

Universidad Nacional de Rosario

Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura

Escuela de Posgrado y Educación Continua



**“GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DEL CARDO COMÚN
(*Cynara cardunculus* L.) EN LA REPÚBLICA ARGENTINA**



Tesis presentada para optar al grado de

Magister en Energía para el Desarrollo Sostenible

Presentada por

Alumno: Ing. Jorge Luis Acevedo

Director: Mg. Ing. Aldo Amprimo

Codirector: Ing. Enrique Dreifuss

Año 2024

Índice

Agradecimientos.....	9
Resumen.....	10
Palabras Clave.....	11
Abstract.....	11
Keywords.....	12
1. Introducción.....	13
Hipótesis.....	20
Objetivos.....	20
2. Materiales y Métodos.....	20
2.1 Características del cardo común (<i>Cynara cardunculus</i> L. var <i>altilis</i>).....	21
2.2 Elección del sitio de cultivo del cardo común.....	28
2.3 Proceso de cultivo del cardo común.....	28
2.4 Obtención de energía eléctrica a partir del cardo común.....	32
2.4.1. Pretratamiento de la biomasa para la gasificación.....	32
2.4.2 <i>Balances teóricos de masa y energía en el proceso de generación de energía eléctrica</i>	33
2.4.3 Balance en el motor de combustión interna (MCI).....	44
2.4.4 Ajuste del proceso de generación de energía eléctrica.....	45
2.5 Análisis del impacto ambiental del proceso completo.....	45
2.5.1 Estimación de la emisión de CO ₂ en el proceso completo.....	45
2.5.2 Análisis del Impacto Ambiental.....	46
2.6 Análisis de la factibilidad económica del proceso.....	50
3. Resultados y Discusión.....	52
3.1 Resultados.....	52
3.1.1 Ubicación del sitio de cultivo y de la planta de biomasa.....	52
3.1.2 Rendimiento y balance energético del proceso de cultivo del cardo común.....	56
3.1.3 Balances de masa y energía en el proceso de generación de energía.....	57
3.1.3.1 Resultados de los balances teóricos en el gasificador y tren de limpieza.....	58
3.1.4 Resultado del balance estequiométrico en el MCI.....	67
3.1.5 Ajuste de los resultados según el equipamiento propuesto.....	70

3.1.6 Resultado de la estimación de las emisiones de CO ₂ para el proceso completo.....	74
3.1.7 Resultado del análisis del impacto ambiental del proceso	78
3.1.7.1 Marco legal y categorización del proyecto.....	78
3.1.7.2 Determinación de la línea de base ambiental.....	80
3.1.7.3 Lista de chequeo y naturaleza del impacto ambiental.....	81
3.1.7.4 Generación de la matriz de impacto ambiental.	86
3.1.7.5 Plan de gestión ambiental y monitoreo.....	88
3.1.8 Resultados del análisis de la factibilidad económica del proceso	95
3.1.8.1 Inversiones.....	95
3.1.8.2 <i>Activos tangibles e intangibles.</i>	96
3.1.8.3 Capital de trabajo.	97
3.1.8.4 Análisis de depreciación y valor de rescate.....	97
3.1.8.5 Costos de operación.....	99
3.1.8.6 Ingresos del proyecto.	100
3.1.8.7 Análisis del flujo de fondo y cálculo de tasas (VAN, TIR y Repago).....	101
3.2 Discusión.....	105
4. Conclusión.....	110
5. Anexos	111
5.1. Anexo A. Criterios y Pasos para confeccionar la Matriz de Decisiones	111
5.2. Anexo B. Equipamiento y resultados del proceso de generación de energía eléctrica.....	112
5.3. Anexo C. Cronograma de Vida Útil del Emprendimiento y Matrices de Criterios.....	116
6. Bibliografía	121

Índice de Figuras

Figura 1 Consumo global de energía primaria por fuente (2010 – 2050)	14
Figura 2 Aumento de la temperatura de la superficie de la tierra en el año 2040 al ritmo actual de las actividades antrópicas	14
Figura 3 Mapa de Potencial de Biomasa de la Argentina con abordaje regional .	17
Figura 4 Diagrama del proceso completo de obtención de energía a partir de gasificación de cardo común	21
Figura 5 Vista de una inflorescencia y detalle del sistema radicular del cardo común	22
Figura 6 Crecimiento de las rosetas y de la planta de cardo común	23
Figura 7 El cardo en la zona de cosecha y recolección	24
Figura 8 Isoyetas y zona potencial óptima para el cultivo del cardo en Argentina	26
Figura 9 Porcentaje de germinación de semillas de cardo en función del tiempo a diferentes temperaturas	27
Figura 10 Esquema de la trituración del cardo común	32
Figura 11 Esquema de operaciones para la generación de energía eléctrica	33
Figura 12 Esquema del balance de masa y energía en el gasificador	37
Figura 13 Esquema de retención de impurezas en el tren de limpieza del syngas	39
Figura 14 Esquema del funcionamiento de un intercambiador de calor de carcasa y tubo a contraflujo	42
Figura 15 Esquema de un lavador de gases	43
Figura 16 Flujos de calor en el MCI	44
Figura 17 Esquema del procedimiento general de EIA	46
Figura 18 Radio de ubicación de la zona de cultivo del cardo en la provincia de Santa Fe	53
Figura 19 Ubicación del sitio de cultivo del cardo en la provincia de Santa Fe y las cooperativas adyacentes	54
Figura 20 Esquema del balance de masa en el ciclón	61
Figura 21 Esquema del balance de masa en el filtro	64
Figura 22 Eficiencia en el lavador de gases en función del tamaño de partículas	66
Figura 23 Esquema del balance de masa en el lavador de gases	66
Figura 24 Diagrama de Sankey para el flujo de energía en el gasificador	73
Figura 25 Diagrama de Sankey para el flujo de energía en el MCI	73
Figura 26 Determinación de las áreas AID y All para el emprendimiento	80
Figura 27 Afectación del medio abiótico en las etapas de planificación e instalación	87
Figura 28 Afectación del medio abiótico en las etapas de O&M y cierre	87

Figura 29 Ingresos rurales al sitio de cultivo y planta de generación de energía del proyecto	88
Figura 30 Esquema del sitio con la zona de cultivo de cardo y la planta de biomasa con los servicios asociados	89
Figura 31 Costos económicos de la gasificación del cardo común para generar energía	102
Figura 32 Variación del VAN y la TIR respecto del precio de la potencia eléctrica	104
Figura 33 Variación del VAN y la TIR en relación a la variación de la inversión	104
Figura 34 Precios (€/MWh) de la electricidad en países de Europa al 30 de noviembre de 2023.....	109
Figura B 1 Esquema del Motor Siemens modelo SGE – 56SM	113

Índice de Tablas

Tabla 1 Productividad del cardo cultivado durante dos años consecutivos.....	26
Tabla 2 Datos de partida para la siembra del cardo común	29
Tabla 3 Consumo de combustible en labores agrícolas	29
Tabla 4 Parámetros y valor para el cálculo de emisiones de CO ₂ en labores agrícolas.....	31
Tabla 5 Composición promedio del gas producido por diferentes tecnologías de gasificación.....	35
Tabla 6 Niveles típicos de alquitrán en la gasificación de biomasa por tipo.....	35
Tabla 7 Características típicas de los gasificadores de lecho fijo y lecho fluidizado	36
Tabla 8 Contenido aproximado de alquitrán esperable para 3 tipos comunes de gasificadores	36
Tabla 9 Composición química porcentual del cardo al ingreso del gasificador y su poder calorífico inferior.....	38
Tabla 10 Intervalo de eficiencia de retención para diferentes familias de ciclones	40
Tabla 11 Propiedades de resistencia de materiales de tejido de filtros de mangas	40
Tabla 12 Especificaciones para el syngas al ingreso al MCI.....	44
Tabla 13 Criterios, subcriterios y significados de la Matriz de Decisiones	48
Tabla 14 Criterios de puntuación para la Matriz de Impacto Ambiental	48
Tabla 15 Matriz de Decisiones sobre la ubicación de la zona de cultivo del cardo	52
Tabla 16 Distancia de localidades más cercanas al sitio del proyecto	55
Tabla 17 Características del suelo de la zona del sitio del proyecto	55
Tabla 18 Temperaturas medias, máximas y mínimas y precipitaciones anuales para el sitio elegido	56
Tabla 19 Rendimiento de biomasa (cardo común) en campo	56
Tabla 20 Energía total consumida y producida en la cadena energética	57
Tabla 21 Composición del gas de síntesis (syngas)	59
Tabla 22 Resultado del balance teórico de masa y energía en el gasificador.....	61
Tabla 23 Calor específico promedio del gas de síntesis para T = 863 K.....	62
Tabla 24 Resultado del balance de masa y energía en el 1° recuperador de calor	63
Tabla 25 Calor específico del gas de síntesis a Tm = 240 °C	64
Tabla 26 Flujo total de calor liberado y aire requerido.....	65
Tabla 27 Valores de los prefijos estequiométricos de la reacción	67
Tabla 28 Masa y fracciones molares para el gas de síntesis	68

Tabla 29 Masa y fracciones molares para el aire	68
Tabla 30 Masa y fracciones molares para el gas de escape.....	68
Tabla 31 Calor específico del gas de escape.....	70
Tabla 32 Demanda de energía de las cooperativas de servicios eléctricos	71
Tabla 33 Entradas y de energía en el gasificador y el tren de limpieza	72
Tabla 34 Emisiones de CO ₂ asociadas a la generación de electricidad del sistema peninsular de España a marzo de 2021	75
Tabla 35 Emisiones de CO ₂ asociadas a la generación de electricidad del sistema no peninsular de España a marzo de 2021	75
Tabla 36 Consumo de agua para la generación de eléctrica por distintos procesos en el sector español	76
Tabla 37 Actividades del Anexo IV – Decreto 101/2003 de la ley 11.717 de la provincia de Santa Fe	79
Tabla 38 Valores de FC para la categorización de establecimientos	79
Tabla 39 Factores adoptados para la categorización de establecimientos	80
Tabla 40 Lista de chequeo para la identificación de componentes del sistema ambiental.....	81
Tabla 41 Lista de chequeo para la clasificación de componentes del sistema ambiental.....	84
Tabla 42 Resultado de la aplicación de los criterios de la Matriz de Impacto Ambiental	86
Tabla 43 Parámetros que debe cumplir el gas de escape a la salida del MCI	93
Tabla 44 Plan de monitoreo del programa de control de los impactos negativos	93
Tabla 45 Total de inversiones para el período 0 y el 1° bimestre del período 1 ...	95
Tabla 46 Cuadro resumen de los activos tangibles.....	96
Tabla 47 Cuadro resumen de los activos intangibles	96
Tabla 48 Cuadro resumen del capital de trabajo.....	97
Tabla 49 Cuadro de depreciación y valor de rescate	98
Tabla 50 Depreciación y valor de rescate a través de la vida útil del emprendimiento.....	98
Tabla 51 Costos de operación en base anual	99
Tabla 52 Valor promedio de referencia del MWh a noviembre de 2023.....	100
Tabla 53 Cuadro resumen de inversión, ingreso neto y flujo de fondo.....	101
Tabla 54 Cuadro resumen de TIR, VAN y período de repago a un valor de USD128,2.MWh ⁻¹ sin financiación	101
Tabla 55 Variación del VAN y TIR en función del precio del MWh sin financiación	102
Tabla 56 Cuadro resumen de TIR, VAN y período de repago a un valor de USD128,2.MWh ⁻¹ con financiación	102

Tabla 57 Variación del VAN y TIR en función del precio del MWh con financiación	103
Tabla 58 Resumen de variaciones del VAN, TIR y PR respecto del precio del MWh con y sin financiación	103
Tabla 59 Labores de cultivo del cardo común (€/dt)	107
Tabla 60 Costos de operación (€/dt) para distintos países de la región mediterránea	107
Tabla 61 Comparación de costos del cultivo de cardo común entre el estudio de Christou et al., (2009) y el presente trabajo.....	108
Tabla 62 Costos de inversión (€/dt) para una planta encendida con cultivos energéticos.....	108
Tabla A1 Matriz de Decisiones confeccionada en base a los criterios adoptados....	110
Tabla B1 Características del funcionamiento del gasificador ANKUR WBG-850.....	111
Tabla B2 Resultado del balance ajustado en el gasificador	111
Tabla B3 Resultado del balance ajustado en el ciclón y en el 1º recuperador de calor.....	113
Tabla B4 Resultado del balance ajustado para el filtro y el 2º recuperador de calor.....	113
Tabla B5 Resultado del balance ajustado en el lavador de gases y el MCI.....	114
Tabla C1 Cronograma de la vida útil del emprendimiento.....	115
Tabla C2 Matriz de impacto – criterio extensión.....	116
Tabla C3 Matriz de impacto – criterio duración.....	117
Tabla C4 Matriz de impacto – criterio reversibilidad.....	118

Agradecimientos

A mi familia que me acompañó y acompaña siempre. Por su comprensión y apoyo.

A mi director y codirector de tesis por su profesionalidad, por las recomendaciones, sugerencias y apoyo a lo largo del desarrollo del presente trabajo.

Al cuerpo docente por su profesionalismo en el desarrollo de cada una de las asignaturas que componen la maestría. En especial a la Dra. Virginia Scotta por su escucha y comprensión cada vez que he recurrido a ella.

A mis compañeros de curso por el compañerismo desarrollado a lo largo de la cursada de la maestría. Por el respeto y la camaradería alcanzada.

Al Ing. Jorge Campanaro compañero de docencia y amigo del alma, por su comprensión, escucha y aliento a lo largo de este proyecto y a la Dra. Claudia Alzugaray, por sus comentarios siempre positivos, por su comprensión y por su apoyo.

Al Señor Juan Benassi de la firma AGVE, por cederme gentilmente información técnica vital para el desarrollo del presente trabajo.

A la Dra. Susana Feldman a pesar de todo, con la cual inicié este camino.

