos donde los centrales trabajan continuamente para producir azúcar. En la siguiente figura se aprecia el diagrama del proceso de generación de energía eléctrica en el caso de un central actual en Cuba.

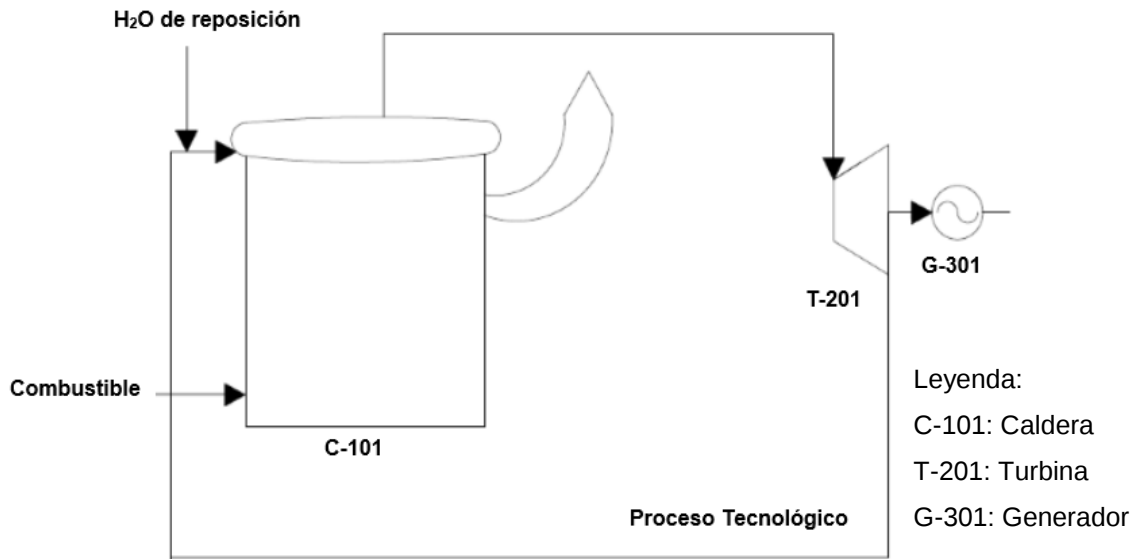
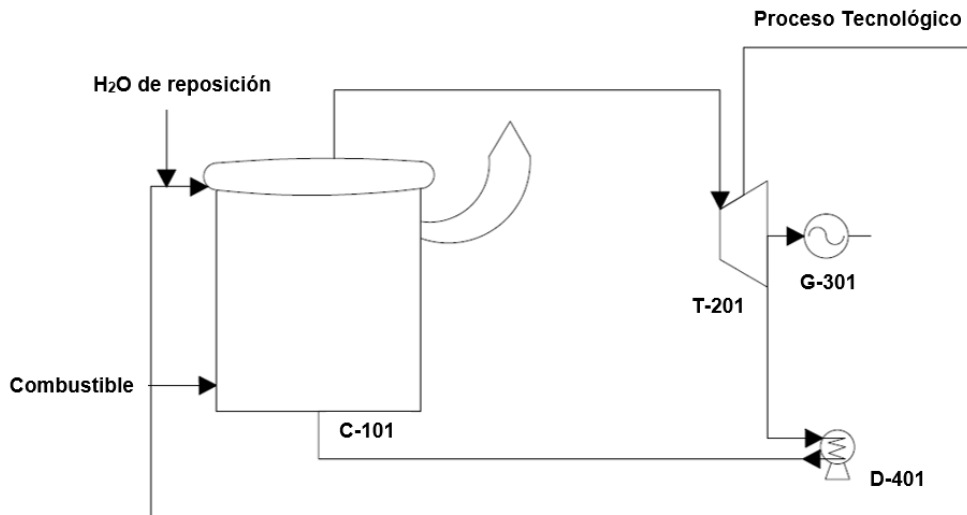


Figura 23: Esquema de desarrollo del proceso de generación de energía eléctrica en un central. Fuente: (Elaboración propia del autor.)

Por su parte, las bioeléctricas trabajan con un sistema de turbina extracción-condensación, donde el vapor generado por la caldera es de altas presiones de 67 - 87 bar y altas temperaturas de 520 – 540 °C este va hacia la turbina de extracción-condensación la cual lleva el vapor hasta el punto de condensación por lo que el salto entálpico es mayor, es decir se aprovecha más la exergía que este trae consigo y se produce mayor cantidad de energía eléctrica. Pero el sistema se llama sistema de turbina de extracción-condensación y el central necesita vapor para los procesos tecnológicos por lo que a la turbina se le hace una extracción de vapor a una presión intermedia, es decir a la presión necesaria para los procesos tecnológicos propios de un central. Si la extracción de vapor para el central es menor se produce mayor cantidad de electricidad. Con este sistema se puede generar aproximadamente 120 kWh/ tcaña, con una potencia real desde 20 hasta 62 MW. Estos estudios se realizan en un periodo de aproximadamente 300 días. En la siguiente figura se muestra el diagrama del proceso de generación de energía eléctrica en el caso de una bioeléctrica en Cuba.



Leyenda:

C-101: Caldera

T-201: Turbina

G-301: Generador

D-401: Condensador

Figura 24: Esquema de desarrollo del proceso de generación de energía eléctrica en una bioeléctrica. Fuente: (Elaboración propia del autor.)

Este estudio ha permitido mostrar las diferencias entre el sistema de generación de electricidad del central y de la bioeléctrica; la más importante radica en el sistema de generación, ya que el de una bioeléctrica triplica la generación de electricidad de un central.

3.2.3 Cambio del equipamiento energético

Para lograr un cambio en el sistema energético de un central y convertirlo en bioeléctrica son necesarios calderas de alta presión y turbinas de extracción-condensación.

Las calderas de alta presión: Debido a la presión elevada a la que estas calderas funcionan, tiene que ser controladas para garantizar la seguridad en todo momento.

Las turbinas de extracción-condensación: En estas turbinas una parte del vapor puede extraerse en una o varios puntos antes de la salida al condensador,

obteniendo así, vapor a varias presiones, mientras que el resto del vapor se expande hasta la salida al condensador.

Ventajas de las turbinas:

- Alta eficiencia global.
- Uso de tecnología de punta.
- Reducción de emisiones contaminantes.
- Alta fiabilidad en la disponibilidad de energía eléctrica.
- Optimización del proceso industrial.
- Reducción de pérdidas de distribución.
- Ahorros económicos en facturación energética para el usuario.

3.3 Combustibles adicionales

Una bioeléctrica no solo necesita un cambio de equipos desde el punto de vista energético ya que se puede cambiar toda la tecnología pero traería como problema el no tener el combustible necesario para esa producción de energía eléctrica. A continuación se muestra las características de los combustibles adicionales para el funcionamiento de una bioeléctrica.

3.3.1 Marabú

A pesar de su enorme impacto ambiental negativo el marabú se utiliza como leña, que tiene buena combustión produce brasas duraderas. Este por su extensión forma una excelente fuente de biomasa para combustible debido a su baja densidad y su bajo contenido de humedad (22 % de humedad de almacenaje, en el extremo inferior del rango para una astilla secada al aire), además, su poder calórico es de 4 654 kcal/kg, produce poco humo y cenizas. Se estima que en 1.5-2 hectáreas de marabú en Cuba, tengan un rendimiento promedio de 70-90 t / h. Se calcula que con la maquinaria y el consumo de una tonelada de petróleo pueden cortarse 800 toneladas de biomasa (que equivalen a la energía de 267 a 400 toneladas de petróleo) (Hernandez Martinez, 2018).

3.3.2 Bagazo de tributarios

Los centrales que no fueron seleccionados para el programa de bioeléctricas se declaró que fuesen centrales tributarios. La definición de tributarios se hizo a partir de su distancia a la bioeléctrica (no más de 80 km para evitar excesivos

gastos logísticos), de su disponibilidad de caña y posibilidades de asimilar una inversión para obtener un sobrante de bagazo. Este concepto viene dado por el hecho de ser centrales que comercializan el bagazo restante de su zafra a la bioeléctrica. En la siguiente tabla se observa la distribución de los tributarios por Norma Potencial y presiones.

Tabla 8: Cantidad de tributarios según la norma potencial.

Instalación	Norma Potencial (tcaña/día)				Total
	3000	4000	4600	6000	
Tributarios	1	10	2	1	14

Fuente: (Rubio-González et al., n.d.)

Todos estos combustibles se pueden utilizar en una bioeléctrica pero el combustible principal en un central es el bagazo por lo que es necesario encontrar la manera de generar mayor cantidad de vapor con el bagazo.

3.4 Secado del bagazo de los centrales tributarios

Uno de los potenciales en cuanto a fuentes renovables de energía más importante en Cuba, es el bagazo de la caña de azúcar, este además, tiene diversos usos como materia prima y de ahí la importancia de secarlo. (Bombino Matos et al., 2013)

En Cuba en la actualidad existen 56 centrales azucareros que cogeneran energía eléctrica, todos están conectados al sistema eléctrico. De estos 31 no fueron seleccionados para el programa de bioeléctricas es decir se convierten en centrales tributarios. En todos los centrales cubanos existe la cogeneración por lo que hay una posibilidad de obtener sobrantes de un 30 a un 40 % del bagazo al aumentar la eficiencia en la generación y el consumo de vapor en dichas fábricas. Lo anterior implica que puedan generar más electricidad en tiempo de zafra y aportar más bagazo sobrante lo que beneficiara a las futuras bioeléctricas. Para ilustrar el proceso inversionista necesario se toma como ejemplo un central azucarero la UEB Central Azucarero "Heriberto Duquesne" Villa Clara, ubicado en el poblado de Adela perteneciendo a Remedios. La inversión propuesta consiste en la implementación de equipos que ayuden a un aumento de la producción de energía eléctrica aumentando así el porcentaje de electricidad vendida al sistema eléctrico y contribuir a la sustitución de importaciones en el país.