Resumen

La demanda energética a escala mundial asociada al incremento poblacional y al calentamiento global, han generado una crisis sin precedentes en todos los órdenes. Esto requiere entre otras cosas, sustituir la energía convencional por energía de fuentes renovables. También, necesita de un cambio de paradigma que contemple el paso de la generación concentrada a la generación distribuida con la ventaja de la entrega más rápida de energía a la red. A pesar del auge de las energías renovables de los últimos años en sus distintos tipos, la bioenergía es todavía poco aprovechada. Su fuente a partir de cultivos energéticos no tradicionales puede convertirse en un factor muy interesante por cuanto estos cultivos no compiten con la seguridad alimentaria aportada por los cultivos tradicionales como el maíz, el trigo, el girasol y la soja. Uno de esos cultivos está constituido por el cardo común o cardo de castilla (*Cynara cardunculus* L.). Especie de cultivo del tipo C3 utilizado para este fin en los países de la zona mediterránea.

En ese sentido, el presente trabajo aborda la generación de energía eléctrica a partir del cardo común a través del proceso termoquímico de gasificación. A partir de la bibliografía procedente de los países de origen del cardo común y de la escasa bibliografía existente en nuestro país, se llevó a cabo un estudio de las condiciones edafoclimáticas de esta especie, para encontrar un sitio de cultivo de similares características al de su origen. Luego se abordó el proceso de cultivo hasta la obtención de biomasa seca como materia prima del proceso de generación de energía. Este proceso, contempla la gasificación de la biomasa para obtener gas de síntesis (syngas) que luego se somete a una limpieza de impurezas de modo que pueda ingresar a un motor de combustión interna (MCI) para obtener finalmente energía eléctrica y térmica. Este proceso evita el consumo importante de agua de proceso.

Se analizó la información disponible y se determinó el sitio de cultivo del cardo común y la ubicación de la planta adyacente de tratamiento de la biomasa para generar energía. Al no contar con datos experimentales, se realizó un cálculo teórico que abarcó tanto el proceso de cultivo como el de generación de energía para aportar de electricidad en forma distribuida a dos cooperativas de servicios eléctricos cercanas. Estos cálculos teóricos aportaron resultados alentadores de producción de biomasa fresca y seca, así como del valor de su poder calorífico inferior (PCI) similar al valor obtenido a partir de la producción en los lugares de origen. El cálculo del consumo y la producción energética en el proceso de cultivo se ajustó al uso de maquinarias y equipos de producción agrícola convencionales. El balance energético arrojó un valor positivo (6,8) muy similar al del cultivo del trigo (6,9). Los costos de producción en el proceso de cultivo guardan similitud a los de producción en el lugar de origen del cardo común. La emisión de CO₂

calculada tuvo un valor inferior al reportado para el cultivo del cardo común en la zona de Andalucía, España.

Para la producción de energía eléctrica el cálculo teórico se ajustó a los parámetros y condiciones de funcionamiento tanto del gasificador como del MCI. Los valores de energía eléctrica y térmica alcanzados fueron de 1,066 MWh y 1,46 MWh respectivamente para un caudal de $470 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ de biomasa en una superficie de cultivo de 470 hectáreas, para una vida útil de la planta de 15 años con un funcionamiento de 8000 horas anuales. El cálculo de la emisión de CO_2 del proceso completo fue de $0,52 \text{ kgCO}_2\cdot\text{MWh}^{-1}$. Valor menor al reportado para la generación eléctrica usando gas natural y carbón respectivamente.

Para el cálculo de la factibilidad económica el precio regional ($\text{USD } 128,2\cdot\text{MWh}^{-1}$) arrojó resultados positivos para la TIR, el VAN y el período de repago. La mejor condición se logró con financiación. Este precio guarda relación con valores europeos de potencia eléctrica. Los cálculos contemplaron créditos fiscales. Precios del MWh menores a este valor no dieron resultados alentadores. El análisis de sensibilidad demostró que la mejor condición se logró con financiación sobre la inversión inicial.

Palabras Clave: Cardo común (*Cynara cardunculus* L.). Gasificación. Generación distribuida. Energía eléctrica

Abstract

The global energy demand associated with population increase and global warming has generated an unprecedented crisis at all orders. This requires, among other things, replacing conventional energy with energy from renewable sources. Also, it requires a paradigm shift that contemplates the transition from concentrated generation to distributed generation with the advantage of faster delivery of energy to the grid.

Despite the rise of renewable energy in recent years in its different types, bioenergy is still underutilized. Its source from non-traditional energy crops can become a very interesting factor since these crops do not compete with the food security provided by traditional crops such as corn, wheat, sunflower and soybeans. One of these crops is the common thistle or Castile thistle (*Cynara cardunculus* L.). Cultivation species of type C3 used for this purpose in the countries of the Mediterranean area.

In this sense, the present work addresses the generation of electrical energy from common thistle through the thermochemical gasification process. Based on the bibliography from the countries of origin of the common thistle and the limited literature existing in our country, a study of the edaphoclimatic

conditions of this species was carried out, to find a cultivation site with similar characteristics to that of its origin. Then the cultivation process was addressed until obtaining dry biomass as raw material for the energy generation process. This process contemplates the gasification of biomass to obtain synthesis gas (syngas) which is then subjected to cleaning of impurities so that it can enter an internal combustion engine (ICM) to finally obtain electrical and thermal energy. This process avoids the significant consumption of process water.

The available information was analyzed and the common thistle cultivation site and the location of the adjacent biomass treatment plant to generate energy were determined. Since we did not have experimental data, a theoretical calculation was carried out that covered both the cultivation process and the energy generation process to provide electricity in a distributed manner to two nearby electrical service cooperatives. These theoretical calculations provided encouraging results for the production of fresh and dry biomass, as well as the value of its lower calorific value (LCI) similar to the value obtained from production in the places of origin. The calculation of energy consumption and production in the cultivation process was adjusted to the use of conventional agricultural production machinery and equipment. The energy balance showed a positive value (6.8) very similar to that of wheat cultivation (6.9). The production costs in the cultivation process are similar to those of production in the place of origin of the common thistle. The calculated CO₂ emission had a lower value than that reported for the cultivation of common thistle in the area of Andalusia, Spain.

For the production of electrical energy, the theoretical calculation was adjusted to the parameters and operating conditions of both the gasifier and the ICE. The electrical and thermal power values achieved were 1.066 MWh and 1.46 MWh respectively for a flow rate of 470 kg.h⁻¹ of biomass in a cultivation area of 4720 hectares for a plant useful life of 15 years with a operation of 8000 hours a year. The calculation of the CO₂ emission of the complete process was 0.52 kgCO₂.MWh⁻¹. Lower value than reported for electricity generation using natural gas and coal respectively.

For the calculation of economic feasibility, the regional price (USD 128.2.MWh⁻¹) showed positive results for the IRR, the NPV and the repayment period. The best condition was achieved with financing. This price is related to European values of electrical power. The calculations included tax credits. MWh prices lower than this value did not give encouraging results. The sensitivity analysis showed that the best condition was achieved with financing on the initial investment.

Keywords: Common thistle (*Cynara cardunculus* L.). Gasification. Distributed generation. Electric power

1. Introducción

La demanda mundial de energía eléctrica disminuyó ligeramente (-0,1%) en el año 2020 producto de la pandemia del COVID19, sin embargo este paréntesis finalizó en diciembre del mismo año. La demanda volvió a valores anteriores (India +5%, Europa +2%, Japón + 3%, Corea del Sur + 2%, y EE.UU + 2%). La generación por carbón en China creció un 2% en el 2020. China hoy es el responsable de más de la mitad de la electricidad mundial generada con carbón (53%), un incremento con respecto al 44% del año 2015 (Stanway, 2021). Por otra parte, actualmente en América Latina y el Caribe, 17 millones de personas no tienen acceso a la electricidad y 75 millones no tienen acceso a combustibles y tecnologías limpias para cocinar, lo que exacerbó la pobreza y vulnerabilidad durante y después de la pandemia. Esta situación se puede ver agravada por el aumento de los precios de los combustibles fósiles en el contexto de la guerra en Ucrania. Esta inseguridad energética impacta física, social y económicamente a millones de personas en toda la región.

Las concentraciones de CO₂ en el 2021 casi alcanzaron el valor de 420 ppm. Las emisiones de CO₂ para ese año tuvieron tres actores principales con China en primer lugar (12.466.316 Mt), seguido por Estados Unidos (4.752.079 Mt) y Japón (1.084.691Mt), mientras que Argentina emitió 189.002 Mt (Muntean, 2021). Las proyecciones muestran cuatro escenarios posibles de cara al año 2100 expresadas como RCP (trayectorias de concentración representativas) desde la más restrictiva (RCP 2.6) con una concentración aproximada de 420 ppm (año 2021) hasta la menos restrictiva (RCP 8.5) con una concentración de CO₂ de 940 ppm.

Se calcula que para el año 2050 el crecimiento poblacional alcanzará los 9.000 millones de habitantes y 10.400 para del año 2080 (Agudo, 2022). El consumo de energía primaria tendrá un crecimiento de la energía eólica, pero el uso de los combustibles fósiles seguirá en alza (Figura 1), con preponderancia en el sector industrial.

Este aumento poblacional, el incremento en la concentración de emisiones de CO₂ y de consumo de energía estimado determinarán que en el año 2040 se llegue al incremento de la temperatura promedio de 1,5°C y siguiendo ese ritmo entre el 2046 y el año 2081, la temperatura crecería en promedio unos 4,3°C. La tasa de aumento actual se muestra en la Figura 2.

Figura 1

Consumo de energía primaria por fuente (2010 – 2050)

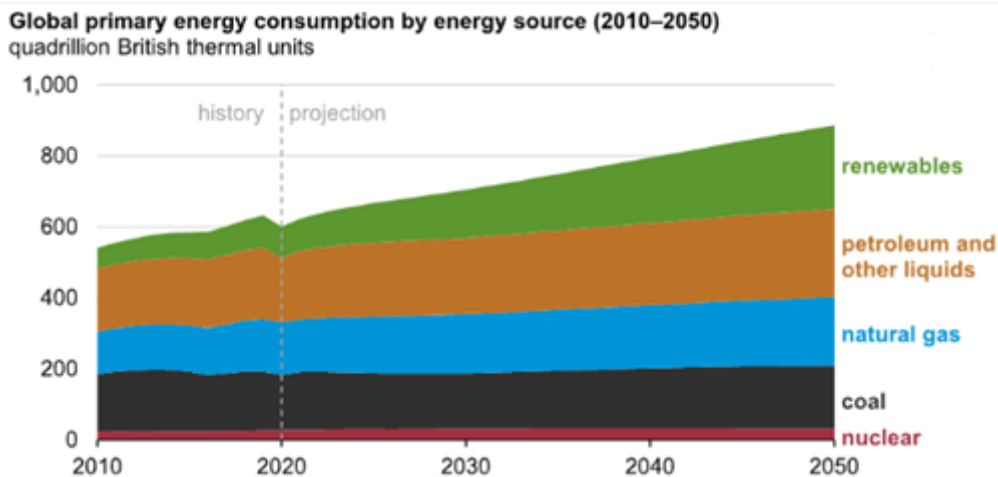
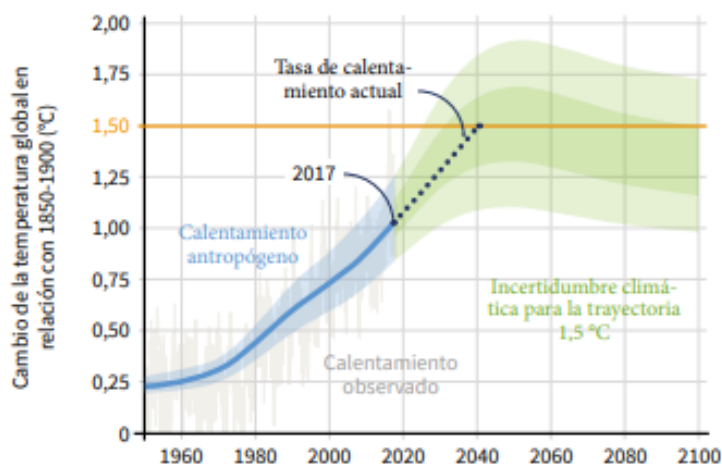


Figura 2

Aumento de la temperatura de la superficie de la tierra en el año 2040 al ritmo actual de actividades antrópicas



Nota: La Figura 2 indica el aumento de la temperatura de la superficie de la tierra en el año 2040 al ritmo actual de actividades antrópicas. Tomado de *IPCC (Grupo Intergubernamental de expertos sobre el cambio climático, 2019)*, (p. 54).

Para este problema complejo de incremento del crecimiento poblacional, la demanda energética y el calentamiento, las energías renovables constituyen parte de la solución al sustituir parte de las fuentes fósiles para generar energía. Otro avance es la generación distribuida. Tanto en Europa, como en otros continentes existe legislación que acompaña este cambio de paradigma. En Argentina, muchas provincias adhirieron a la ley 27.424 de generación de energía distribuida.

En relación a la utilización de energías renovables a nivel mundial, las energías eólica y solar alcanzaron un record del 10% de la electricidad mundial en

2021. Actualmente, toda la energía limpia brinda un suministro del 38% (EMBER, 2022). Esto se puede reflejar en el caso de Argentina. La potencia instalada al mes de abril 2022 era de 42.864 MW, de los cuales 5.008 MW corresponden a energías renovables: solar con 1.065 MW, eólica con 3.291 MW, hidráulica (≤ 50 MW) con 512 MW, biogás con 69 MW y biomasa con 70 MW (Marinozzi et al. 2022). Para el presente trabajo interesa esta última fuente energética.

La energía de la biomasa abarca recursos vegetales diversos, residuos agrícolas, forestales, pecuarios, sólidos urbanos, residuos agro-foresto-industriales, efluentes cloacales o industriales, etc. Pueden usarse distintos procesos: biológicos, espontáneo o provocado, o termoquímicos. Se considera que la biomasa posee un balance neutro con respecto a las emisiones de CO₂. Esto se debe a que el carbono que se libera durante la combustión de la biomasa es el mismo que han absorbido continuamente las plantas durante su crecimiento. En el año 2020, a nivel mundial, la participación de la biomasa fue del 12%. De ese porcentaje, el 90% corresponde a la biomasa sólida, siendo los recursos más usados: leña (67%), carbón vegetal (7%) y residuos agrícolas y pecuarios (7%) (Manrique, 2022).

La cadena de producción en base a la biomasa (cultivos energéticos, pastizales naturales, desechos agroindustriales y desechos de centros urbanos) implica el tratamiento en la planta de biomasa para generar energía, biofertilizantes u otros productos y para reducción de residuos y efluentes (Organización Internacional del Trabajo, 2019. p 22). Tanto los biofertilizantes como la energía (térmica y/o eléctrica) se usan a nivel industrial o residencial.

Existen en el mundo plantas de biomasa con procesos de gasificación: Ironbrigde en Reino Unido (con 740 MW), Toppila en Finlandia (con 210 MW), Polianiec en Polonia (con 205 MW) y Florida Crystals en EE.UU (con 140 MW) (<https://elperiodicodelaenergia.com/>). En Argentina, se han intentado algunos proyectos antes de la pandemia (Central Concordia de 25 MW, a partir de residuos foresto-industriales por medio de gasificación y combustión y la central de Federación, de la misma potencia y proceso que la anterior).

Una alternativa de biomasa no tradicional son los *cultivos energéticos* no tradicionales, tales como especies de los géneros *Brassica*, *Miscanthus*, *Jatropha* y el cardo común (*Cynara cardunculus* L.). Para que cumplan su condición de no competencia con la agricultura, es recomendable que:

- Se adapten a las condiciones edafo-climáticas que no admiten los cultivos tradicionales.
- Que presenten altos niveles de productividad con aceptables costos de producción.
- Que no posean un aprovechamiento alimentario paralelo.
- Presenten un fácil manejo con técnicas y maquinarias conocidas y comunes entre los agricultores.
- Presenten balances energéticos positivos.

- Que la biomasa producida se adecue a los fines para los que será utilizada: como materia prima para pelets, para producción térmica, para generación o cogeneración de calor y electricidad.
- Que presenten mínimas necesidades de agroquímicos para minimizar impactos ambientales.

El cardo común está siendo utilizado en la zona mediterránea (España, Italia, Grecia y Portugal) para la generación de energía térmica y eléctrica, ya sea como biomasa directamente o peletizada o bien, para generar biodiesel en mezcla con otros productos. En Argentina, los estudios e investigaciones, así como también, su aprovechamiento para generar energía, están casi inexplorados. Esto genera una interesante perspectiva para su abordaje desde su cultivo hasta su tratamiento termoquímico en la producción de energía.

La biomasa proveniente de cultivos energéticos no tradicionales, puede ser un aporte valioso en tal sentido. El cardo común es uno de ellos, con un poder calorífico inferior (PCI) aceptable; no compite como alimento como otros cultivos energéticos (maíz, trigo, soja, girasol, etc.) y puede ser cultivado en *regiones de secano* sin inconvenientes notables. No obstante, no existe suficiente información sobre sus posibilidades concretas de uso como cultivo bioenergético, ni de los balances de energía que resultarían de ese uso.

El proceso de obtención de energía a través de este tipo de biomasa en regiones que no compiten con los cultivos tradicionales es un proceso que posee bajo consumo de fertilizantes, no requiere riego y puede aportar una cuota interesante de energía para disminuir el uso de combustibles fósiles, reduciendo de ese modo las emisiones de CO₂ a la atmósfera y con ello al calentamiento global. Por supuesto, una de sus principales desventajas es que requiere extensiones de terreno importantes para su producción. La clave está en ubicar su producción en terrenos semiáridos o subhúmedos poco aptos para la explotación agrícola convencional. Otra desventaja es el menor poder calorífico frente a los combustibles tradicionales. Sin embargo, uno de sus subproductos, la energía térmica, puede ser aprovechada en procesos industriales o para generar igualmente energía eléctrica a través de turbinas de vapor. Otro subproducto es la ceniza que puede usar en la industria cementera o como fertilizante.

El balance energético del año 2020 para Argentina y la distribución de la oferta interna de energía primaria, muestra que la participación de la energía renovable es del 9,4% (Moragues, 2022), mucho menor que a nivel mundial. En ese porcentaje los alcoholes y aceites vegetales, el bagazo y la leña participan en un 4,57%, mientras que la eólica y la solar lo hacen en 1,24% y 0,15% respectivamente. La biomasa forestal tiene incidencia en las provincias de Misiones, Tucumán, algo en Jujuy (bosques nativos) y norte de la provincia de Buenos Aires (bosques implantados).

La leña está generalmente ligada a la deforestación o pérdida de bosques naturales. En 2015, la Argentina se ubicó entre los diez países del mundo con

mayor pérdida de bosques y actualmente solo cuenta con el 30 % de la superficie forestal existente a principios del siglo XX. Según la FAO (2020), la oferta de biomasa forestal directa era de 4,7 millones de toneladas. El mismo documento también hace referencia a que la biomasa indirecta llegó a 10 millones de toneladas, que son utilizados en un 80% para generar energía térmica y fabricación de papel.

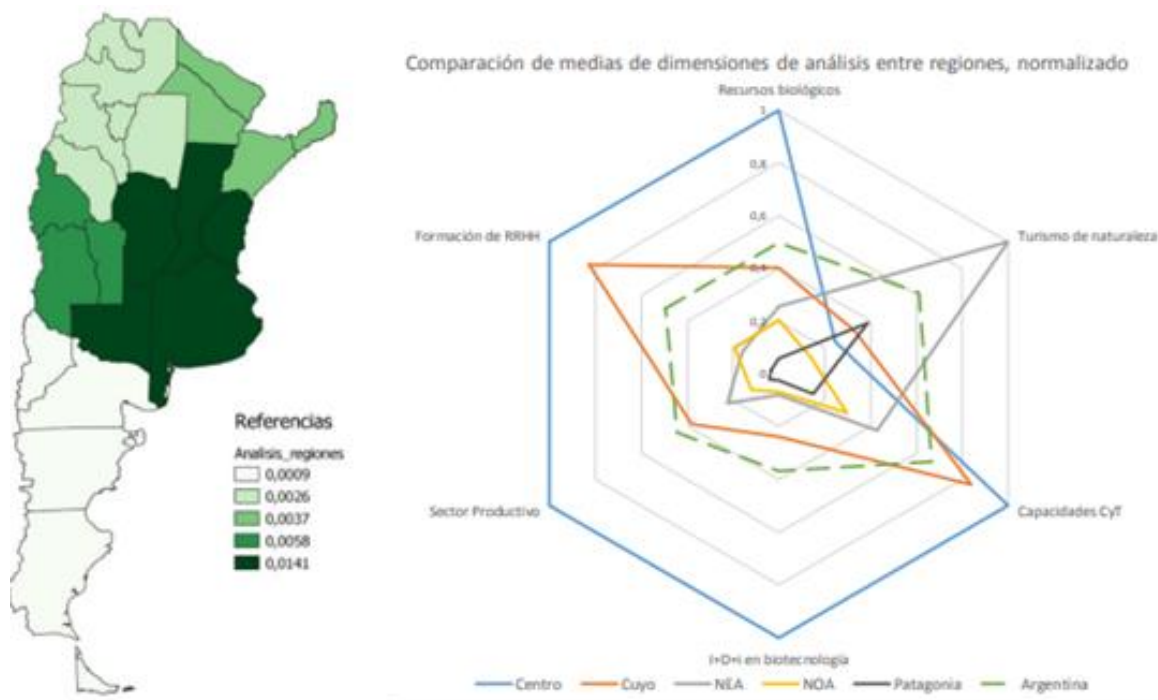
Las perspectivas para la Argentina sobre el uso de la biomasa sólida hacia el año 2050 prevén una potencia eléctrica de alrededor de 3.000 MW y una energía eléctrica de alrededor de 12.000 GWh.año⁻¹ (Blanco et al., 2021). Adicionalmente, en la región de secano, los cultivos tradicionales que se pueden utilizar para generar energía, ya sea a través de sus residuos o directamente para generar biocombustible (como es el caso de la soja y el sorgo) necesitan para su crecimiento el uso del suelo y el aporte de plaguicidas y fertilizantes.

Otras formas de biomasa sólida, como por ejemplo la cáscara de arroz o maní, recién están comenzando a utilizarse. Entonces, aparece como interesante el uso de los cultivos energéticos no tradicionales, que no compiten directamente con aquellos cultivos tradicionales (maíz, trigo, soja, girasol). Por lo tanto, no atenta contra la seguridad alimentaria.

El Centro Interdisciplinario de estudios en Ciencia, Tecnología e Innovación presentó en el año 2023 el mapa de potencial bioeconómico de la Argentina, mostrando una zona de aprovechamiento de la biomasa bajo ciertos parámetros como: recursos biológicos, turismo de naturaleza, capacidades de ciencia y tecnología, investigación, desarrollo e innovación en biotecnología, sector productivo y recursos humanos. La Figura 3 muestra el mapa obtenido.

Figura 3

Mapa de Potencial de Bioeconomía de la Argentina con abordaje regional



Nota: La Figura 3 muestra el Mapa de Potencial de Bioeconomía de la Argentina con abordaje regional. Tomado de *Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación 2023*. (p. 18).

Según el mapa anterior la zona elegida deberá responder también a la cantidad de superficie de plantación de acuerdo al cultivo elegido, a la ubicación de ésta con respecto a la planta de generación de energía, a la cercanía de los centros de distribución de dicha energía y de los insumos necesarios para la producción.

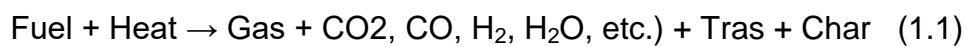
Existen varias alternativas de obtención de energía a partir de biomasa. Entre los procesos termoquímicos se destacan, combustión directa, pirólisis, torrefacción y gasificación. Los procesos mencionados para presentan ventajas y desventajas.

La torrefacción todavía es un proceso poco explorado para la obtención de energía. La combustión y la pirólisis, emiten más CO₂ que la gasificación y para la generación de energía utilizan agua en el proceso a través de calderas. La gasificación es un proceso termoquímico de conversión de un insumo, sólido o líquido, en un gas con características combustibles, a través de una oxidación parcial a temperaturas intermedias (entre las recomendadas para pirólisis y las recomendadas para combustión), por medio de un agente oxidante en el orden del 20-60% del oxígeno estequiométrico necesario para combustión.

El gas obtenido, syngas, puede ser aprovechado como: (1) materia prima para la producción de combustibles líquidos u otros bioproductos mediante procesos químicos; (2) producción de electricidad empleando un ciclo termodinámico (ciclo Clausius-Rankine o de turbina de vapor, motores de

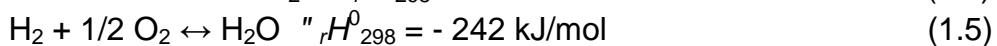
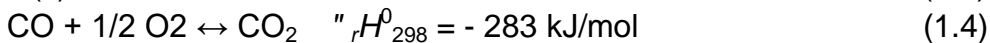
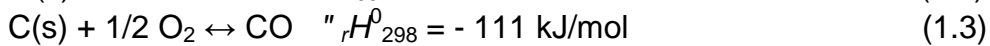
combustión interna de ciclo Otto, turbinas de gas, ciclos combinados, etc.); (3) directamente para generar energía térmica (hornos, calderas, calentamiento de agua para tambos, etc.); o (4) cogeneración de energía (Franck Colombres, 2017).

El proceso se puede dividir en varias etapas que se relacionan con el calentamiento y secado de combustible, la etapa de pirólisis y la etapa de gasificación (Heidenreich et al., 2016). Durante la etapa de pirólisis que se produce entre 300 y 600°C, los principales componentes orgánicos del combustible se descomponen térmicamente en gases permanentes, vapores condensables, líquidos y residuos carbonosos. Las reacciones de pirólisis se resumen de la siguiente manera:



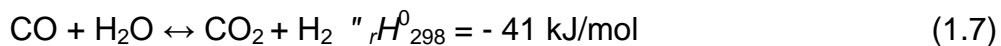
En la etapa de gasificación, los productos de pirólisis reaccionan a temperaturas relativamente altas entre 700 y 1500°C con el agente de gasificación o los gases del producto mediante numerosas reacciones químicas. Las reacciones homogéneas en fase gaseosa más importantes y las reacciones heterogéneas entre materia sólida y gases son las siguientes.

Para las reacciones de combustión se tiene:

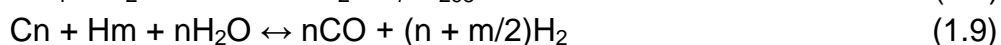
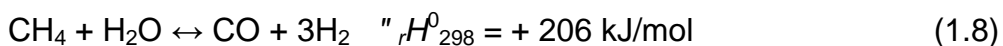


Para las reacciones de gasificación homogéneas se tiene.

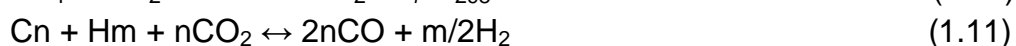
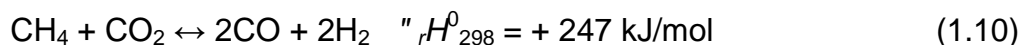
Reacción de cambio de gas a agua:



Reformado con vapor:



Reformado en seco (CO₂):

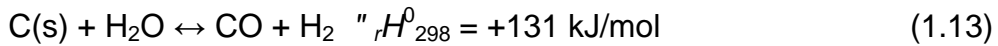


Para las reacciones de gasificación heterogéneas vale:

Reacción de Boudouard:



Reacción de gas agua:



Reacción de metanación:



Hipótesis

El cardo común (*Cynara cardunculus* L. var. *altilis*) es apto para usar como cultivo energético en áreas de secano para obtener energía eléctrica.