El central tiene un consumo total durante una zafra de 150 días de aproximadamente de 63 321 toneladas de bagazo.

Como única materia prima para este proceso se tiene el bagazo el cual es un material fibroso, heterogéneo en cuanto a su composición granulométrica y estructural, que presenta relativamente baja densidad y un alto contenido de humedad, en las condiciones en que se obtiene del proceso de molienda de la caña. Es decir, es el residuo separado después de la extracción del jugo de la caña de azúcar y es el principal subproducto de la industria azucarera, representando el 30 por ciento de los tallos verdes molidos. La tecnología para la producción del azúcar indica que la materia prima trae en el bagazo el combustible necesario para la fábrica de azúcar, pudiendo entregar combustible y energía térmica o eléctrica después de satisfacer sus propias necesidades el cual es el único producto que se quiere obtener sería dicha energía eléctrica. En la tabla 9 se muestran las propiedades de este material y en la tabla 10 aparece como varía el índice de generación de vapor según la humedad del bagazo y la temperatura del agua a la entrada de la caldera.

Tabla 9: Propiedades físico-químicas del bagazo de caña

Humedad (%)	45-50
Densidad (g/cc)	0.12
Volátil (%)	68-70
Cenizas (%)	1.26
Carbón fijo (%)	28.7-30.7
C (%)	48.58
H (%)	5.97
O (%)	38.94
N (%)	0.20

Fuente: (Espinosa-Pedraja et al., 1991.)

Tabla 10: Presión de vapor producido e Índice de generación según humedad del bagazo y temperatura de alimentación.

Presión del vapor producido (kg/cm²)	I.G (kg/kgb)	Humedad del bagazo (%)	Temperatura agua alimentación (°C)	Temperatura gases chimenea (°C)	% generación
10,23	2,03	52	94	274	67-105
9,6	2,31	48	86	255	72
9,2	2,23	48	85	260	-
12	2,21	50	78	250	80
18	2,19	48	120	250	95
9,47	2,42	50	92	220	95
11,5	2,25	48	78	280	62
18	2,35	50	108	220	95
9	2,11	50	80	270	98
10	2,39	49	82	237	90
7,5	2,3	48	87	270	90
10	2,29	49	98	220	95

Fuente: (Espinosa-Pedraja et al., 1991.)

Para lograr una mayor producción de electricidad con la misma cantidad de bagazo se tendría que implementar una etapa de secado para disminuir la humedad del bagazo, el que entra a la caldera con un 50 % de humedad y como se observa en la tabla 11 el bagazo presenta una humedad de 45-50 % así que este aumenta su humedad al almacenarse en la casa del bagazo.

Se pretende que este proyecto de secado de bagazo tenga un alcance nacional para lograr un aumento de la generación de energía eléctrica, además de lograr una disminución en las importaciones de materias primas necesarias para la obtención de dicho producto y consiga un cambio en nuestra matriz energética.

3.4.1 Ventajas del proceso de secado de bagazo

El bagazo se considera el subproducto no maderable más importante del mundo, y tiene un alto valor estratégico en el desarrollo energético del país. Sólo en bagazo y paja en los cañaverales se almacena el equivalente a cerca de una ton de petróleo por cada tonelada de azúcar producida. La necesidad de secar el bagazo está dada con vistas a su ahorro, para mejorar sus características como materia prima y para su almacenamiento, ya que el mismo se requiere para una amplia gama de procesos que van desde la industria de derivados hasta la generación de electricidad. El correcto tratamiento y utilización del bagazo pueden proporcionar considerables beneficios, no sólo desde el punto de vista ramal, sino también para sustituir importaciones.

En la obtención de estos logros, mediante las vías de desarrollo técnico, se distingue entre otras medidas el secado de bagazo que ha sido, tradicionalmente, motivo de discusiones en el plano técnico-económico. Los costos de inversión y operación del secado dependen del tipo de secador que se instale, pero los precios del petróleo y la demanda creciente de bagazo como materia prima de productos celulósicos tienden a impulsar el diseño y la comercialización de secadores mundialmente.

3.4.2 Tipos de secadores industriales

El secador a utilizar dependerá de las necesidades de cada ingenio. Los secadores rotativos se prefieren cuando el secado debe ser continuo, los cuales son utilizados en diferentes industrias químicas, estos son aconsejables para el tratamiento de materiales granulares que fluyen libremente y cuya ruptura no preocupa; el secador de banda también alimenta de manera continua pero el caudal a secar por superficie de transferencia de calor es mucho menor al rotativo. El secador de vórtice ofrece mayores disminuciones de humedad, sin embargo, el flujo de bagazo capaz de manejar es el más bajo de todos, los neumáticos son considerados equipos modernos de gran uso industrial, los cuales son utilizados para trasladar en suspensión gaseosa materiales sólidos granulares, fibrosos, en polvo entre otros, y los en caída libre lo cual se logra alimentando por el tope del equipo el materia húmedo y por el fondo los gases de secado a una velocidad inferior a la de arrastre de las partículas más

pequeñas y el secador de lecho fluidizado que es una mezcla de secador continuo y de Batch es un secador muy eficiente pero forzosamente debe estar montado en serie con el horno de la caldera, para el caso de bagazo esto es particularmente complicado porque en estos secadores el tamaño de partícula debe ser muy uniforme y lo más pequeña posible (Espinosa-Pedraja et al., 1991).

Se reportan muchos resultados que avalan las ventajas del uso de secadores desde varios puntos de vista, sin embargo, estos resultados no son suficientes para determinar la factibilidad de invertir recursos en un secador. Para esto es necesario considerar otros factores como el tiempo de recuperación de la inversión. De acuerdo con los resultados reportados en la literatura un secador rotatorio se paga en 2-2.5 años zafra, y uno neumático en 0.5-1.5 años zafra, en dependencia de la capacidad, destino del material, por lo que resultan más atractivos, mientras que los fluidizados se caracterizan por un alto consumo energético por lo tanto menos posibilidad de aplicación si se está tratando de generar más energía.

3.4.3 Proceso de secado de bagazo en central Heriberto Duquesne

Para lograr disminuir la humedad del bagazo que se alimenta a la caldera es necesario comprender el mecanismo instalado en el central, el bagazo húmedo proveniente de la molienda de caña de azúcar una parte de este va directamente a la caldera, mientras que el bagazo restante va hacia la casa del bagazo hasta que el central necesite utilizarlo. Ahora la propuesta sería instalar un secador de bagazo donde el bagazo que entra directamente a la caldera primero pase a este secador así se lograría disminuir la humedad desde un 50 % hasta aproximadamente un 20 % para así lograr una mayor generación de vapor en la caldera. Por otra parte, el bagazo almacenado en la casa del bagazo el cual tiene una humedad de 60 % aproximadamente se transportará hacia el secador de bagazo para disminuir también su humedad. Para lograr disminuir la humedad del bagazo, además de disminuir las emisiones al medio ambiente el medio de calentamiento de este serán los gases de combustión a la salida de la caldera lo que ayudara con el proceso de secado.

En la figura 25 se aprecian los diagrama de bloque del proceso y en la figura 26 se observa un esquema de este proceso.

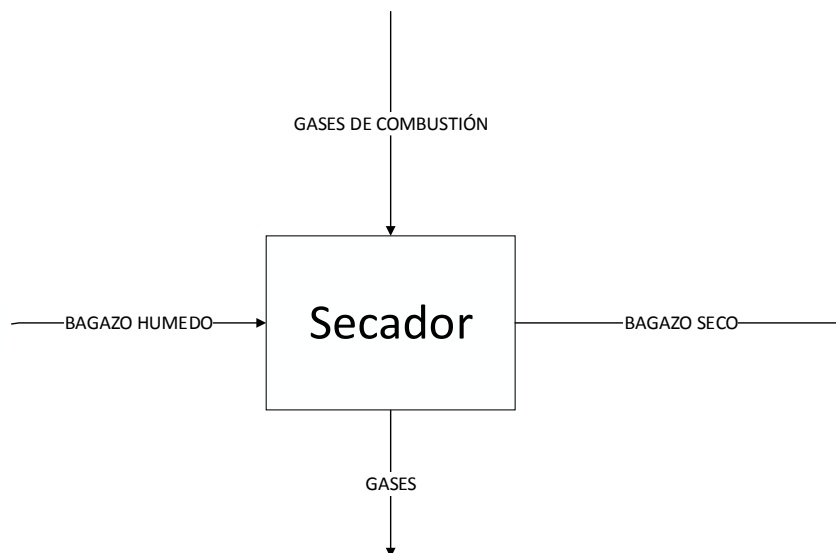


Figura 25: Diagrama de bloque del proceso de secado de bagazo. Fuente: (Elaboración propia del autor.)

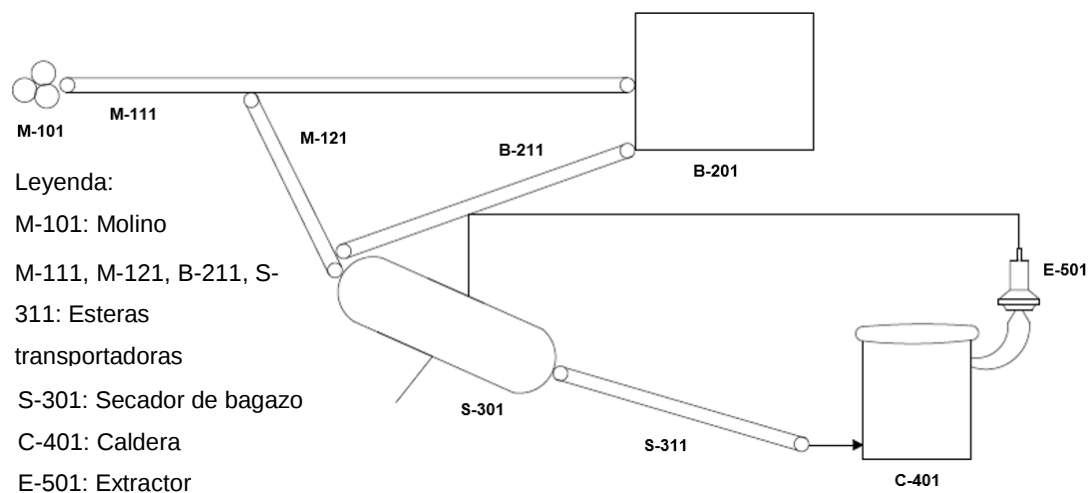


Figura 26: Esquema de desarrollo del proceso de secado de bagazo. Fuente: (Elaboración propia del autor.)

En la siguiente tabla se pueden apreciar las características del equipo que se seleccionó para realizar el proceso de secado en el central.

Tabla 11: Descripción del equipo seleccionado para el proceso.

Nombre del equipo	Descripción del equipo	Material de construcción del equipo	Instrumentos de medición
Secador	Los secadores rotatorios son uno de los tipos de secadores utilizados en las industrias para reducir el contenido de agua en los materiales. La rotación facilita la exposición del material a fuentes de calor que aumentan su temperatura, la cual ayuda a eliminar o reducir su contenido de agua por eso es mejor para este caso seleccionar dicho secador.	Los secadores rotatorios están formados por un cilindro o tambor metálico que gira y que tiene una ligera inclinación para facilitar la descarga del secador del material. El secador debe estar montado sobre una base de concreto o vigas de acero que le den soporte. Estos secadores deben ser metálico ya sea de acero, cobre, cobre-níquel, aluminio-bronce etc.	• Flujómetro • Medidor de humedad del bagazo

Fuete: Creación propia del autor.

En la siguiente tabla se pueden ver los datos que se necesitaron para diseñar el secador rotatorio.

Tabla 12: Datos para el diseño.

Nombre	Datos	UM	Conversión	UM
Humedad de gases entrada	15	%	0.176470	kg agua/ kg gases
Humedad del bagazo entrada	60	%		
Humedad del bagazo salida	20	%		
Flujo del bagazo entrada	605	t/dia		
Humedad de gases salida	60	%	1.5	kg agua/ kg gases

Fuente: (Elaboración propia del autor.)

Se determinan los kilogramos de agua que hay en el bagazo:

$$X_1 = \frac{\% \text{ de humedad}}{100 - \% \text{ de humedad}} = \frac{60}{100 - 60} = 1.5 \text{ kg agua/kg ss}$$

$$X_2 = \frac{\% \text{ de humedad}}{100 - \% \text{ de humedad}} = \frac{20}{100 - 20} = 0.25 \text{ kg agua/kg ss}$$

Se determina el flujo de gases de combustión:

$$L_S = L * \left(1 - \frac{\% \text{ de humedad}}{100}\right) = 605 * \left(1 - \frac{60}{100}\right) = 242 \text{ t/dia}$$

Balance de humedad:

$$L_S * X_1 + G_S * Y_2 = L_S * X_2 + G_S * Y_1$$

$$G_S = L_S * \left(\frac{X_1 - X_2}{Y_1 - Y_2}\right) = 242 * \left(\frac{1.5 - 0.176}{1.222 - 0.333}\right) = 228.556 \text{ t/dia}$$

El secador trabaja adiabáticamente; por lo que el dimensionamiento quedaría:

Diámetro:

$$A = \frac{G}{G'}$$

$G' = 1.5 \text{ Kg/sm}^2$ (Se ha estimado como restricción de la velocidad másica respecto al gas con este valor por exceso de arrastre)

$$G = G_S * (1 + Y_M)$$

$$Y_M = \frac{0.176 + 1.5}{2} = 0.838 \text{ kg agua / kg gases}$$

$$G = G_s * (1 + Y_M) = 228.556 * (1 + 0.838) = 420 \text{ t/día} = 4.86 \text{ Kg/s}$$

$$A = \frac{7.8125}{1.5} = 3.241 \text{ m}^2$$

$$D = \sqrt{\frac{4 * A}{\pi}} = 2.032 \text{ m}$$

Con los datos constructivos de secaderos rotatorios directos se escoge un diámetro de acuerdo con el calculado (Treybal and García Rodríguez, 1988)

Diámetros (m): (1.2, 1.8, 2.4, 2.8, 3.0)

Se selecciona el diámetro de 2.4m por exceso para $G' < 1.5 \text{ Kg/sm}^2$.

Área corregida:

$$A = \frac{\pi * D^2}{4} = 4.5216 \text{ m}^2$$

$$G's = \frac{G}{A} = 0.585 \text{ Kg/sm}^2$$

Longitud:

$$L = N_t * l_t$$

$$l_t = H_{toG} = \frac{G's * \overline{C_s}}{u_a}$$

$$u_a = \frac{273 * G's^{0.67}}{D} = 149.256 \text{ W/m}^3 \text{K}$$

$$\overline{C_s} = 1005 + 1884 * Y_M = 2584.23 \text{ J/Kg}^\circ\text{C}$$

$$l_t = 10.129 \text{ m}$$

$$N_t = 1.5 \text{ (Para secadores rotatorios esta entre 1,5 y 2)}$$

$$L = 10.129 \text{ m} * 1.5 = 15.19 \text{ m}$$

Mediante el diseño de este equipo se llega a la conclusión de que para lograr llevar de 60 % de humedad a 20 % de humedad 605 toneladas de bagazo al día con los gases de combustión los cuales presentan una humedad entre 15 a 25%

es necesario un secador rotatorio de aproximadamente 15.2m de longitud y 2.4m de diámetro.

Como se había mencionado se toma de base 63 321 toneladas de bagazo con las que se generarían aproximadamente 2 152.914 MWh pero con el proyecto de secado de bagazo se podrían generar 2 173.607 MWh lo cual significaría una generación de 20.693 MWh por encima de lo actual, es decir una generación de aproximadamente 0.3268kWh/t caña. En la siguiente tabla se muestra el análisis económico del proceso de secado.

Tabla 13: Análisis económico

	kWh	Precio de venta (\$/KWh)	Ganancia (\$)
Generados antes del secado de bagazo	2 152 914	0.33	710 461.6
Generados después del secado de bagazo	2 173 607	0.33	717 290.3
Diferencia	20 693		6 828.69

Fuente: (Elaboración propia del autor.)

El secador de bagazo con las condiciones diseñadas tendría un costo de inversión de 25 439.15\$, mientras que el costo total de inversión tendría un valor de aproximadamente 165 939.602\$ (Ver anexo 11). Por lo que la inversión se podría recuperar solamente con la venta de la electricidad en un plazo de dos años y medio aproximadamente (es decir en tres zafas aproximadamente ya se obtendrían ganancias).

Si este proceso de secado se hiciera en los 31 centrales que no se piensan convertir en bioeléctricas podría contribuir más a la matriz energética ya que actualmente estos generan aproximadamente 66 740 334 kWh, con este proyecto generarían 67 381 817 kWh por lo que serían aproximadamente 641 483 kWh generados en una zafra lo que se aportaría a la matriz energética cubana.

Con este proyecto se incrementa la generación con biomasa en un 1.88 % con respecto a la generación anterior, es decir se aumentaría de 14 % a 15.88 %, esto implicaría una disminución en todas las categorías de impacto con relación a la matriz actual. En la siguiente figura se puede apreciar una comparación de

los perfiles ambientales teniendo en cuenta la matriz energética actual y el incremento de generación en los centrales azucareros dado por el proceso de secado de bagazo.

En la figura 27 se puede ver como en las 18 categorías se logra la reducción del impacto ambiental con el incremento de generación en los centrales azucareros.

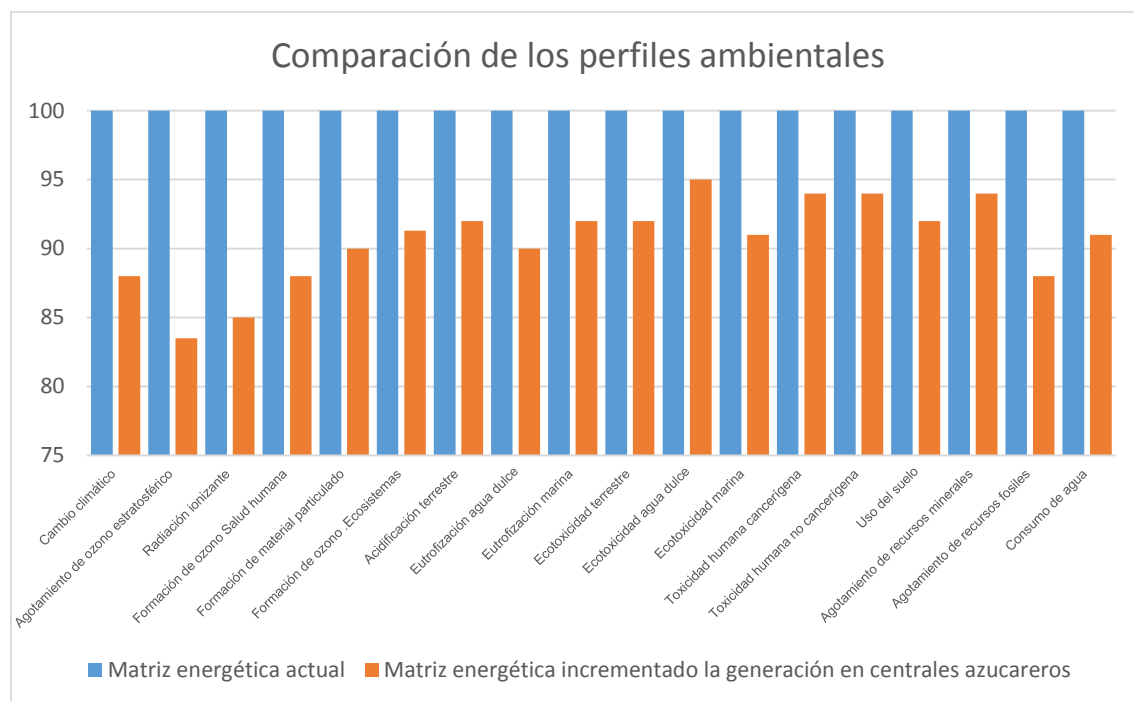


Figura 27: Comparación de los perfiles ambientales de la matriz actual y la matriz con incremento de generación en los centrales azucareros. Fuente: (Software SimaPro.)