Objetivos

- Determinar la ubicación del cultivo del cardo en la región de secano del país
- Determinar si el balance energético del cultivo del cardo es positivo para su uso como fuente de energía
- Establecer los balances teóricos de masa y energía en la generación de energía eléctrica por un valor nominal ≥ 1 MWh, a partir de la gasificación del cardo común y ajustar sus resultados de acuerdo a los parámetros y características de los equipos elegidos para el proceso.
- Estimar las emisiones de CO_2 para el proceso completo y analizar el impacto ambiental del proceso de generación de energía eléctrica.
- Determinar la factibilidad económica de generar energía eléctrica mediante la gasificación de cardo común.

2. Materiales y Métodos

Como el presente trabajo trata sobre la generación de energía eléctrica mediante un proceso termoquímico muy poco explorado en el país y con un tipo de biomasa que todavía no ha sido usado en Argentina, se trabajó básicamente a partir de datos de bibliografía nacional e internacional. El proceso completo se muestra en la Figura 4.

Para comenzar se analizó las características del cardo común como cultivo energético no tradicional. Luego se hizo lo propio con las características edafoclimáticas de su lugar de origen para poder relacionar esta información con la de la región de secano de nuestro país. Además se tomó en cuenta la posibilidad que otorga la generación distribuida de energía tanto para conectarse a la red nacional, como para brindar energía a las cooperativas de distribución de energía eléctrica de la zona.

Figura 4

Diagrama del proceso completo de obtención de energía a partir de gasificación de cardo común



2.1 Características del cardo común (*Cynara cardunculus* L. var *altilis*)

Existen tres variedades de cardo común, la alcachofa (*Cynara scolymus*) vegetal comestible en muchos países, el cardo silvestre (*Cynara cardunculus* L. var. *sylvestris*), una planta rústica que se adapta muy bien a los climas semiáridos y que en Argentina crece como maleza y el cardo común cultivado (*Cynara cardunculus* L. var. *altilis*), que crece a partir de semillas. Esta última especie presenta posibilidades en el uso como recurso para la obtención de energía.

El cardo común, es una especie vegetal herbácea (Fernández et al., 2006) y constituye un cultivo energético no tradicional de los denominados perennes del

tipo fotosintético C3 (Archontoulis, 2011), con ciclo anual de crecimiento. El ciclo de vida del cardo cultivado es de aproximadamente 15 años (Fernández y Curt, 2006). El primer año es de crecimiento y el resto corresponde a producción.

El cardo consta de un gran órgano de reserva rizomatoso subterráneo (muñón) del que se ramifican 3-5 raíces carnosas con un diámetro a veces superior a 2 cm, que pueden alcanzar más de un metro de profundidad (hasta 7 m, según Fernández, 2006), permitiendo que la planta sobreviva en condiciones de escasez de agua, pudiendo explorar los horizontes profundos del suelo más rico en humedad sin problemas. En otoño, las yemas de las raíces producen una nueva roseta de hojas, mientras que en primavera florece con el secado de las propias flores en verano.

El cardo común puede alcanzar los 2 m de altura. Las hojas de la roseta basal son grandes. En los bordes de las hojas y en los peciolo de las poblaciones silvestres suele haber espinas, que en los cultivos seleccionados esta característica es menos frecuente (Fernández, 2006). En el extremo del tallo principal y de las diferentes ramas se desarrolla una inflorescencia de tipo capítulo, de forma globosa (cabezas) de unos 5 a 8 cm de diámetro. Cada capítulo a su vez posee numerosas flores. El fruto de esta especie es una cypsela (aquenio, fruto seco indehisciente, de ovario ínfero) coronado por pappus (grupo de filamentos plumosos de naturaleza calicina), es la unidad de dispersión y de implantación del cultivo por lo cual de aquí en adelante, se hará referencia al mismo como "semilla" (Gominho et al., 2018). La Figura 5 muestra detalles del cardo cultivado.

Figura 5

Vista de una inflorescencia y detalle del sistema radicular de C. cardunculus L



Nota: En la Figura 5 se ve la inflorescencia y detalle del sistema radicular de *C. cardunculus* L. Tomado de *Falasca y Ulberich, 2007* (p. 5). *Fernandez et al., 2006.* (p. 6)

El tamaño de las semillas es de 3,7 a 7 mm x 2,2 a 4,5 mm para las plantas silvestres, pero en cultivos son más grandes, con 6,5 a 8,1 mm x 2,8 a 3,5 mm. Las semillas maduran en verano, no presentan mecanismos de dormición (pueden germinar con condiciones adecuadas de temperatura y humedad) y la a su maduración la parte aérea se seca. Los órganos subterráneos, las raíces y los brotes perennes permanecen vivos. El primer año de crecimiento suele ser lento pero a partir del segundo, se acelera. Esto se debe a que su sistema radicular actúa como un órgano de almacenamiento de carbohidratos que aseguran el suministro de compuestos para el rebrote de la planta. La profundidad a la que llegan sus raíces es tal que pueden obtener el agua subterránea a varios metros debajo de la superficie (Gominho et al., 2018).

En la etapa inicial de crecimiento (crecimiento de las rosetas), las hojas están rodeadas de pequeñas espinas, que se encuentran principalmente en los pecíolos. Durante ese período, las hojas se expanden y la cobertura del suelo pasa de un 10 a un 90%. Una vez que la planta pasa esa etapa se vuelve más tolerante a la etapa de frío severo (-10°C). Las rosetas se caen formando un suelo rico en humus con mejores características físicas (Grammelis. et al., 2008). La Figura 6 muestra el crecimiento de rosetas y plantas.

Figura 6

Crecimiento de las rosetas y planta de cardo común



Nota: La Figura 6 muestra el crecimiento de las rosetas y planta. Tomado de Archontoulis, (2011). (pp. 28-29)

Durante el desarrollo vegetativo de la planta, el aumento de la biomasa se logra mediante una mayor expansión de las hojas y con la producción de hojas nuevas. Una hoja basal completamente desarrollada (1m de largo) podría tener un área foliar de 0.45 m², y con 10 hojas por planta, el área foliar de una sola planta podría ser de 4.5 m². La inflorescencia es un capítulo (Figura 7). El número final de inflorescencias por planta depende del genotipo, manejo del cultivo, medio ambiente y tipo de suelo en el cual se ubica el cultivo. En suelos pobres, los capítulos varían de 1 a 4 por planta, mientras que en suelos fértiles los capítulos varían de 8 a 12 por planta.

En la etapa de senescencia la planta comienza a perder humedad y se acerca el período de cosecha. La Figura 7 muestra la etapa de cosecha y recolección.

Figura 7

El cardo en la etapa de cosecha y recolección



Nota: En la Figura 7 se ve al cardo en la etapa de cosecha y recolección. Tomado de *Fernández, (2006)*. (p. 45)

Con referencia a la partición la biomasa del cardo, Raccuia y Melilli (2004) han informado que el 38% eran cabezas y el 62% eran tallos más hojas. Otro estudio refiere que produce alrededor del 40% de tallos, 25% de hojas y 35% de capítulos. Los tallos presentan un contenido de cenizas del 5 al 11%, un total de extractos del 13 al 21%, dónde, los extractos acuosos son del orden del 5,7% y lignina total que varía del 17 al 20,3% y el 53% de polisacáridos (Laurenco et al., 2014). El mismo grupo de estudio realizó ensayos en dos puntos diferentes de la península ibérica, Portugal (Sesimbra) y España (Alcalá de Henares) en el

período 2006/07, para conocer el contenido de lignina del cardo y el resultado arrojado fue del 23% en los tallos despojados y 21,8% en la médula de la planta.

La composición química sumativa de la materia seca descrita en la literatura varía significativamente; 1.1% -22.2% de cenizas, 5.4% -46.4% extractos totales, 0.5% -28.8% lignina total y 41,7% -74,5% monosacáridos totales obtenidos por hidrólisis de polisacáridos (Gominho et al., 2018).

Los polisacáridos en las hojas representan el 27,1%, mientras que en los pelos y pappi, 76,0% y 74,5%, respectivamente. Los tallos tienen un promedio de 51,2% de carbohidratos con glucosa (37,1%) y xilosa (14,3%) como los principales monómeros. En los tallos depilados, el contenido de polisacáridos aumentó al 55,0%, pero el contenido de glucosa y xilosa se mantuvo similar (33,4% y 16,0%). Pelos y pappi son las fracciones de biomasa en las que el contenido de holocelulosa (77,5% y 72,8%) y acelulosa (55,2% y 46,8%) fue más alto.

El estudio aportado por Grammelis et al., 2008 muestra los valores para biomasa completa más semillas (en base seca) de C (43,7%); H (6,0%); N(1,8%); S(0,05%); y O(48,45%). Su poder calorífico superior (PCS) es de 16,3 MJ.kg⁻¹, mientras que Fernandez et al. (2006), obtuvieron 17,1 y 15,8 MJ.kg⁻¹ como valores de PCS y PCI, respectivamente.

Respecto de las condiciones edafoclimáticas y de rendimiento del cardo en sus lugares de origen, en clima mediterráneo la siembra puede ser en otoño o primavera, mientras que la cosecha se realiza en verano, cuando la parte aérea está seca (con una humedad del 10 al 15%). La distancia de siembra entre filas es de 0,75 – 0,80 m, mientras que las hileras pueden tener una distancia que depende de la maquinaria disponible y la densidad de planta deseada. Se ha reportado una densidad de planta de 10.000 plantas.ha⁻¹ con una densidad máxima de 15.000 plantas.ha⁻¹ (Fernandez et al., 2006). La Tabla 1 muestra un estudio realizado por Fernandez y Curt. (2006), con datos de diferentes países europeos, sobre rendimiento de biomasa seca con diferentes precipitaciones.

Otro estudio llevado a cabo en Grecia (Archontoulis, 2011) reportó un rendimiento de biomasa de 12 a 16 t.ha⁻¹ con una temperatura media de 16 °C y una precipitación anual media de 568 mm. En la zona central de Italia (en la región de Lazio) se realizaron estudios sobre el cultivo de cardo con una temperatura media anual de 15,2 °C (24 °C en julio-agosto y 7 °C en verano) y una precipitación total de 800 mm obteniéndose un rendimiento de 9,8 a 13,22 t.ha⁻¹ (Francaviglia et al., 2016). En cuanto al pH del suelo, para la región de Lazio (Italia) se reportó valores de pH de 6,7 (Francaviglia et al., 2016), en la zona de Catania se obtuvo un valor de pH de 7,6 (Raccuia, Cavallaro, Melilli. 2004), mientras que Archontoulis. S, (2011) en su investigación reporta un pH de suelo de 6,8 a 8,3 para varios sitios de Grecia (Palamas, Ermisti, Velestino, Koskina, etc.) y Gominho et al., (2011) obtuvo un pH de 7 para la zona de Beja (Portugal).

La Tabla 1 muestra la productividad del cardo común durante dos años consecutivos (Fernandez y Curt, 2006).

Tabla 1

Productividad de cardo cultivado durante dos años consecutivos

Site	1994-95		1995-96	
	pp (mm)	Biomass (t dm/ha)	pp (mm)	Biomass (t dm/ha)
Madrid (Spain)	280	6.5	529	23.1
Tebas (Greece)	490	28.6	324	33.4
Forly (Italy)	752	17.5	837	24.6
Policoro (Italy)	316	7.5	722	15.6
Sicily (Italy)	387	15.9	654	--
MEAN	445	15.2	646	24.2

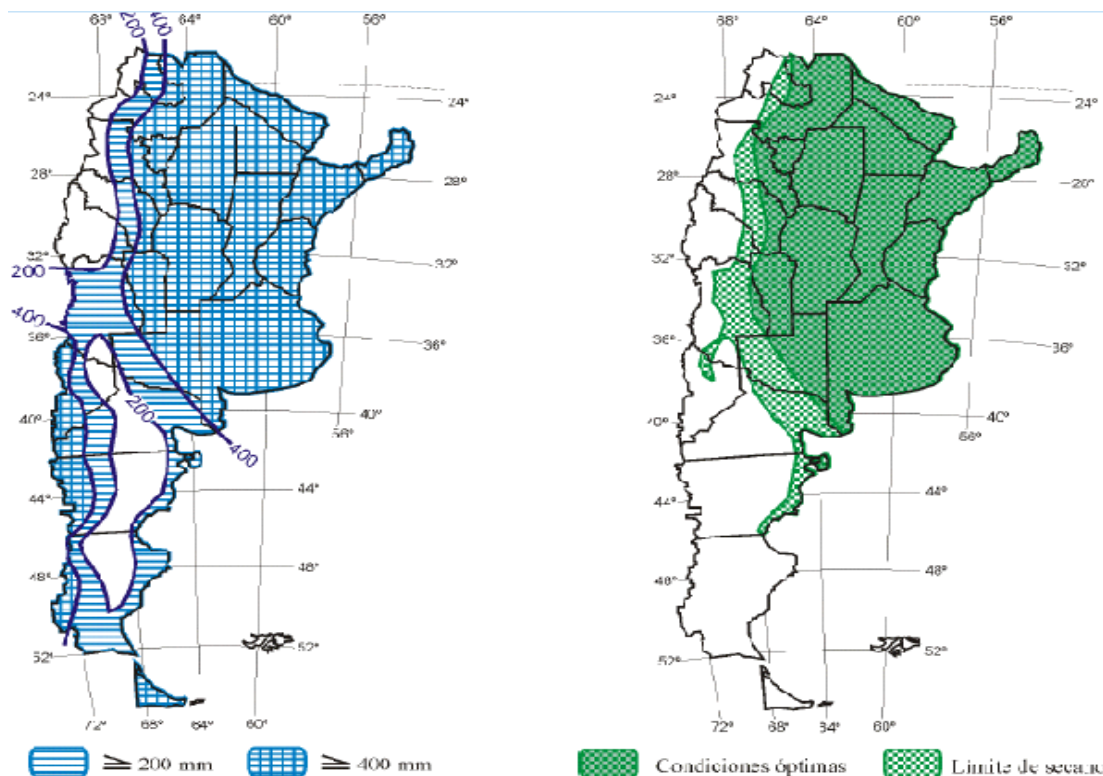
Nota: Tabla 1, productividad del cardo común durante dos años consecutivos. Tomado de *Fernandez y Curt, (2006). (p. 3).*

Gominho et al. (2011) reportó un rendimiento de $7,5 \pm 3,8$ t.ha⁻¹ para la zona de Beja, Portugal en el período 2004 a 2006.