En la categoría del calentamiento global se logra una reducción del 18 %; mientras que en el agotamiento del ozono estratosférico se reduce en 16.5 %. La radiación ionizante disminuye en un 85 %. En la formación de ozono, salud humana se disminuye en un 12 %. En la formación de material particulado y eutroficación de agua dulce se reduce un 10 %. Reducciones de más de 8 % se aprecian en las categorías formación de ozono, ecosistemas terrestres, acidificación terrestre, uso terrestre, la eutroficación marina y ecotoxicidad terrestre; en la ecotoxicidad de agua dulce se logra reducir el 5 % y en la ecotoxicidad marina un 9 %. La toxicidad humana cancerígena y no cancerígena y la escasez de recursos minerales se logran reducciones del 6 %. A la escasez

de recursos fósiles logra reducir hasta un 12 % los impactos ambientales y el consumo de agua un 9 %.

3.5 Impacto ambiental de la instalación de las bioeléctricas

Con la instalación de las bioeléctricas para lograr aumentar el porcentaje de biomasa en la matriz energética cubana es necesario saber si estas afectan al medio ambiente. Por lo que es necesario comprender que impactos tienen estos (Hernández Martínez, 2018).

- Disminución de gases de efecto invernadero
- Liberar áreas agrícolas para siembra de alimentos y otros usos al eliminar la plaga invasora marabú empleándola como combustible complementario
- Reducir con depuradores de gases la contaminación ambiental por partículas de la combustión
- Mejora continua y cuidado del agro ecosistema incorporando la ceniza residual de la generación de vapor, que tiene alto contenido de potasio, de forma húmeda como fertilizante, a las áreas cañeras.
- Se asegura la conservación y mejor uso de los recursos hídricos, al condensarse el vapor extraído de la turbina, reutilizándose cerrando el ciclo en los turbogeneradores de extracción – condensación del vapor.

3.6 Introducción de cambios tecnológicos en la fabricación de azúcar

Se tienen en cuenta en la estrategia inversionista industrial de AZCUBA el incremento de electricidad excedente el cual no solo es necesario el combustible sino también cambios de los equipos energéticos es decir mejorando la tecnología de la fábrica de azúcar conectada a la Bioeléctrica ya que el sistema de los centrales están hechos para consumir mayor cantidad de vapor ya que en su sistema es lo mejor para generar mayor flujo energético. Pero en el caso de las bioeléctricas son necesarios equipos más eficientes para disminuir sus consumos energéticos es decir equipos que consuman menor cantidad de vapor así es menor la extracción y se genera mayor energía eléctrica:

- Evaporadores de tubo largo
- Filtro turbo para guarapo
- Filtro de banda horizontal de jugo clarificado
- Tacho continuo

- Reductores planetarios
- Condensadores evaporativo
- Calentadores de alta eficiencia (de placa)
- Evaporadores de película descendente o ascendente

En el anexo 12 se puede observar ilustraciones de estos equipos (Hernández Martínez, 2018).

3.7 Conclusiones parciales

1. El uso de la biomasa y en especial la biomasa cañera constituye un combustible alternativo factible para aumentar la generación eléctrica y contribuir notablemente a modificar la matriz energética nacional con fuentes renovables.
2. El programa de las bioeléctricas, a instalar en 25 centrales azucareros, contribuirá a incrementar los indicadores de generación de energía eléctrica por tonelada de caña molida, a partir de la modernización de los sistemas energéticos y el uso de combustibles adicionales; y aumentar la capacidad de generación en 870MW en el sector azucarero.
3. Para la UEB Heriberto Duquesne la incorporación del secado de bagazo puede generar 206 931 kWh/zafra, dicha inversión se podría recuperar en tres años aproximadamente.
4. Si el proyecto de secado de bagazo se lleva a todos los centrales que no serán convertidos en bioeléctricas implicaría un aumento del 1.88 % en la matriz energética y así lograr una mejora en los impactos ambientales.

Conclusiones

1. En el diagnóstico de la matriz energética nacional actual quedó demostrado que existe un predominio de la generación de electricidad de fuentes no renovables, aspecto que puede ser modificado debido a la existencia de un potencial de uso de energías renovables entre las que se encuentra la biomasa existente en el país.
2. Con la aplicación de la metodología del ACV se cuantifican los impactos ambientales asociados a cada categoría de impacto y se analizan los porcentajes de contribución de cada fuente de generación de energía, siendo el fuel y el crudo las de impactos mayores en todas las categorías.
3. Para la modificación de la matriz energética nacional hacia una mayor participación de fuentes de energías renovables es necesario incrementar el uso de la biomasa, fundamentalmente la biomasa cañera; lo cual representa un potencial de 0.34 toneladas equivalentes de combustible convencional por tonelada de caña de azúcar en el caso del bagazo y 0.12 toneladas de combustible convencional por tonelada de caña para los RAC.
4. La implementación del programa de las 25 bioeléctricas anexas a centrales azucareros contribuirá en gran medida al cumplimiento de la política energética nacional en el horizonte 2030, lo que representa un aumento de 870MW de capacidad de generación de energía eléctrica. En la actualidad solo está en funcionamiento la bioeléctrica Ciro Redondo y emplea bagazo y marabú como combustible con una potencia instalada de 62MW.
5. En la UEB Heriberto Duquesne si se introduce un sistema de secado de bagazo quedó demostrado la factibilidad técnico económica de su modificación alcanzando una generación de 20,693 MWh/zafra por encima del sistema actual es decir 0.327 kWh/t caña, además, si se incorporan estos cambios en los centrales azucareros que no están concebidos para inversiones en bioeléctricas se puede lograr un aumento del 1.88 % de generación de energía a partir de biomasa cañera en la matriz energética actual.
6. Con el uso de la metodología de ACV quedó demostrado que con la incorporación del secado de bagazo en los 31 centrales no convertidos en bioeléctricas se logran reducciones entre un 5 y un 16 % en todas las categorías de impacto.

Recomendaciones

1. Continuar actualizando con datos reales los inventarios de ciclo de vida del resto de las fuentes de energía que componen la matriz energética cubana.
2. Realizar la presentación de los resultados en la Unión Eléctrica para su conocimiento y posible uso de la herramienta de ACV.
3. Divulgar los resultados obtenidos en el presente trabajo en eventos y publicaciones científicas a fines al tema investigado.

Bibliografía

1. 562017-BC7B477D-00FF00,000A000,878787,C3C3C3,0F0F0F,B4B4B4,FF00FF,2D2D2D.pdf, n.d.
2. Abreu Elizundia, H., González Cortés, M., Rico Ramírez, O., Morales Zamora, M., Espinosa Pedraja, R., 2016. Evaluación de esquemas de cogeneración de energía a partir de bagazo de caña de azúcar. Cent. Azúcar 43, 87–98.
3. Alibaba compra venta por mayor [WWW Document], 2021. URL <https://m.spanish.alibaba.com/trade/search?SearchText=secador%20industrial> (accessed 6.17.21).
4. Analisis del Ciclo de Vida.pdf, n.d.
5. Arnera, P.L., Barbieri, M.B., Beroqui, M.C., Barbero, S., Chiacchiarini, H.G., 2017. Matriz energética y sistema eléctrico: estrategia e integración.
6. Azúcar, C.N. para el D.S. de la C. de, 2021. Eficiencia Productiva - Notas Técnicas Informativas [WWW Document]. gob.mx. URL <http://www.gob.mx/conadesuca/documentos/notas-tecnicas-informativas?state=draft> (accessed 6.27.21).
7. Bellostas, B.C., 2016. Análisis de sostenibilidad del ciclo de vida de una configuración innovadora de tecnología termosolar. Universidad Politécnica de Madrid.
8. Bolton, R., Foxon, T.J., 2013. Urban infrastructure dynamics: market regulation and the shaping of district energy in UK cities. Environ. Plan. A 45, 2194–2211.
9. Bombino Matos, E.F., Roca Alarcón, G.A., Marín Morán, J.E., 2013. Modelación del secado neumático vortiginoso del bagazo de la caña de azúcar. Ing. Mecánica 16, 194–201.
10. Borroto, A., Rubio-González, A., 2007. Combustión y Generación de Vapor.
11. Bravo Hidalgo, D., 2015. Energía y desarrollo sostenible en Cuba. Cent. Azúcar 42, 14–25.
12. Bueso Losada, G., 2011a. Análisis de ciclo de vida de una Central Termosolar.
13. Bueso Losada, G., 2011b. Análisis de ciclo de vida de una Central Termosolar.