En nuestro país el estudio realizado por Falasca y Ulberich (2007) muestra dos mapas conteniendo con las isoyetas y zona de secano óptima para el cultivo del cardo (Figura 8). El trabajo de Cravero et al., (2012) cuyos resultados arrojaron un peso de biomasa fresca de 1996,7 g.planta⁻¹ y un porcentaje de materia seca entre el 30 y 35%. El valor del pH para el estrato superior arrojó un valor de 7 (Martín et al., 2013). El estudio de Oliverio (2014), muestra el porcentaje de germinación de semillas de cardo en función del tiempo a diferentes temperaturas. Este estudio mostró como resultado que el 95% de las semillas germinaron con un rango de temperaturas entre 20 y 25°C en un período de 18 días (Figura 9).

Figura 8

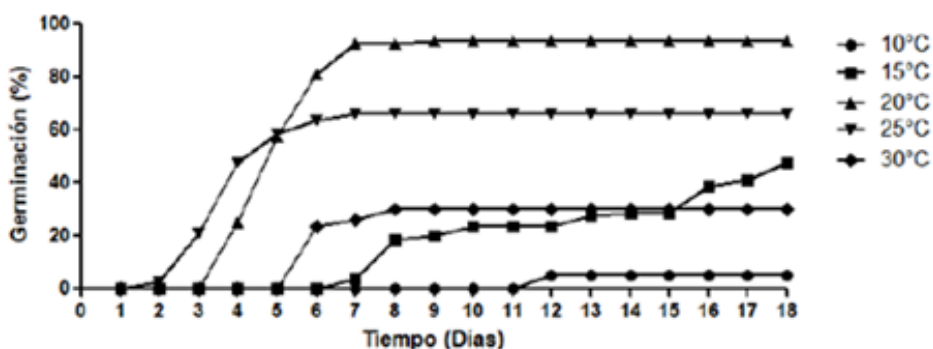
Isoyetas y zona potencial óptima para el cultivo del cardo en Argentina



Nota: La Figura 8 muestra las isoyetas y zona potencial óptima para el cultivo del cardo en Argentina. Tomado de *Falasca y Ulberich, (2007)*. (p. 3).

Figura 9

Porcentaje de germinación en semillas de cardo, en función del tiempo a diferentes temperaturas



Nota: Figura 9 porcentaje en germinación de las semillas de cardo común en función de diferentes temperaturas en un período de tiempo de 18 días. Tomado de *Oliverio, (2014)*. (p. 9)

2.2 Elección del sitio de cultivo del cardo común

Para elegir el sitio de cultivo se tomó como base el mapa de potencial bioeconomía de la Argentina. Se utilizó una matriz de decisiones. Esta matriz es una herramienta gráfica que ayuda a tomar decisiones racionales ante diferentes alternativas posibles. Es una herramienta de doble entrada con consignas mandatorias y consignas deseables o esperables.

Las condiciones mandatorias a tener en cuenta son:

- Condiciones edafoclimáticas (temperatura, rango de pH del suelo entre determinados valores límites y precipitaciones anuales Que no sea una zona/tierra de cultivo actual alimentario.
- Legislación habilitante de suministro de energía a red. (que pueda aportarse energía como usuario generador)
- Existencia de nodos de conexión del SADI
- Presencia/cercanía de cooperativas eléctricas operativas.

Las condiciones deseables o esperables a tener en cuenta son:

- Zona de promoción industrial.
- Zona de bajas oportunidades laborales/baja ocupación/sub-ocupada.
- Baja humedad ambiental a fin de ahorrar energía en el secado de biomasa.
- Presencia de disponibilidad de servicio técnico.

2.3 Proceso de cultivo del cardo común

De acuerdo a la Figura 4 el proceso de cultivo abarca desde la preparación del terreno hasta el transporte de biomasa seca (15% de humedad) al depósito de la planta de gasificación. Para la preparación del terreno se adoptó los lineamientos de Doz, 2012 con subsolado que permite el aireado, la permeabilidad del agua con el perfil del suelo y el drenaje superficial (Viscoso et al., 2020). Luego se usó un vibrocultivador y el abonado utilizando urea en cantidad de $150 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ (Cravero et al., 2012). Para la siembra se adoptó el uso de líneas separadas entre 75 y 80 cm con una densidad de planta de $15.000 \text{ planta}\cdot\text{ha}^{-1}$ (Fernandez, 2006). La profundidad de la siembra es de 2 a 4 cm (Doz, 2012). Se estableció dicha siembra para el mes de Marzo y la cosecha para la finalización de verano siguiente con una cantidad de semillas de $5 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$.

Para la cosecha se estableció el uso de una cosechadora convencional para girasol o maíz. Se utilizó una altura de segado entre 2 y 4 cm para evitar el arrastre de cascotes y terrones que luego dificultan la gasificación. Luego de la cosecha se procedió al enfardado en rollos que se trasladaron al depósito de biomasa mediante tractor y remolque. En la recolección del cardo está prevista una pérdida de material del 10%, mientras que en el traslado la pérdida es de 0,1% (Matovic, 2013). Los datos de entrada para el cultivo del cardo se resumen en la Tabla 2.

Tabla 2

Datos de partida para la siembra del cardo común

Datos de partida para la siembra del <i>Cynara cardunculus</i> L.		Fuente
Semillas	5 kg.ha ⁻¹	Fernandez, 2006. Junta de Andalucía, 2009
Fertilizante (Urea)	150 kg.ha ⁻¹	Cravero et al., 2012
Peso de la planta (con 15% de humedad)	1.996,7 g.planta ⁻¹	Cravero et al., 2012
Densidad de planta	15.000 plantas.ha ⁻¹	Fernandez, 2006

Los implementos agrícolas para cada etapa del proceso de cultivo se muestran en el Anexo A. Para el consumo de combustible en las labores agrícolas se adoptaron los valores aportados por la Junta de Andalucía (2009) que se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3

Consumo de combustible en labores agrícolas

Consumo de combustible en labores agrícolas		
Labor	Componente	Gasoil (L.ha ⁻¹)
Preparación del terreno	Subsolador	23
	Vibrocultivador	6
Fertilización	Abonadora centrífuga	1,5
Siembra	Sembradora de precisión	6,5
Cosecha	Cosechadora de maíz	27
Remolque	Tractor con remolque	1,5
Total		65,5

Para el balance energético de la producción de biomasa (cardo) se tomaron en cuenta los siguientes aspectos:

- Mano de obra
- Semillas
- Fertilizante
- Maquinarias agrícolas

No se tuvieron en cuenta herbicidas y pesticidas; el cultivo del cardo se planteó sin su utilización. No se consideró el riego artificial atento al cuidado del agua como bien natural. Tampoco se consideró el costo energético de la fabricación de las maquinarias y su transporte por cuanto es un dato complejo de determinar.

Para la energía total consumida en la cadena energética se tiene:

- Contenido energético del gasoil: $35,86 \text{ MJ.L}^{-1}$ o $43,1 \text{ MJ.kg}^{-1}$ (Edwards et al., 2007)
- Mano de obra: 18 MJ.h^{-1} para actividades agrícolas convencionales y $0,27 \text{ MJ.h}^{-1}$ para actividades de transporte (Manzanares, 1997).
- Semilla: el input energético de la semilla de cardo es de $8,2 \text{ MJ.kg}^{-1}$ (Manzanares, 1997)
- Fertilizante: el input energético de la urea es de 80 MJ.kg^{-1} (Manzanares, 1997)
- Maquinarias agrícolas: Para el gasto energético de la utilización de las maquinarias agrícolas, los valores son (Manzanares, 1997. Hetz et al., 1996).

Subsolado del terreno: 419 MJ.h^{-1}

Pase del cultivador: 280 MJ.h^{-1}

Abonado de cobertura/fondo: 280 MJ.h^{-1}

Siembra: 280 MJ.h^{-1}

Cosechado: $87,6 \text{ MJ.h}^{-1}$ (Hetz et al., 1996)

Enfardado: 74 MJ.h^{-1} (Hetz et al., 1996)

- Rendimiento de la cosecha en campo: $8077.65 \text{ kg.ha}^{-1}$
- Contenido energético del cardo : $15,9 \text{ MJ.kg}^{-1}$
- Gasto de combustible: $65,5 \text{ L. ha}^{-1}$

Además se tuvo en cuenta el tiempo de operación de cada actividad (subsulado, paso del vibrocultivador, fertilizado, siembra y cosecha. Los valores son:

Subsolado: 8,12 h.ha⁻¹

Vibrocultivador: 0,22 h.ha⁻¹

Fertilización: 0,13 h.ha⁻¹

Sembrado: 1,01 h.ha⁻¹

Laboreo secundario: 0,29 h.ha⁻¹

Cosechado: 1,79 h.ha⁻¹

Rotoempacado: 0,67 h.ha⁻¹

Remolque: 0,48 h.ha⁻¹

Para la energía total producida en la cadena energética se tuvo en cuenta:

- Rendimiento del cultivo por hectárea
- Contenido energético del cardo

Se utilizó la ecuación de balance energético siguiente (Manzanares, 1997):

$$\text{Balance energético} = (E_p/E_c) \quad (2.1)$$

Dónde:

E_p = Energía total producida en la cadena energética

E_c = Energía total consumida en la cadena energética

Si el valor obtenido es > 1 , el sistema empleado genera energía y puede ser usado para ese propósito.

Para el cálculo posterior de las emisiones de CO₂ en las tareas agrícolas se tomaron en cuenta los parámetros que se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4

Parámetros y valores para el cálculo de emisiones de CO₂ en labores agrícolas

Parámetros	Valores	Fuente
Factor de emisión de CO ₂	2,64 kg.CO ₂ .L ⁻¹	Red Argentina de energía eléctrica
Consumo de lubricante en tareas agrícolas	0,17 L.ha ⁻¹	Capote, Fernandez Sanchez, Shkiliova, 2012
Densidad del lubricante mineral	0,86 kg.L ⁻¹	Ficha de datos de seguridad YPF (Extravida XV 500)
Emisión de CO ₂ del lubricante	0,985 kgCO ₂ .kg ⁻¹	Sanchez Avendaño, 2019

Para obtener la emisión de CO₂ en el proceso del cultivo, se tuvo en cuenta los valores de la tabla anterior y de la aplicación del fertilizante. Además se utilizó para el cálculo el factor de emisión de CO₂.L⁻¹ de combustible y el factor de emisión de CO₂.kWh⁻¹.

2.4 Obtención de energía eléctrica a partir del cardo común

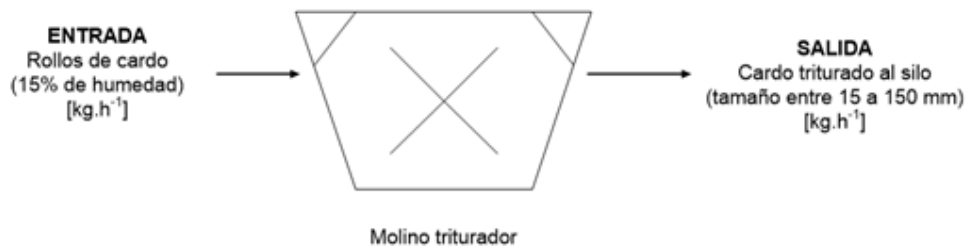
Dado que el presente trabajo no posee un desarrollo experimental, para el proceso termoquímico de gasificación se estableció un cálculo teórico como caudal másico de entrada de biomasa 1 kg.h⁻¹ para corregir los resultados obtenidos en base a los parámetros y características de los principales equipos que forman parte del proceso y en base a la producción de cardo seco obtenido de la superficie de cultivo.

2.4.1. Pretratamiento de la biomasa para la gasificación

Los rollos almacenados en el depósito en estado seco (15%), libre de materiales como piedras, cascotes o tierra poseen una anchura de 120 cm y un diámetro entre 120 y 180 cm, con un peso entre 170 y 250 kg. Para la trituración de la biomasa se utilizó un molino triturador circular con un tamaño de salida biomasa entre 15 y 150 mm, ajustable de acuerdo al requerimiento del gasificador. El circuito de la molienda es del tipo cerrado para no perder material en el proceso. El valor energético de la biomasa (cardo) disminuye en un 1% (Junta de Andalucía, 2009). El cardo reducido de tamaño es almacenado en un silo que alienta luego al gasificador a través de una cinta transportadora. El esquema de la operación se muestra en la Figura 10.

Figura 10

Esquema de la trituración del cardo

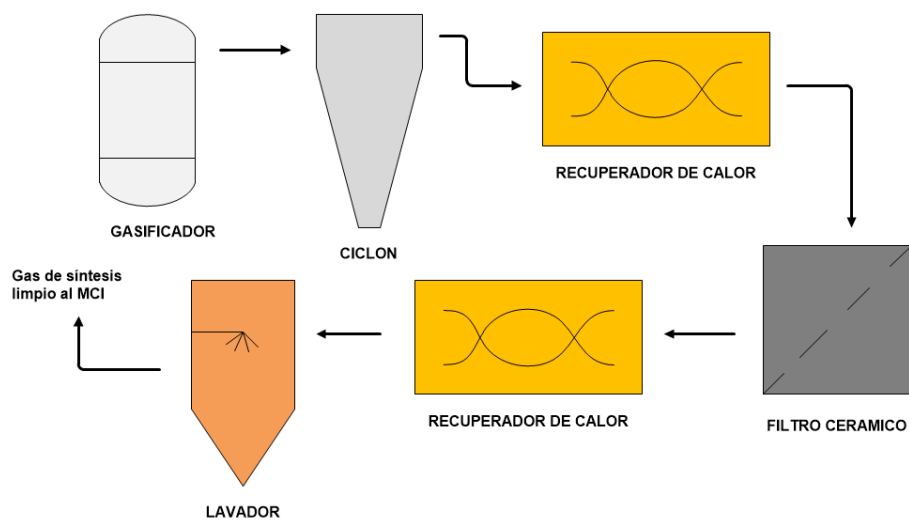


2.4.2 Balances teóricos de masa y energía en el proceso de generación de energía eléctrica

Los balances de masa y energía se establecieron en el gasificador, en los recuperadores de calor para disminuir la temperatura del gas de síntesis (syngas). Para el resto de las operaciones se previeron balances de masa. El esquema de las operaciones llevadas a cabo en el proceso de generación de energía eléctrica se muestra en la Figura 11.