14. Calle Loyola, J.E., Ulloa Arízaga, E.S., 2008. Sistema de generación de energía eléctrica mediante bagazo de caña de azúcar aplicado al Valle de Yunguilla.
15. Cano, J.E.S., 2014. LA REVOLUCIÓN ENERGÉTICA DEL SIGLO XXI: FRACTURACIÓN HIDRÁULICA VERSUS ENERGÍA RENOVABLE.
16. Carabaño, R., Bedoya, C., Ruiz, D., 2014. La metodología del análisis de ciclo de vida para la evaluación del impacto ambiental en el sector de la construcción: Estado del arte. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1811.0169>
17. Cardim de Carvalho Filho, A., 2001. Análisis del ciclo de vida de productos derivados del cemento-Aportaciones al análisis de los inventarios del ciclo de vida del cemento. Universitat Politècnica de Catalunya.
18. Castro, M.H., 2021. Portal del Ciudadano de La Habana - ¿Cómo es la matriz de generación de energía eléctrica en Cuba? Mesa Redonda (Parte 2) [WWW Document]. Portal Ciudad. Habana. URL <https://www.lahabana.gob.cu/nacionales/5897-como-es-la-matriz-de-generacion-de-energia-electrica-en-cuba-mesa-redonda-parte-2> (accessed 5.16.21).
19. CEEPYS | Centro de Estudios de Energía, Política y Sociedad [WWW Document], 2021. URL <https://ceepys.org.ar/matriz-energetica/> (accessed 5.16.21).
20. cimem2d8_sp.pdf, n.d.
21. Combustibles y electricidad [WWW Document], 2021. URL <https://www.unicamp.br/fea/ortega/eco/esp/esp-26.htm> (accessed 5.25.21).
22. como_es_la_matriz_de_generacion_de_energia_electrica_en_cuba.pdf, n.d.
23. Companioni Rojas, D., 2009. Análisis del Ciclo de Vida de la producción de Azúcar Crudo en la Empresa Azucarera "Ecuador." Universidad Central" Marta Abreu" de las Villas.
24. Comparison of Energy Systems Using Life Cycle Assessment | Tethys [WWW Document], 2021. URL <https://tethys.pnnl.gov/publications/comparison-energy-systems-using-life-cycle-assessment> (accessed 5.16.21).
25. Contreras, A.M., Rosa, E., Pérez, M., Van Langenhove, H., Dewulf, J., 2009. Comparative life cycle assessment of four alternatives for using by-products of cane sugar production. J. Clean. Prod. 17, 772–779.

26. Contreras Moya, A.M., 2007. Metodología para el análisis de ciclo de vida combinado con el análisis exergético en la Industria Azucarera Cubana. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Facultad de Química
27. Coria, I.D., 2014. Energías renovables en la provincia de Santa Fe: situación actual y perspectivas. Inven. Rev. Investig. Académica 5–7.
28. Cortines González, F.I., 2017. Análisis comparativo de impactos ambientales de tecnologías de generación eléctrica en un contexto regional mediante análisis de ciclo de vida.
29. Council, W.E., 2004. Comparison of Energy Systems Using Life Cycle Assessment: A Special Report of the World Energy Council. World Energy Council.
30. Cuba apuesta por una energía más limpia, diversa y eficiente [WWW Document], 2014b. . Cubadebate. URL <http://www.cubadebate.cu/especiales/2014/08/14/cuba-apuesta-por-una-energia-mas-limpia-diversa-y-eficiente/> (accessed 5.25.21).
31. Dafermos, G., Kotsampopoulos, P., Latoufis, K., Margaris, I., Washima, F.P., Ariza-Montobbio, P., López, J., 2015. Energía: conocimientos libres, energía distribuida y empoderamiento social para un cambio de matriz energética, in: Buen Conocer-FLOK Society. Modelos Sostenibles y Políticas Públicas Para Una Economía Social Del Conocimiento Común y Abierto En El Ecuador. Asociación aLabs, pp. 431–486.
32. de, de M., n.d. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA EN SISTEMAS ENERGÉTICOS 86.
33. Del Río, B., 2016. La gobernanza global de la energía.
34. Editorial Samuel Feijóo – Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, 2021.
35. El costo de un kilowatt hora – Unión Eléctrica, 2021.
36. Elizundia, H.A., Cortés, M.G., Ramírez, O.R., Zamora, M.M., Pedraja, R.E., 2016. EVALUACIÓN DE ESQUEMAS DE COGENERACIÓN DE ENERGÍA A PARTIR DE BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR. Rev. Cent. Azúcar 43, 12–12.
37. Energía, F.G.V., 2016. Un análisis comparativo de la transición energética en América Latina y Europa. Lima: Konrad Adenauer Stiftung.

38. ESPECIAL: Cuba aspira a generar más electricidad con el sector azucarero| Spanish.xinhuanet.com [WWW Document], 2021b. URL http://spanish.xinhuanet.com/2019-08/05/c_138283458.htm (accessed 5.16.21).
39. Espinosa Rodríguez, V., 2010. Modelación del Inventario de Ciclo de Vida del azúcar de caña en la Empresa Azucarera Heriberto Duquesne. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
40. Espinosa-Pedraja, R., Reymond-Alamo, A., Machado-Benavides, S., Carrillo-Alfonso, M.J., 1991. Sistemas de utilización del calor en la industria azucarera. Editor. ENPES Habana Cuba 62–65
41. Events + Webinars, 2021. . New Energy Events.
42. Faife Fernández, R.C., 2018. Evaluación del desempeño energético de la UEB Central Azucarero “Heriberto Duquesne”, relativo a los requisitos de la NC ISO 50001. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Facultad de Ingeniería
43. Fudge, S., Peters, M., 2009. Motivating carbon reduction in the UK: the role of local government as an agent of social change. *J. Integr. Environ. Sci.* 6, 103–120.
44. Fudge, S., Peters, M., Hoffman, S.M., Wehrmeyer, W., 2013. The global challenge of encouraging sustainable living: opportunities, barriers, policy and practice. Edward Elgar Publishing.
45. Fudge, S., Peters, M., Woodman, B., 2016. Local authorities as niche actors: The case of energy governance in the UK. *Environ. Innov. Soc. Transit.* 18, 1–17.
46. Fullana i Palmer, P., Puig, R., 1997. Análisis del ciclo de vida. Rubes.
47. Gailing, L., Röhring, A., 2016. Is it all about collaborative governance? Alternative ways of understanding the success of energy regions. *Util. Policy* 41, 237–245.
48. García, C.O., 2018. Reflexiones post-María sobre la gobernanza y transición energética puertorriqueña. *Rev. Adm. Pública* 49, 95–120.
49. Garzon Soria, C.P., 2010. Evaluación de alternativas de generación de electricidad desde el punto de vista de su impacto ambiental, para sectores no conectados a redes eléctricas.
50. Generación de electricidad a partir de bagazo en Cuba. [WWW Document], 2021. URL <http://www.fao.org/3/t2363s/t2363s0n.htm> (accessed 5.25.21).

51. Gil, M.P., Moya, A.M.C., Domínguez, E.R., 2013a. Life cycle assessment of the cogeneration processes in the Cuban sugar industry. *J. Clean. Prod.* 41, 222–231.
52. Gil, M.P., Moya, A.M.C., Domínguez, E.R., 2013b. Life cycle assessment of the cogeneration processes in the Cuban sugar industry. *J. Clean. Prod.* 41, 222–231.
53. Gil, M.P., Moya, A.M.C., Domínguez, E.R., Rodríguez, V.E., 2011b. MODELACIÓN DEL INVENTARIO DEL CICLO DE VIDA EN LA EMPRESA AZUCARERA HERIBERTO DUQUES. *Rev. Cent. Azúcar* 38.
54. Goedkoop, M., De Schryver, A., Oele, M., Durksz, S., de Roest, D., 2008. Introduction to LCA with SimaPro 7. PRé Consult. Neth.
55. Goedkoop, M., Oele, M., Leijting, J., Ponsioen, T., Meijer, E., 2016. Introduction to LCA with SimaPro. PRé.
56. González, E., Castro, V., Crisóstomo, H., Navarro, G., Olivos, B., Palomino, M., Possa, S., Regalado, C., Villar, A., Soria Dall’Orso, C.A.M., 2017. La matriz energética global y sus tendencias, in: 1° Congreso de Energías Renovables y Arquitectura Bioclimática. CABER 2017. Pontificia Universidad Católica del Perú.
57. González-Cortés, M., Martínez-Martínez, Y., Morales-Zamora, M., Espinosa-Pedraja, R., Soto del Valle, L.D., 2017. Análisis de cogeneración para satisfacer las demandas de las producciones integradas de azúcar y alcohol. *Tecnol. Quím.* 37, 392–404.
58. Havana Energy, 2021. . New Energy Events.
59. Haxeltine, A., Seyfang, G., 2009. Transitions for the People: Theory and Practice of ‘transition’ and ‘resilience’ in the UK’s Transition Movement. Tyndall Centre.
60. Haya, E., 2016. Análisis de Ciclo de Vida Master en Ingeniería y Gestión Medioambiental. Retrieved from https://static.eoi.es/savia/documents/teoria_acv_migma1.pdf.
61. Heinbach, K., Aretz, A., Hirschl, B., Prahl, A., Salecki, S., 2014. Renewable energies and their impact on local value added and employment. *Energy Sustain. Soc.* 4, 1–10.
62. Hernández Martínez, B., 2018. Oportunidades de inversiones en Bioeléctricas. Presented at the 1ra Feria Internacional “Energías Renovables Cuba 2018.”