Figura 11

Esquema de operaciones para la generación de energía eléctrica



La ecuación general que rige los balances de masa es:

$$m_s = m_e - \eta \quad (2.2)$$

Dónde:

m_s = Caudal másico a la salida [$\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$]

m_e = Caudal másico a la entrada [$\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$]

η = Eficiencia de retención del equipo o del sistema

Para el balance de masa y energía, la ecuación general utilizada es:

$$Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (2.3)$$

Dónde:

Q = Energía calórica [$\text{kCal}\cdot\text{h}^{-1}$; $\text{kJ}\cdot\text{h}^{-1}$]

m = Caudal másico [$\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$]

C_p = Calor específico de los fluidos [$\text{Kcal}\cdot\text{kg}^{-1}$; $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$]

ΔT = Diferencia de temperatura entre la salida y la entrada al equipo [$^{\circ}\text{C}$]

Para el balance de masa y energía en el gasificador, se consideraron los siguientes supuestos:

- Valen las leyes de los gases ideales,
- Todas las reacciones están en equilibrio termodinámico,
- Los gases están en equilibrio durante el flujo a través del lecho,
- La cámara del lecho está a presión atmosférica y constante,
- El nitrógeno presente es inerte,
- La ceniza es inerte y no se involucra en ninguna de las reacciones, ya sea como especies químicas o como catalizador,
- El gas de síntesis no se acumula en el lecho,
- El gas de síntesis producido está constituido solo de CO_2 , CO , H_2 , N_2 y CH_4 .
- El agente gasificante es aire húmedo,
- El tiempo de residencia de los reactantes en el gasificador es lo suficientemente largo para alcanzar el equilibrio.

Elección del gasificador y balance teórico: Para la elección del tipo de gasificador se consultó la bibliografía disponible. Warnecke (2000) establece algunas ventajas de los gasificadores de lecho fijo respecto de los de lecho fluidizado que tienen que ver con:

- Gran tamaño de partículas en la alimentación del gasificador (hasta 100 mm)
- Gas prácticamente libre de alquitrán
- Tasa de conversión de carbono alta (90 – 99%)

Por otra parte menciona que la temperatura alta de trabajo de un gasificador de lecho fijo permite la instalación de un tren de limpieza menos complejo. El bajo contenido de alquitrán (Tar) también lo muestra la Tabla 5 aportada por Dufour (2016) en la cual se observa un porcentaje comparativamente menor de Tar respecto de los otros tipos de reactores.

Tabla 5

Composición del gas producido para diferentes tecnologías de gasificación

	Unit	Downdraft Fixed bed	Updraft Fixed bed	fluidized bed	Dual fluidized bed (FICFB)	Entrained Bed (Future Energy)
Water content in biomass	% dry biom.	6-25	10-50	13-20	n.d. (~ 20)	Pretreated biomass
Particles	g/Nm ³	0.1-8	0.1-3	8-100	5-10	~ 0 (vitrification)
Tar	g/Nm ³	0.01-6	10-150	2-30	1.5-4.5	n.d. (~ 0)
LHV	kWh/Nm ³	1.1-1.6	1-1.9	1-1.6	3.6	2.6
H ₂	% vol.	15-21	10-18	15-22	35-45	27
CO	% vol.	10-22	15-25	13-15	20-30	50
CO ₂	% vol.	11-13	8-10	13-15	15-25	14
CH ₄	% vol.	1-5	2-5.5	2-4	8-12	< 0.1
C _n H _m	% vol.	0.5-2	n.d.	0.1-1.2	n.d.	n.d. (~ 0)
N ₂	% vol.	difference ~ 50	difference ~ 50	difference ~ 50	3-5	6

Nota: Tabla 5, composición del gas producido para diferentes tecnologías de gasificación. Tomado de *Dufour, (2016).* (p. 43).

Basu, (2010) muestra una tabla (Tabla 6) con niveles de alquitrán para gasificación de biomasa para distintos gasificadores.

Tabla 6

Niveles típicos de alquitrán en los gasificadores de biomasa por tipo

TABLE 4.2 Typical Levels of Tar in Biomass Gasifier by Type

Gasifier Type	Average Tar Concentration in Product Gas (g/Nm ³)	Tar as % of Biomass Feed
Downdraft	<1.0	<2.0
Fluidized bed	10	1-5
Updraft	50	10-20
Entrained flow	negligible	

Source: Data compiled from Milne and Evans, 1998, p. 15.

Nota: Tabla 6, niveles típicos de Tar en los gasificadores de biomasa por tipo. Tomado de *Basu (2010)*. (p. 100).

Quaak, (1999) muestra algunas ventajas relacionadas sobre el contenido de cenizas y Tar, el tiempo de encendido y el mantenimiento, etc. respecto del gasificador tipo downdraft sobre el gasificador de lecho fluidizado (Tabla 7).

Tabla 7

Características típicas de los gasificadores de lecho fijo y lecho fluidizado

<i>Characteristic</i>	<i>Fixed-bed downdraft</i>	<i>Fluidized-bed</i>
Fuel: size (mm)	10 - 100	020
ash content (% wt)	<6	<25
Operating temperature (°C)	800 -1,400	750-950
Control	simple	average
Trundown ratio	4	3
Construction material	mild + refractory	heat-resistant steel
Capacity (MWth)	<2.5	150
Startup time	minutes	hours
Attendance	low	average
Tar content (g/Nm ³)	<3	<5
LHV (MJ/NM ³)	4.5	5.1

Nota: La Tabla 7 muestra las características típicas de los gasificadores de lecho fijo y lecho fluidizado. Tomado de *Quaak, (1999)*. (p 33).

Brown, (2011) muestra el contenido de Tar por tipo de gasificador como se indica en la Tabla 8.

Tabla 8

Contenido aproximado de alquitrán esperable para 3 tipos comunes de gasificadores

Reactor type	Ref.	Tar content (mg/Nm ³)
Updraft	[27]	50 000
Indirect	[27]	48 000–83 000
BFB and CFB	[27]	10 000
Downdraft	[28]	1 000

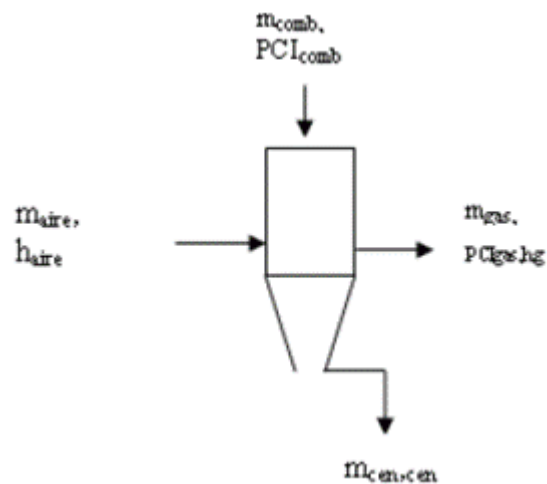
Nota: Tabla 8, contenido aproximado de alquitrán esperable para 3 tipos comunes de gasificadores. Tomado de *Brown, (2011)*. (p. 58).

Finalmente se tuvo en cuenta la compatibilidad del gasificador elegido con el buen funcionamiento del motor de combustión interna (MCI).

La Figura 12 muestra el esquema del balance de masa y energía en el gasificador.

Figura 12

Esquema del balance de masa y energía en el gasificador



Nota: Figura 12, esquema del balance de masa y energía en el gasificador. Tomado de *Lesme Jaén et al. (2008)*. (p. 72).

La relación de equilibrio (ER) entre el oxígeno estequiométrico y el oxígeno real está entre 0,2 y 0,4 (Basu, 2013). Se adoptó el valor de 0,33 (Lesme Jaén, et al., 2008). Siguiendo su estudio, el balance de masa se planteó con la siguiente ecuación:

$$m_{combustible} + m_{aire} = m_{gas} + m_{cenizas} \quad (2.4)$$

$$m_{\text{comb.}} \cdot \text{PCI}_{\text{comb.}} + m_{\text{aire}} \cdot H_{\text{aire}} = m_{\text{gas}} \cdot \text{PCI}_{\text{gas}} + m_{\text{gas}} \cdot H_{\text{gas}} + Q_{\text{cen.}} + Q_{\text{amb.}} \quad (2.5)$$

Dónde:

$m_{\text{combustible}}$ = Flujo másico del combustible (cardo) [$\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$]

m_{aire} = Flujo másico del aire [$\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$]

m_{gas} = Flujo másico del gas de síntesis [$\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$]

m_{ceniza} = Flujo másico de las cenizas [$\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$]

m_{comb} = Flujo másico de biomasa (cardo) [$\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$]

PCI_{comb} = Poder calorífico inferior del cardo [$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$]

m_{aire} = Flujo másico del aire [$\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$]

H_{aire} = Entalpía del aire = $300 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ (Lesme et al., 2008)

H_{gas} = Entalpía específica del gas de síntesis [$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$]

PCI_{gas} = Poder calorífico inferior del syngas [$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$]

C_{cen} = Calor específico de las cenizas = $0,96 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ (Lesme et al., 2008)

m_{cen} = Flujo másico de cenizas [$\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$]

$Q_{\text{cen.}}$ = Calor perdido con las cenizas (kW)

$Q_{\text{amb.}}$ = Calor perdido al exterior (kW)

Se consideró la temperatura de reacción de $1.000 \text{ }^\circ\text{C}$ (Cuba Arroyo, 2011) y la composición de la biomasa al ingreso al gasificador se muestra en la Tabla 9.

Tabla 9

Composición química porcentual del cardo al ingreso del gasificador y su poder calorífico inferior

Biomasa	C [%]	H [%]	O [%]	N [%]	S [%]	Ash [%]	PCI [MJ.kg-1]	Hm [%]
Cardo	43,7	6,0	48,25	1,8	0,05*	6,9	15,9**	15

*Grammelis, (2008). **Cravero, (2012)

Nota: Tabla 9, composición química porcentual del cardo al ingreso del gasificador y su poder calorífico. Tomado de *Gominho et al. (2018)*. (p. 264).

Para determinar el rendimiento del gasificador en frío se consideró la ecuación de Peña Bejaranda, (2013).

$$\eta_m = (H_g \cdot Q_g) / (H_s \cdot M_s) \cdot 100 \quad (2.6)$$

Dónde:

η_m = Rendimiento del gasificador en frío

H_g = PCI_{gas} = Poder calorífico de syngas [kJ.m⁻³]

Q_g = Flujo de gas de síntesis [m³]

H_s = PCI (Biomasa) = Poder calorífico del cardo (restando el 1% por la trituración – Junta de Andalucía. 2009) [kJ.kg⁻¹]

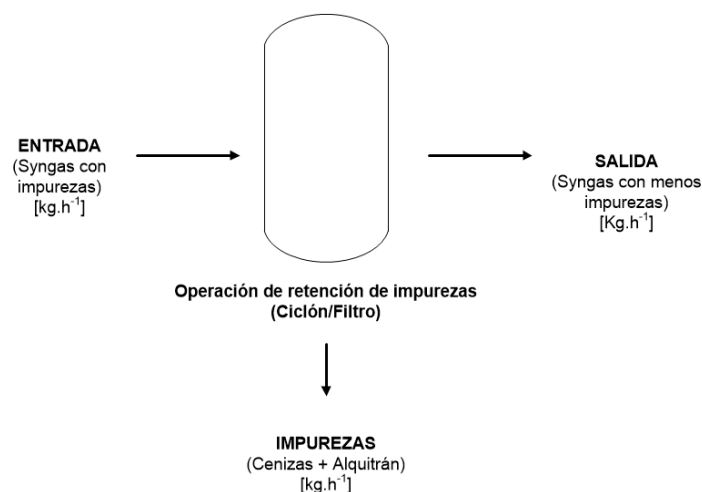
M_s = Flujo de biomasa (cardo) [kg]

Para los balances de masa en las operaciones de retención o separación de impurezas planteados con el tren de limpieza del syngas se tuvo el siguiente esquema (Figura 13).

Balance teórico en el ciclón y en el filtro: para el balance se utilizó la ecuación (2.2).

Figura 13

Esquema de retención de impurezas en el tren de limpieza del syngas



En el ciclón la caída de presión es muy poca, por lo tanto, prácticamente no hay pérdida de calor. El residuo es un material particulado que se denomina comúnmente ceniza, más el alquitrán (Tar). Se trabaja en un rango de temperatura de operación entre 100 y 900°C (Prabhansu et al., 2015). El ciclón

utilizado es el de alta capacidad (García Herrero, 2012) que posee un rendimiento (η) según la Tabla 10.

Tabla 10

Intervalo de eficiencia de remoción para las diferentes familias de ciclones

Familia de ciclones	Eficiencia de remoción (%)		
	PST	PM10	PM2.5
Convencionales	70 - 90	30 - 90	0 - 40
Alta eficiencia	80 - 99	60 - 95	20 - 70
Alta capacidad	80 - 99	10 - 40	0 - 10

Nota: La Tabla 10 muestra el intervalo de eficiencia de remoción para las diferentes familias de ciclones. Tomado de *Echeverri Londoño, (2006)*. (p. 125).

Para el caso de la operación de retención en el filtro se optó por un filtro de tela cuya temperatura de trabajo esté dentro del orden de la temperatura del syngas a la salida del recuperador de calor. Se tuvo en cuenta que la temperatura del syngas no debe ser menor a 350 °C, para no provocar la condensación de los compuestos de alquitrán. La Tabla 11 muestra las propiedades de resistencia de varios tejidos y las temperaturas de trabajo.

Tabla 11

Propiedades de resistencia en materiales de tejido de filtros de mangas

PROPIEDADES DE RESISTENCIA EN MATERIALES DE TEJIDO

TEJIDO	TEMPERATURA °F	RESISTENCIA ACIDA	RESISTENCIA ALCALINA	ABRASIÓN FLEXIBLE
Algodón	180	Pobre	Muy bueno	Muy bueno
Dacrón (polyester)	275	Buena con minerales ácidos	Bueno; regular en alcalinidad fuerte	Muy bueno
Fiberglas	500	Mas o menos a bueno	Regular a bueno	Regular
Nextel	1400	Muy bueno	Bueno	Bueno
Nomex	375	Regular	Excelente a baja temp.	Excelente
Nylon	200	Regular	excelente	Excelente
Orlon	260	Buena a excelente	Regular a bueno en baja alcalinidad	Buena
P84*	475	Buena	Buena	Buena
Polipropileno	200	Excelente	Excelente	Excelente
Ryton	375	Excelente	Excelente	Buena
Teflon	450	Inerte excepto para fluor	Inerte excepto para trifluoruro, cloruro y metales alcalinos	Regular
Lana	200	Muy bueno	Pobre	Regular a bueno

Nota: Tabla 11, propiedades de resistencia en materiales de tejido de filtros de mangas. Tomado de *Donoso Baquerizo, (2010)*. (p. 255).

La eficiencia de este tipo de colectores está en el orden de 99 – 99,9% (Peralta Castillo, 2001). Adoptando el valor de eficiencia menor y de acuerdo a la ecuación (2.2), el balance teórico de masa queda:

$$\dot{m}_{gas} + \dot{m}_{cenizas} + \dot{m}_{Tar} = \dot{m}_{gas} + 0,01(\dot{m}_{cenizas} + \dot{m}_{Tar}) - 0,99(\dot{m}_{cenizas} + \dot{m}_{Tar})$$

Dónde:

\dot{m}_{gas} = Flujo másico de syngas [kg.h⁻¹]

$\dot{m}_{cenizas}$ = Flujo másico de cenizas [kg.h⁻¹]

\dot{m}_{Tar} = Flujo másico de alquitrán [kg.h⁻¹]

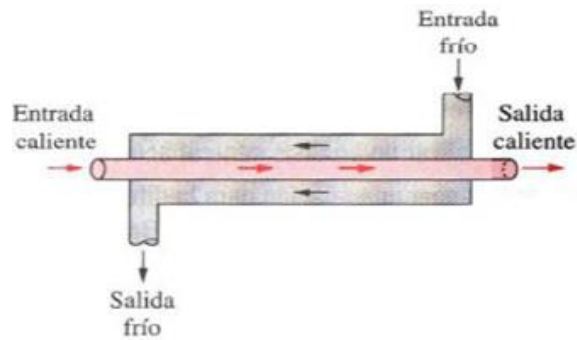
Se consideró que la separación sólido/gas no posee pérdidas de materia; que existe una diferencia de presión entre la entrada y la salida del filtro y que la separación de las partículas es directa por cuanto abarca un tamaño de partícula desde 0,01 micrones hasta 100 micrones (Sanchez, 2016).

Balances teóricos en los recuperadores de calor: Para el balance de masa y energía en los recuperadores de calor, se tomó en consideración el esquema de la Figura 14 y la ecuación (2.3). El intercambiador de calor establecido es

gas/gas; en este caso syngas/aire, para evitar el uso de agua dado que es un bien cada vez más crítico.

Figura 14

Esquema de funcionamiento de un intercambiador de carcasa y tubo a contraflujo



Nota: Figura 14, esquema de funcionamiento de un intercambiador de carcasa y tubo a contraflujo. Tomado de *Cengel, (2011)*. (p. 644).

Dónde:

Entrada caliente (syngas) = T_{C1}

Salida caliente (syngas) = T_{C2}

T_m = Temperatura media = $(T_{C1} + T_{C2})/2$

$\hat{C}_{PSyngas}$ = Calor específico del syngas a T_m

Entrada fría (aire) = T_{F1}

Salida fría (aire) = T_{F2}

T_{mAire} = $(T_{F1} + T_{F2})/2$

\hat{C}_{PAire} = Calor específico del aire a T_{mAire}

Entonces, el balance queda: $Q = Q_C = Q_F$

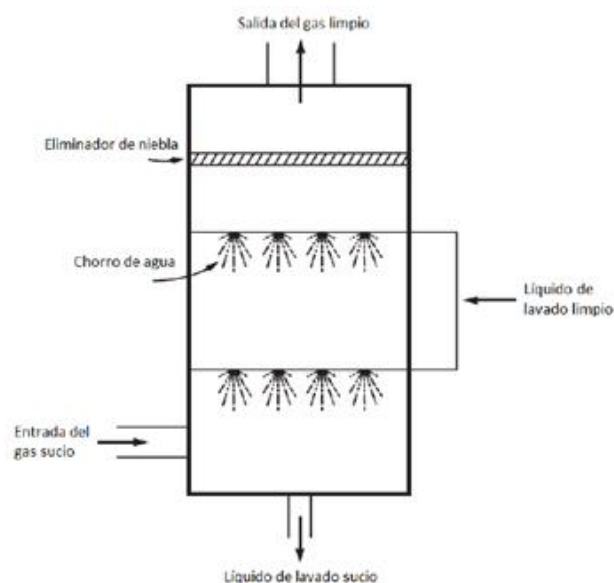
$$Q_C = \dot{m}_{syngas} \cdot C_{PSyngas} \cdot \Delta T \text{ y } Q_F = \dot{m}_{aire} \cdot C_{paire} \cdot (T_{F2} - T_{F1})$$

Despejando, se obtiene \dot{m}_{aire} [$\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$], mientras que Q_C [$\text{kJ} \cdot \text{h}^{-1}$] representa el calor cedido al medio ambiente bajo el supuesto que no hay pérdidas de calor en el recuperador.

Balance teórico en el lavador de gases: En un lavador de gases para la separación de partículas nocivas juegan muchos factores. Los principales mecanismos de captura que intervienen son la impactación, la interceptación y la difusión. También interviene otro fenómeno que es la adsorción por la cual las partículas de agua se adhieren a las partículas de alquitrán y contaminantes, agrandan su superficie y por ende, caen por peso a la parte inferior del lavador. Existen otros factores que se relacionan con la velocidad, densidad y viscosidad del gas y con la configuración del equipo lavador. Por lo tanto el cálculo teórico y en cada caso, excede el marco del presente trabajo. El gas a la salida de la zona de captura de los contaminantes, se encuentra saturado de humedad. Según Martínez Capón (2006), el gas contiene $36 \text{ gH}_2\text{O.kg}_{\text{gas}}^{-1}$. El porcentaje de humedad no debe ser superior al 34% (Suarez Porras, 2017). Esto puede afectar el funcionamiento del MCI, un porcentaje de humedad razonable puede disminuir la cantidad de NOx en los gases de escape. Para esto, el equipo lavador tiene incorporada una cámara de niebla que tiene una eficiencia de retención entre el 90 y 99% (Toledo Melchor, 2011). Según el valor que se considere se tendrá en los gases de escape, mayor porcentaje de NOx o bien de CO. Esto deberá resolverse con un filtro adecuado a la salida de la chimenea del MCI. La Figura 15 muestra el esquema de un lavador de gases.

Figura 15

Esquema de un lavador de gases



Nota: La Figura 15 muestra el esquema de un lavador de gases. Tomado de Toledo Melchor, (2011). (p. 6).

El gas húmedo no posee inconvenientes con el ingreso al motor de combustión interna (MCI). El syngas en el ingreso al MCI debe cumplir con las especificaciones de la Tabla 12.

Tabla 12

Especificaciones para el syngas al ingreso de un MCI

Parámetro	Unidades	Motor CI	Turbina a gas
Material Particulado	mg/Nm ³	<50	<30
Tamaño de partícula	µm	<10	<5
Alquitranes	mg/Nm ³	<100	No determinado

Nota: La Tabla 12 muestra las especificaciones para el syngas al ingreso de un MCI. Tomado de *Álvarez, M. Valencia Naranjo, L. (2015). (p. 43).*

Para el tamaño de partícula de alquitrán se tomó 37 micrones (Suarez Porras, 2017), mientras que para las cenizas volantes se tomó un valor promedio de 13,41 micrones (Peña Rodríguez et al., 2014). Con estos valores la eficiencia de un equipo lavador está entre 99 y 99,9% (Nicolau, 2016).

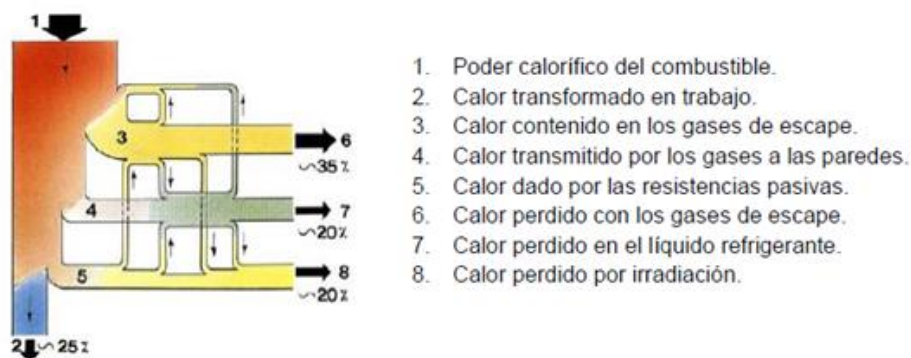
La relación L/G (relación agua – gas) es de $0,26 < L/G < 2,6$ litros.m⁻³ para remoción de partículas y $5,5 < L/G < 11$ litros.m⁻³ absorción de gases y remoción de partículas (Abelleyro et al., 2019). El agua de lavado debe ser pura. El líquido residual (líquido negro) debe ser tratado convenientemente, mientras se debe reponer el 22% del agua de lavado.

2.4.3 Balance en el motor de combustión interna (MCI)

Para realizar el balance en el MCI, se partió del esquema planteado por Llanes-Cedeño, (2018) que se muestra en la Figura 16. La temperatura de ingreso al motor se fijó en 40°C (Suarez Porras, 2017).

Figura 16

Flujos de calor en el MCI



Según la Figura 16, se adoptó como flujo de calor transformado en trabajo (salida 2) el 25%. Este porcentaje representa la eficiencia de una planta de biomasa para generar energía eléctrica (Morales-Villamil, 2018), mientras que para conocer el balance estequiométrico de la relación syngas/aire, se siguió el lineamiento de Naranjo Anaya y Gamarra Quintero, (2017).

2.4.4 Ajuste del proceso de generación de energía eléctrica

Para el ajuste se tomó en cuenta los parámetros de los equipos contemplados en el proceso, los del gasificador y del MCI que determinan el caudal de syngas obtenido en el primero y la cantidad de energía eléctrica en el segundo. Se muestra los resultados mediante diagramas de Sankey.

2.5 Análisis del impacto ambiental del proceso completo

2.5.1 Estimación de la emisión de CO₂ en el proceso completo

Para el cálculo de las emisiones de CO₂ en el proceso completo se determinaron varias etapas.

- Emisión de CO₂ en el proceso de cultivo hasta el transporte del cardo seco en rollos al depósito de biomasa. La emisión de CO₂ surge básicamente de las tareas agrícolas involucradas en el proceso. La emisión de CO₂ por hectárea provocada por la utilización de la urea como fertilizante es más compleja de obtener. Se parte de la emisión de óxido nitroso (N₂O). La emisión de N₂O en la Argentina para actividades agroproductivas es de 2 a 3 kg N₂O.ha⁻¹.año⁻¹ (Taboada, 2011). Con el valor establecido para un día de fertilización y con la ayuda de la calculadora de emisión de CO₂ equivalente de la Agencia de

Protección Ambiental (EPA) de EE.UU, se obtuvo la cantidad de CO₂ emitido por la fertilización por cada hectárea de cultivo. Adicionalmente, existe la posibilidad de la acumulación de carbono del terreno de cultivo y la asimilación de CO₂ atmosférico debido a la fotosíntesis de la planta de cardo. Esto debería restarse de la emisión de CO₂ con datos precisos.