63. Hipwood, T., 2015. The Global Challenge of Encouraging Sustainable Living: Opportunities, Barriers, Policy and Practice. Taylor & Francis.
64. Iglesias, D.H., 2005a. Relevamiento exploratorio del análisis del ciclo de vida de productos y su aplicación en el sistema agroalimentario. Contrib. Econ.
65. Iglesias, D.H., 2005b. Relevamiento exploratorio del análisis del ciclo de vida de productos y su aplicación en el sistema agroalimentario. Contrib. Econ.
66. Leiva, E.H., 2016. Análisis de ciclo de vida. Esc. Organ. Ind. 1–43.
67. Lozano Medina, A., 2014. Análisis del ciclo de vida como instrumento de desarrollo de la ecología industrial: aplicación al proceso de impresión de un periódico.
68. Machado González, H., 2015. Evaluación económica de esquemas de cogeneración a 67 Bar para el central Panchito Gómez Toro. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Facultad de Ingeniería
69. Marcas, C.O.N. de I., Información Técnica y, Básica, C.M. de la I., 1935. Boletín oficial de la Oficina Nacional de Invenciones, Información Técnica y Marcas. Comisión Nacional de Colaboración Económica y Científico-Técnica.
70. Martínez, H., Rubio-Rodríguez, M., Rubio-González, A., 2019. Programa cubano máximo aprovechamiento biomasa cañera para generación de electricidad Aplicada.
71. Martínez Hernández, A., 2018b. Modelo para la gobernanza de la matriz energética provincial en función de la generación de electricidad en Pinar del Río. Universidad de Pinar del Río " Hermanos Saíz Montes de Oca". Facultad de
72. MEER, M.-I., n.d. Taller Desarrollo de Capacidades para la Integración de Objetivos de Desarrollo Sostenible de Energía, Metas e Indicadores en los Programas Nacionales de Estadísticas en Países de América Latina. Láminas de presentación] Recuperado de <https://goo.gl/0yQMqj>.
73. Meier, P.J., 2002. Life-cycle assessment of electricity generation systems and applications for climate change policy analysis. University of Wisconsin--Madison.
74. Mellouk, A., Cuadra-Sanchez, A., 2014. Quality of experience engineering for customer added value services: from evaluation to monitoring. John Wiley & Sons.

75. Morejón Mesa, Y., Silva Junco, D., Reyes Suárez, Y., 2020. Diseño de un secador industrial tipo cilindro rotatorio para granos. *Rev. Cienc. Téc. Agropecu.* 29, 62–74.
76. Muñoz, C., Zaror, C., Saelzer, G., Cuchí, A., 2012. Estudio del flujo energético en el ciclo de vida de una vivienda y su implicancia en las emisiones de gases de efecto invernadero, durante la fase de construcción Caso Estudio: Vivienda Tipología Social. Región del Biobío, Chile. *Rev. Constr.* 11, 125–145. <https://doi.org/10.4067/S0718-915X2012000300011>
77. Nota_Informativa_Marzo_2016_Aprovechamiento_de_residuos_de_cosecha_de_la_ca_a_de_azucar.pdf, n.d.
78. Noticias, A.C. de, 2021. Heriberto Duquesne, primer central en cumplir el plan de azúcar en Villa Clara [WWW Document]. ACN. URL <http://www.acn.cu/economia/63587-heriberto-duquesne-primer-central-en-cumplir-el-plan-de-azucar-en-villa-clara> (accessed 6.17.21).
79. Oteman, M., Wiering, M., Helderma, J.-K., 2014. The institutional space of community initiatives for renewable energy: a comparative case study of the Netherlands, Germany and Denmark. *Energy Sustain. Soc.* 4, 1–17.
80. Patil, V.V., Patil, A.M., Kulkarni, P.D., n.d. DESIGN AND DEVELOPMENT OF BAGASSE DRYER FOR MODERN JAGGERY HOUSE.
81. Phadkari, S., Patil, S., Deokar, S.U., n.d. Design and Modeling of Solar Bagasse Dryer.
82. Ramirez, C.A.M., 2017b. Cogeneración: Más que azúcar, una fuente de energía renovable para el país [WWW Document]. Asocaña - Sect. Agroindustrial Caña. URL <https://www.asocana.org/> (accessed 5.16.21).
83. Rey, L., 2019. ¿Cuánto es un kilowatt-hora en combustible? (+ Infografía) • Trabajadores. Trabajadores.
84. Rodríguez, B.R., 2003b. El análisis del ciclo de vida y la gestión ambiental. *Boletín IIE* 91–97.
85. Rubio-González, A., Galindo, P., Egusquiza, F., Billini, P., Perdomo González, L., Castellanos, E., Rubio-Rodríguez, M., 2019. ESTUDIO SOBRE EL EMPLEO DE LOS RESIDUOS AGRÍCOLAS CAÑEROS COMO COMBUSTIBLES PARA LA GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD EN LA INDUSTRIA AZUCARERA CUBANA.

86. Rubio-González, A., Hernández Martínez, B., Rubio Rodríguez, M., n.d. Programa cubano para el máximo aprovechamiento de la biomasa cañera para la generación de electricidad.
87. Rubio-González, A., Rubio Rodríguez, M., 2018. Integración y esquemas energéticos para el máximo aprovechamiento de la biomasa cañera en la generación de electricidad. Cent. Azúcar 45, 20–31.
88. Rubio-González, A., Rubio Rodríguez, M., Roque Díaz, P., 2018. Valoración técnica y económica para el incremento de los parámetros del vapor en ingenios azucareros cubanos. Cent. Azúcar 45, 24–31.
89. Ruiz Fernández, N., 2010. Aplicación del Análisis del Ciclo de Vida en el estudio ambiental de diferentes Procesos Avanzados de Oxidación. Universitat Autònoma de Barcelona,.
90. Sánchez, J., 2014. La revolución energética del siglo XXI: fracturación hidráulica versus energía renovable. Perfiles Las Cienc. Soc. 2, 129–140.
91. SECADO DE BAGAZO, UNA ALTERNATIVA PARA AHORRO DE COMBUSTIBLE RESUMEN - PDF Descargar libre [WWW Document], 2021. URL <https://docplayer.es/51814795-Secado-de-bagazo-una-alternativa-para-ahorro-de-combustible-resumen.html> (accessed 6.27.21).
92. Secadores industriales: características y suministradores-Climatización e instalaciones [WWW Document], 2021. URL <https://www.interempresas.net/Climatizacion/Productos/Secadores-industriales.html> (accessed 6.17.21).
93. Secretariat, U., 2010b. The future energy matrix and renewable energy :
94. Seija, I., Ignacio, J., 2012. Modelación y validación del proceso de azúcar orgánico en la UEB “Carlos Baliño” mediante la metodología de ACV utilizando el formato de datos EcoSpold. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Facultad de Matemática
95. Seyfang, G., Hielscher, S., Hargreaves, T., Martiskainen, M., Smith, A., 2014. A grassroots sustainable energy niche? Reflections on community energy in the UK. Environ. Innov. Soc. Transit. 13, 21–44.
96. Sistemas de Secado y Secadores Industriales, 2019. . Camen-Q.
97. Toledo, E., Cabrera, J.A., Leyva, A., Pohlan, H. a. J., 2008. Estimación de la producción de residuos agrícolas en agroECOSistemas de caña de azúcar. Cultiv. Trop. 29, 17–21.

98. Treybal, R.E., García Rodríguez, A., 1988. Operaciones de transferencia de masa.
99. Valverde, B.J.B., 2012. análisis de ciclo de vida para el proceso de producción de nanopartículas de hidróxido de magnesio utilizadas como retardantes de flama. CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES AVANZADOS.
100. Yumpu.com, 2021. introduction-to-lca-with-simapro-7-simapro-and-pre-consultants [WWW Document]. yumpu.com. URL <https://www.yumpu.com/en/document/view/10491123/introduction-to-lca-with-simapro-7-simapro-and-pre-consultants> (accessed 6.27.21).

Anexos

Anexo 1: Fuentes de información de los datos empleados.

	Referencia
Entradas conocidas de la naturaleza (recursos)	
Uso del suelo	(Valdés et al., 1997; Contreras et al., 2009; Pérez, 2009)
Agua	(Pérez, 2009)
Entradas conocidas de la tecnosfera (materiales/fuel)	
Diésel	(Contreras et al., 2009; Pérez, 2009)
Pesticidas utilizados	
Diurón	(Pérez, 2009; MINAZ, 2002)
Glifosato	(Pérez, 2009; MINAZ, 2002)
Gesapox 80	(MINAZ, 2002)
MSMA 72	(MINAZ, 2002)
Sal de amina 72	(MINAZ, 2002)
Éster isoclítico 48	(MINAZ, 2002)
Asulox 40	(MINAZ, 2002)
Gramoxona	(MINAZ, 2002)
Amigan 65	(MINAZ, 2002)
Merlin 75	(MINAZ, 2002)
Sulfatante 90	(MINAZ, 2002)

	Referencia
Fertilizantes utilizados	
Urea	(Pérez, 2009; MINAZ, 2002)
Superfosfato triple de urea	(MINAZ, 2002)
Cloruro de potasio	(MINAZ, 2002)
Ceniza	(Cairo, 1996; Gárciga, 1999)
Vinaza	(MINAZ, 2002)
Emisiones al aire	
Óxido de nitrógeno	(EPA, 1995, 1997)
Emisiones al agua	
Pesticidas	(EPA, 1995, 1997)
Total nitrógeno	(EPA, 1995, 1997)
Emisiones a la tierra	
Pesticidas	(EPA, 1995, 1997)
Salidas conocidas a la tecnosfera. Productos y coproductos.	
Vapor	(Pérez, 2009)
Bagazo	(Pérez, 2009)

Anexo 2: Inventario de la generación de energía usando crudo.

Recursos	Cantidad	Unidad
Agua, enfriamiento, origen natural	0,06198404	m3/kWh
Materiales/combustibles		
amoníaco, líquido	0,00065441	kg/kWh
Aceite/Petróleo combustible pesado	0,25252354	kg/kWh
Piedra caliza, aplastada, lavada	0,01424856	kg/kWh
Agua, completamente ablandada	0,10513113	kg/kWh
Agua, a usuario	0,52367907	kg/kWh
Emisiones al aire		
Acetaldehído	2,6207E-06	kg/kWh
Ácido acético	1,0701E-05	kg/kWh
Acetona	2,6207E-06	kg/kWh
Amoníaco	1,1257E-06	kg/kWh
Arsénico	7,2376E-08	kg/kWh
Benceno	5,3505E-07	kg/kWh
Berilio	5,7744E-10	kg/kWh
Cadmio	3,4652E-08	kg/kWh
Calcio	3,1061E-07	kg/kWh
Dióxido de carbono, fósil	0,80985142	kg/kWh
Monóxido de carbono, fósil	0,00012831	kg/kWh

Emisiones al aire	Cantidad	Unidad
Cromo	1,2506E-07	kg/kWh
Cromo VI	3,2221E-09	kg/kWh
Cobalto	3,8381E-07	kg/kWh
Cobre	4,9534E-07	kg/kWh
Monóxido de dinitrógeno	4,1739E-05	kg/kWh
Dioxinas, 2,3,7,8 Tetraclorodibenzo-p-	1,0575E-13	kg/kWh
Etanol	5,3505E-06	kg/kWh
Formaldehido	8,0258E-06	kg/kWh
Hidrocarburos, alifáticos, alcanos, no especificado	1,0701E-05	kg/kWh
Hidrocarburos, alifáticos, insaturados	5,3505E-07	kg/kWh
Hidrocarburos, aromáticos	1,0701E-07	kg/kWh
Cloruro de hidrógeno	4,6695E-07	kg/kWh
Fluoruro de hidrógeno	3,1164E-07	kg/kWh
Hierro	7,2475E-07	kg/kWh
Plomo	3,6063E-07	kg/kWh
Manganeso	1,2063E-07	kg/kWh
Mercury	1,553E-09	kg/kWh
Metano, fósil	5,3505E-05	kg/kWh
Metanol	5,3505E-06	kg/kWh
Molibdeno	8,3342E-08	kg/kWh

Emisiones al aire	Cantidad	Unidad
Níquel	2,9603E-06	kg/kWh
Óxidos nitrosos	0,00271014	kg/kWh
HAP, Hidrocarburos aromáticos policíclicos	1,836E-08	kg/kWh
Partículas, < 2.5 um	9,1316E-05	kg/kWh
Partículas, > 10 um	6,576E-05	kg/kWh
Partículas, > 2.5 um, and < 10um	6,2244E-05	kg/kWh
Propano	5,3505E-07	kg/kWh
Selenio	5,483E-08	kg/kWh
Sodio	3,1061E-06	kg/kWh
Dióxido de azufre	0,00447245	kg/kWh
Vanadio	1,0713E-05	kg/kWh
Agua/m3	0,00101075	kg/kWh
Cinc	2,6318E-07	kg/kWh
Emisiones al agua		
HOA, Halógenos orgánicos absorbibles como Cl	6,5082E-08	kg/kWh
Arsénico	1,2215E-09	kg/kWh
DOB5, Demanda de oxígeno biológico	1,7964E-05	kg/kWh
Cadmio	2,9724E-09	kg/kWh
Cloruro	0,00024992	kg/kWh
Cromo	3,1162E-08	kg/kWh

Emisiones al agua	Cantidad	Unidad
Cobalto	2,4431E-09	kg/kWh
DOQ, Demanda de oxígeno químico	1,9648E-05	kg/kWh
Cobre	2,5829E-08	kg/kWh
COD, Carbono orgánico disuelto	1,0142E-06	kg/kWh
Fluoruro	2,0766E-06	kg/kWh
Hidrocarburos, no especificado	3,7943E-07	kg/kWh
Hipoclorito	3,5787E-06	kg/kWh
Hierro	1,2846E-06	kg/kWh
Plomo	5,1019E-08	kg/kWh
Manganeso	3,6646E-08	kg/kWh
Mercurio	1,2826E-09	kg/kWh
Níquel	1,8152E-07	kg/kWh
Nitrógeno, atmosférico	8,3512E-05	kg/kWh
Aceites, no especificado	5,7949E-07	kg/kWh
Fósforo	1,8934E-07	kg/kWh
Sulfato	0,002043	kg/kWh
Sulfuros	5,4969E-07	kg/kWh
Sulfito	1,8445E-05	kg/kWh
Solidos suspendidos, no especificado	2,2535E-05	kg/kWh
Talio	3,7868E-08	kg/kWh

	Cantidad	Unidad
Estaño	1,2215E-09	kg/kWh
COT, Carbono orgánico total	1,0505E-05	kg/kWh
Vanadio	3,7212E-07	kg/kWh
Cinc	6,459E-08	kg/kWh
Emisiones al suelo		
Aceite desfondado	2,2138E-05	kg/kWh
Ceniza aérea y cepillado de fango	2,7393E-05	kg/kWh
Ceniza de lignito	0,00058786	kg/kWh
Desperdicios sólidos municipales	0,00015588	kg/kWh
Residuos de la torre de enfriamiento	0,00014081	kg/kWh
Desperdicio de aceite mineral	0,00056737	kg/kWh

Anexo 3: Inventario de la generación de energía usando fuel.

Recursos	Cantidad	Unidad
Materiales/combustibles		
Aceite combustible Residual, en la refinería	0,26339	l/kWh
Transporte, barcaza, combustible mezclado promedio	0,0074867	tkm /kWh
Transporte, camión combinado, combustible mezclado promedio	0,0013815	tkm /kWh
Transporte, tren, diésel potenciado	0,0008837	tkm /kWh

Emisiones al aire	Cantidad	Unidad
Arsénico	4,166E-08	kg/kWh
Benceno	6,754E-09	kg/kWh
Berilio	8,7739E-10	kg/kWh
Cadmio	1,2561E-08	kg/kWh
Dióxido de carbono, fósil	0,80464	kg/kWh
Monóxido de carbono, fósil	0,00015766	kg/kWh
Cromo	2,6669E-08	kg/kWh
Cobalto	0,00000019	kg/kWh
Dioxinas, 2,3,7,8 Tetraclorodibenzo-p-	4,7183E-13	kg/kWh
Formaldehido	1,0415E-06	kg/kWh
Cloruro de hidrógeno	2,2074E-05	kg/kWh
Plomo	4,7657E-08	kg/kWh
Manganeso	9,4682E-08	kg/kWh
Mercurio	3,5664E-09	kg/kWh
Metano, fósil	8,8565E-06	kg/kWh
Metano, dicloro-, HCC-30	1,5217E-07	kg/kWh
Naftalina	3,5664E-08	kg/kWh
Níquel	2,6669E-06	kg/kWh
Monóxido de dinitrógeno	3,5037E-06	kg/kWh
Óxidos nitrosos	0,0010092	kg/kWh

Emisiones al aire	Cantidad	Unidad
Partículas, > 2.5 um, and < 10um	5,9854E-05	kg/kWh
Eteno, tetracloro	2,5951E-09	kg/kWh
Fenoles, no especificado	1,1466E-07	kg/kWh
Especies Radioactivas, no especificado	0,030737	kBq/kWh
Selenio	2,1556E-08	kg/kWh
Monóxido de azufre	0,0012617	kg/kWh
COV, compuestos orgánicos volátiles, origen no especificado	2,3942E-05	kg/kWh
Emisiones al agua		
Cloruro	2,0981E-09	kg/kWh
Cobre	1,0491E-08	kg/kWh
Hierro	1,0491E-08	kg/kWh
Aceites, no especificado	1,5736E-07	kg/kWh
Sólidos suspendidos, no especificado	3,1472E-07	kg/kWh
Emisiones al suelo		
Desperdicio a tratamiento	0,0003377	kg/kWh

Anexo 4: Inventario de la generación de energía usando gas acompañante.

Materiales/combustibles	Cantidad	Unidad
Gas natural, alta presión	0,184615	m3/kWh
Agua, completamente ablandada, a usuario	0,0432	kg/kWh
Agua, descarbonada, a usuario	1,44	kg/kWh
Emisiones al aire		
Acenafteno	5,71E-12	kg/kWh
Acetaldehído	5,76E-09	kg/kWh
Ácido acético	8,71E-07	kg/kWh
Arsénico	2,96E-10	kg/kWh
Benceno	6,49E-09	kg/kWh
Benzopireno	3,81E-12	kg/kWh
Berilio	1,78E-11	kg/kWh
Butano	6,67E-06	kg/kWh
Cadmio	1,63E-09	kg/kWh
Dióxido de carbono, fósil	0,38448	kg/kWh
Monóxido de carbono, fósil	1,58E-05	kg/kWh
Cromo	2,07E-09	kg/kWh
Cobalto	1,24E-10	kg/kWh
Monóxido de dinitrógeno	7,03E-06	kg/kWh
Etano	9,86E-06	kg/kWh

Emisiones al aire	Cantidad	Unidad
Formaldehído	2,33E-07	kg/kWh
Hexano	5,71E-06	kg/kWh
Plomo	7,42E-10	kg/kWh
Manganeso	5,62E-10	kg/kWh
Mercurio	4,95E-10	kg/kWh
Metano, fósil	6,99E-06	kg/kWh
Níquel	3,1E-09	kg/kWh
Óxidos nitrosos	0,000184	kg/kWh
Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos	5,76E-08	kg/kWh
Partículas en suspensión, < 2.5 um	3,54E-06	kg/kWh
Pentano	8,28E-06	kg/kWh
Propano	5,08E-06	kg/kWh
Ácido propanoico	1,15E-07	kg/kWh
Selenio	3,54E-11	kg/kWh
Dióxido de azufre	4,12E-06	kg/kWh
Tolueno	1,08E-08	kg/kWh
Agua/m3	0,000707	m3/kWh
Emisiones al agua		
Agua	0,043317	m3/kWh
Emisiones al suelo		

Desperdicios a tratamiento	7,2E-06	kg/kWh
----------------------------	---------	--------

Anexo 5: Inventario de la generación de energía usando diésel.

Materiales/combustibles	Cantidad	Unidades
Diésel, en refinería	0.333	l/kWh
Emisiones al aire		
Arsénico	5,2609E-08	kg/kWh
Benceno	8,529E-09	kg/kWh
Berilio	1,108E-09	kg/kWh
Cadmio	1,5862E-08	kg/kWh
Dióxido de carbono, fósil	0,97897	kg/kWh
Monóxido de carbono, fósil	0,00021551	kg/kWh
Cromo	3,3677E-08	kg/kWh
Cobalto	2,3993E-07	kg/kWh
Dioxina, 2,3,7,9 Tetraclorodibenzo-p-	5,5279E-13	kg/kWh
Formaldehido	1,3152E-06	kg/kWh
Cloruro de hidrógeno	2,7875E-05	kg/kWh
Plomo	6,0181E-08	kg/kWh
Manganeso	1,1956E-07	kg/kWh

Emisiones al aire	Cantidad	Unidad
Mercurio	4,5036E-09	kg/kWh
Metano, fósil	2,1917E-06	kg/kWh
Metano, dicloro-, HCC-31	1,7827E-07	kg/kWh
Naftalina	4,5036E-08	kg/kWh
Níquel	3,3677E-06	kg/kWh
Monóxido de dinitrógeno	4,7486E-06	kg/kWh
Óxidos nitrosos	0,0010313	kg/kWh
Partículas, > 2.5 um, and < 11um	4,2981E-05	kg/kWh
Etano, tetracloro	3,0403E-09	kg/kWh
Fenoles, no especificado	1,3433E-07	kg/kWh
Especies Radioactivas, no especificado	0,036011	kBq/kWh
Selenio	2,7221E-08	kg/kWh
Monóxido de azufre	0,0002149	kg/kWh
COV, Compuestos orgánicos volátiles, origen no especificado	8,6449E-06	kg/kWh
Emisiones al agua		
Cloruro	2,3656E-09	kg/kWh
cobre	1,1828E-08	kg/kWh
Hierro	1,1828E-08	kg/kWh
Aceites, no especificados	1,7742E-07	kg/kWh

Sólidos suspendidos, no especificado	3,5484E-07	kg/kWh
--------------------------------------	------------	--------

Anexo 6: Inventario de la generación de energía usando hidráulica:

Recursos	Cantidad	Unidad
Energía, potencial (en depósito hidroeléctrico)	3,79	MJ/ kWh
Agua, uso de turbina, origen natural	45	m3/ kWh
Ocupación, cuerpos acuosos, artificial	0,004496	m2/ kWh
Transformación, desde pasto, hecho por el hombre	0,0000281	m2/ kWh
Transformación, desde arbusto terrestre, esclerófilos	0,0000281	m2/ kWh
Transformación, a área industrial	5,63E-07	m2/ kWh
Transformación, a cuerpos acuosos, artificial	0,0000557	m2/ kWh
Materiales/combustibles		
Planta hidroeléctrica, cauce fluvial	8,0728E-13	p/ kWh
Aceite lubricante	0,00000756	kg/ kWh
Emisiones al agua		
Agua	45	m3/ kWh
Emisiones al suelo		
Desperdicio a tratamiento	0,00000756	kg/ kWh

Anexo 7: Inventario de la generación de energía usando solar:

Materiales de entrada	Unidades	Cantidad
Energía solar	kWh/m2	5
Materiales de salida		
Energía generada	kWh	1
Basura domestica	m3/kWh	0,00000031
Obras permanentes		
Área del predio	m2/kWh	0,000214

Anexo 8: Inventario de la generación de energía usando eólica:

Materiales de entrada	Unidades	Cantidad
Viento	m/s	6
Materiales de salida		
Energía generada	kWh	1
Grasas y Aceites	Kg/kWh	0,00000023
Residuos sólidos peligrosos	m3/kWh	0,000005
Aceites usados	Kg/kWh	0,00001
Solvente usado	Kg/kWh	0,000002
Basura domestica	m3/kWh	0,00000015
Obras permanentes		
Área del predio	m2/kWh	0,00031

Anexo 9: Potencial de algunas categorías de impacto:

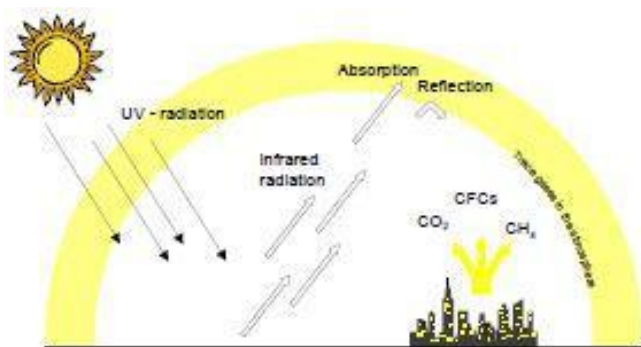


Figura 1: Potencial de calentamiento Global

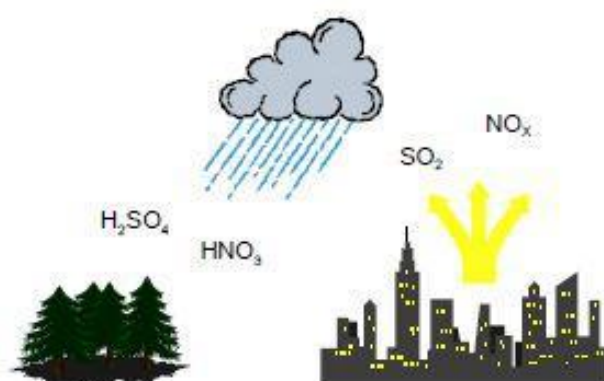


Figura 2: Potencial de Acidificación

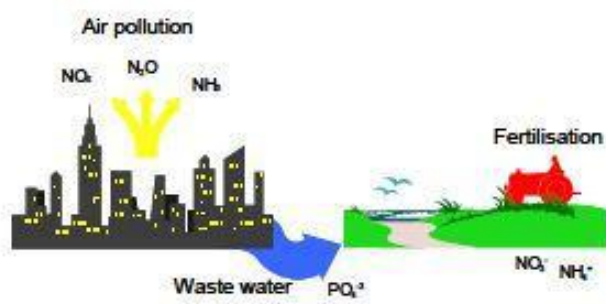


Figura 3: Proceso de eutrofización de suelos y aguas

Anexo 10: Relación de bioeléctricas y tributarios

No	Bioeléctrica	Potencia (mW)	Tributario
1	Jesús Rabí	20	México
2	Ciro Redondo	60	
3	Héctor Rodríguez	20	Abel Santamaría
4	5 de Septiembre	30	
5	30 de Noviembre	50	
6	Uruguay	60	
7	Mario Muñoz	50	
8	Batalla de las Guasimas	50	
9	Ciudad Caracas	20	Elpidio Gómez
10	Fernando de Dios	20	López Peña
11	George Washington	20	Carlos Baliño
12	Ecuador	50	
13	Panamá	30	Carlos M. de Céspedes
14	Urbano Noris	50	Loynaz Hechevarría
15	Colombia	20	Amancio Rodríguez
16	Cristino Naranjo	30	
17	Enidio Díaz	20	Roberto Ramírez
18	Brasil	30	
19	Antonio Sánchez	20	14 de Julio

No	Bioeléctrica	Potencia (mW)	Tributario
20	Antonio Guiteras	60	
21	Quintín Bandera	20	Panchito Gómez Toro
22	Majibacoa	30	
23	Grito de Yara	30	Bartolomé Masó
24	Héctor Molina	50	Boris L. Santacoloma
25	Héctor Molina	30	Dos Ríos

Anexo 11: Inversión capital total (ICT)

Identificador de proyecto	Planta de procesamiento	Valores calculados, \$
Costos directos		
Equipamiento Comprado		25439,154
Entregado	0,1	2543,915
Subtotal: equipamiento entregado		27983,069
Instalación del equipamiento Comprado	0,47	13152,043
Instrumentación& Controles(instalados)	0,36	10073,905
Sistema de cañerías (instalado)	0,68	19028,487
Sistemas eléctricos (instalado)	0,11	3078,138
Edificios (incluyendo servicios)	0,18	5036,952
Mejoras al patio	0,1	2798,307

Identificador de proyecto	Planta de procesado	Valores calculados, \$
Instalaciones de servicios (instalado)	0,7	19588,149
Costo directo total	2,6	100739,05
Costos Indirectos		
Ingeniería y supervisión	0,33	9234,413
Gastos de construcción	0,41	11473,058
Gastos legales	0,04	1119,323
Arancel del contratista	0,22	6156,275
Contingencia	0,44	12312,551
Costo indirecto total	1,44	40295,62
Inversión capital constante (ICC)		141034,67
Capital de trabajo (CT)	0,89	24904,932
Inversión capital total (ICT)		165939,602

Anexo 12: Equipos necesarios para la nueva tecnología de fabricación de azúcar.



Figura 1: Evaporadores de tubo largo



Figura 2: Filtro de tubo para guarapo



Figura 3: Filtro de banda horizontal de jugo clarificado



Figura 4: Tacho continuo



Figura 5: Reductores planetarios



Figura 6: Condensador evaporativo