- Emisión de CO₂ en el proceso industrial de generación de energía. Aquí se tuvo en cuenta la generación de energía medida en kWh y el factor de emisión de CO₂ establecido para la Argentina. El valor hallado se puede comparar con otros valores de otras usinas generadoras de energía utilizando otro tipo de combustible. Luego, se tomó en cuenta el hecho del escaso uso del agua en el proceso, ya que la misma es utilizada solo en el lavador de gases. Esto representa un ahorro en CO₂ emitido a la hora de contabilizar el tratamiento sobre el agua necesaria en otros procesos de generación de energía que utilizan otros equipos como calderas y turbinas.
- Emisión de CO₂ generado en el funcionamiento del MCI. Dado que este cálculo depende de muchos factores como la calidad del syngas, humedad, temperatura y presión de entrada, su relación en la mezcla de combustible/aire en el ingreso al motor, y sobre todo de las características del motor utilizado, etc., entonces se planteó el cálculo estrictamente estequiométrico combustible/aire bajo la condición de combustión completa en el MCI. El resultado teórico luego se pudo comparar con otros combustibles como el gasoil o el gas natural (GN) en un MCI. La ecuación base para el cálculo estequimétrico es:

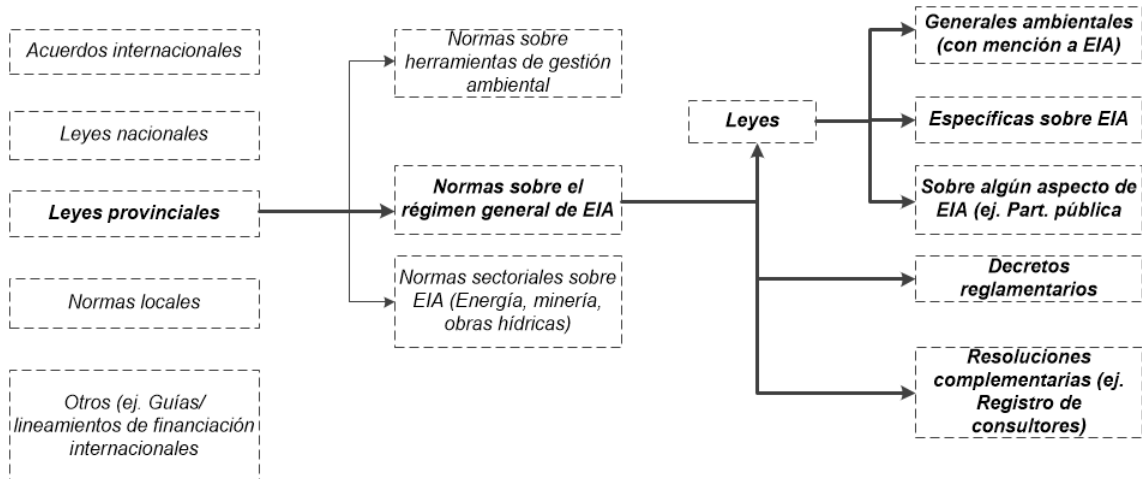


2.5.2 Análisis del Impacto Ambiental

En Argentina rige la Ley General del Ambiente N° 25.675, sin embargo el procedimiento general vigente lo establece cada jurisdicción o provincia. La Figura 17 muestra el esquema del procedimiento de evaluación del impacto ambiental (EIA) general según Mereb, (2020).

Figura 17

Esquema del procedimiento general de EIA



Establecida la ubicación geográfica del emprendimiento se pudo aplicar la legislación provincial correspondiente para determinación su categorización.

- Categoría 1: de bajo o nulo impacto ambiental
- Categoría 2: de mediano impacto ambiental
- Categoría 3: de alto impacto ambiental

Con la categoría se determinaron las áreas de influencia directa (AID) e indirecta (AII). Además, se definieron 4 instancias del proceso total: Planificación, instalación, operación y mantenimiento (O&M) y cierre y abandono.

Para realizar el estudio de impacto ambiental se tuvo en cuenta los siguientes ítems.

- Vida útil del emprendimiento,
- Ciclo de cultivo
- Tiempo de producción de energía eléctrica
- Composición del emprendimiento
- Afectaciones (Medio biótico, abiótico y antrópico)
- Determinación de la línea base ambiental

Para confeccionar la línea de base ambiental, se tomó en cuenta:

- Medio biótico (Flora y fauna)
- Medio abiótico (Aguas superficiales, subterráneas, etc, suelo, aire, nivel sonoro, paisaje)
- Medio antrópico (Economía y población, actividades y turismo, generación de empleo, salud, confort). Medio perceptual; naturalidad

Habiendo obtenido la línea de base ambiental, se confeccionó la lista de chequeo para determinar los impactos positivos y negativos del emprendimiento. Luego se armó la matriz de evaluación de impactos ambientales a partir de la matriz de Leopold modificada (Tito, B. 2020). En esta matriz se consideraron tres criterios: extensión, duración y reversibilidad. Cada uno de estos criterios posee subcriterios que se muestran en la Tabla 13.

Tabla 13

Criterios, subcriterios y significados de la Matriz de Impacto Ambiental

Criterios	Subcriterios	Significado
Extensión	Puntual	En el sitio de operación
	Particular	Dentro del área de influencia (AI)
	Local	El AI no rebasa los límites del área de operación
	Generalizada	Se extiende dentro del AI indirecta de la operación
	Regional	El impacto ocurrido se extiende fuera del AI
Duración	Esporádica	Se presenta muy intermitentemente
	Temporal	Se presenta en forma intermitente o continuada solo mientras dura la actividad
	Periódica	Se presenta en forma continuada
	Recurrente	Se presenta en forma continuada más allá de la duración de la actividad
	Permanente	Se presenta en todo tiempo
Reversibilidad	Completamente reversible	Aquél en que la alteración puede ser asimilada por el entorno
	Medianamente reversible	Aquél en que la alteración puede ser asimilada por el entorno, medible a corto, mediano o largo plazo
	Parcialmente irreversible	Aquél en que la alteración del medio o pérdida es posible de reparar tanto por la acción natural como por la humana
	Medianamente irreversible	Aquél en que la alteración del medio o pérdida es imposible de reparar en su totalidad tanto por la acción natural como por la humana
	Completamente irreversible	Aquél en que la alteración del medio o pérdida es imposible de reparar tanto por la acción natural como humana

Nota: Tabla 13, criterios, subcriterios y significados de la Matriz de Impacto Ambiental. Tomado de Tito, B. (2020).

Los criterios de puntuación adoptados de acuerdo a los criterios de la Tabla 13, se muestran en la Tabla 14.

Tabla 14

Criterios de puntuación para la Matriz de Impacto Ambiental

Puntuación de acuerdo a la magnitud de la característica					
Característica de Importancia del Impacto Ambiental	1,0	2,5	5,0	7,5	10,0
Extensión	Puntual	Particular	Local	Generalizada	Regional
Duración	Esporádica	Temporal	Periódica	Recurrente	Permanente
Reversibilidad	Completo reversible	Med. reversible	Parcial reversible	Med. irreversible	Completo irreversible

Para realizar el cálculo del impacto ambiental se utilizó la fórmula siguiente:

$$\text{Imp} = \text{We.E} + \text{Wd.D} + \text{Wr.R} \quad (2.8)$$

Dónde:

Imp = Valor calculado de la Importancia del impacto ambiental

E = Valor del criterio de Extensión

We = Peso del criterio de Extensión

D = Valor del criterio de Duración

Wd = Peso del criterio de Duración

R = Valor del criterio de Reversibilidad

Wr = Peso del criterio de Reversibilidad

Para el presente trabajo se adoptaron los valores:

Peso del criterio de Duración = Wd = 0.40

Peso del criterio de Extensión = We = 0.35

Peso del criterio de Reversibilidad = Wr = 0.25

La valoración de los impactos que resultan del análisis correspondiente son los siguientes:

Impacto bajo: 1 – 30

Impacto medio: 31 – 61

Impacto severo: 61 – 92

Impacto crítico: > 93

Las etapas que se consideraron para confeccionar la matriz de impacto ambiental son: Planificación, instalación, Operación y Mantenimiento (O&M) y cierre y abandono.

Dependiendo de los requisitos del marco legal de la provincia elegida, se debe presentar un estudio de impacto ambiental para obtener un certificado de aptitud ambiental para poder desarrollar el proyecto.

2.6 Análisis de la factibilidad económica del proceso

Para el análisis los supuestos considerados son:

- Arrendamiento del predio elegido para el cultivo del cardo
- Adquisición de los insumos necesarios para el proceso del cultivo (semillas y fertilizante)
- Alquiler o contratación de las tareas agrícolas desde la preparación del terreno, siembra, cosecha, empacado, traslado al depósito de biomasa y actividades posteriores como resembrado y fertilización (ambas actividades en menor escala que las primeras)
- Actividades agrícolas: preparación del terreno, fertilización, siembra, cosecha y enfardado. Luego el traslado hasta el depósito de los rollos
- Planificación y ejecución de actividades de obra civil e instalación de la nave industrial con el equipamiento necesario para gasificar la biomasa y generar principalmente energía eléctrica
- Actividades fabriles como trituración de los rollos y depósito en silo, gasificación, tren de limpieza del syngas obtenido y generación de energía eléctrica, gestión de los residuos generados.

La planta de tratamiento de la biomasa y la gasificación para obtener energía eléctrica se encuentra ubicada contigua a la superficie de cultivo. En forma secundaria se obtiene energía térmica, que puede ser utilizada para calentar agua para la limpieza y usos de tambos aledaños o bien generar vapor en turbinas para alimentar de energía la propia planta de producción. Las cenizas volantes pueden ser vendidas a la industria cementera o ser utilizadas para fertilización previo estudio en tal sentido.

El análisis establece dos escenarios: sin financiación y con financiación sobre la inversión inicial. A su vez cada uno contempla tres contextos posibles a partir del precio de venta de la potencia eléctrica, en base a los cuales se calcularon la Tasa Interna de Retorno (TIR) y del Valor Actual Neto (VAN). Los escenarios toman en cuenta el precio regional de venta del MWh, el precio

nacional y un valor promedio entre ambos respectivamente. Los precios considerados son: 128,2, 71,5 y 99,85 U\$D.MWh⁻¹ al mes de noviembre de 2023 (Segingeniería, 2023) para arribar a los resultados de TIR y VAN, los que muestran la viabilidad económica del mismo. Las fórmulas del VAN y de la TIR (Fajardo Vaca et al., 2019). La tasa de corte se tomó de un rango de 7,2 a 22% (Gnecco, 2008).

$$VAN = -I_0 + \sum_{i=1}^n FNE_i / (1 + t)^i \quad (2.8)$$

FNE = Flujo neto efectivo

VAN > 0 se acepta el proyecto

VAN < 0 no se acepta el proyecto

VAN = 0 queda a criterio del analista

$$VAN = -I_0 + \sum_{i=1}^n FNE_i / (1 + t)^i = 0 \quad (2.9)$$

TIR ≥ TMAR se acepta el proyecto (Tasa máxima aceptable de rendimiento)

TIR < TMAR no se acepta el proyecto

La inversión inicial contempló primero el arrendamiento del predio, y todas las actividades propias de cualquier cultivo. Como el cardo tiene un ciclo anual sembrándose en marzo de un año y cosechándose en la finalización de febrero del año siguiente, listo para ser henificado con un 15% de humedad, las inversiones en este caso se consideran hasta el sembrado el primer año y en el segundo en adelante el cosechado, henificación, resembrado y fertilización posterior. En segundo lugar, las inversiones están referidas a la compra de los equipos de la planta de biomasa, las obras civiles de la instalación de la nave industrial, los servicios asociados y la contratación del personal que opera la planta. En el caso del cultivo, se contratan las actividades correspondientes, en el caso del personal de planta, tiene una nómina restringida para el primer año y luego una nómina completa desde el segundo año en adelante. El precio del dólar fue tomado a valor de noviembre de 2023 (1 dólar = \$357,5 referencia del Banco Nación).

El ciclo total del cultivo se establece en 15 años y la operación de la planta de biomasa es de 8.000 horas.año⁻¹. La operación de la planta es en tres turnos. Para la operación indicada, la planta produce energía durante 11 meses y 2 días. El resto hasta completar el año está destinado al mantenimiento de equipos e instalaciones. A los efectos comerciales se establece un suministro de energía al o a los clientes durante 11 meses.año⁻¹.

Para el análisis de sensibilidad se tomó como variables el precio del consumo eléctrico y de la inversión para ver cómo varían tanto el VAN como la TIR.

3. Resultados y Discusión

3.1 Resultados

3.1.1 Ubicación del sitio de cultivo y de la planta de biomasa

Tomando la información contenida en el ítem 2.2 y aplicando la Matriz de Decisiones el resultado se muestra en la Tabla 15. Los criterios y pasos para confeccionar la matriz se volcaron en el Anexo A.

Tabla 15

Matriz de Decisiones sobre la ubicación de la zona de cultivo del cardo

Matriz de Análisis de Decisión		Fecha: 20-12-2023		Participantes:									
Decisión a adoptar----->		Seleccionar el sitio más adecuado para el cultivo de Cardo (<i>Cynara cardunculus</i> L. variedad <i>Altilis</i>) en Argentina.											
Responsable: Ing. Jorge Acevedo		Posibles Sitios de implantación->		Santa Fe		La pampa		Entre Ríos		Buenos Aires		Córdoba	
Item	Valoración de importancia (1-10)	Value	Total	Value	Total	Value	Total	Value	Total	Value	Total	Value	Total
Items mandatorios													
Valor de PH del suelo entre 6,7 y 8,3	10	9	90	9	90	9	90	9	90	9	90	9	90
Precipitaciones anuales mayores a 400 mm	9	8	72	0	0	9	81	8	72	0	0	8	72
Zona sin cultivos alimentarios.	9	7	63	4	36	7	63	7	63	6	54	6	54
Zona habilitada por legislación para generación distribuida	10	10	100	10	100	10	100	10	100	10	100	10	100
Disponibilidad de redes de media tensión para conexonado/cercanía de nodos	8	8	64	8	64	0	0	5	40	7	56	8	64
Presencia de Cooperativas eléctricas en cercanía.	7	7	49	6	42	8	56	7	49	8	56	7	49
Existencia de rutas/caminos de acceso en buen estado.	8	7	56	6	48	7	56	8	64	8	64	8	64
Puntaje subtotal			494		380		446		478		420		
Items deseables													
Zona de promoción industrial.	9	7	63	6	54	7	63	9	81	8	72	8	72
Zona de baja ocupación de mano de obra.	10	0	0	7	70	6	60	10	100	0	0	10	100
Zona de baja humedad ambiental.	10	10	100	0	0	0	0	0	0	10	100	10	100
Presencia de soporte técnico en cercanía	9	9	81	5	45	6	54	5	45	7	63	7	63
Puntaje subtotal			244		169		177		226		235		
Puntaje total			738		549		623		704		655		
Riesgos:													
Falta de mano de obra operativa adecuada													
Regimen de lluvias variable/cambiante o modificado.													
Justificación/elección de puntos mandatorios:													
El rango de pH de 6,7 a 8,3 es el de la zona de origen de secano del cardo													
El valor de precipitación de 400 mm corresponde a la isoyeta del borde de la región de secano argentina													
La zona sin cultivo alimentario significa zona en la cual no se cultivan los cereales tradicionales (maiz, trigo, soja, etc)													
La zona con legislación de generación de electricidad en forma distribuida es fundamental para el desarrollo del trabajo													
Disponibilidad de redes de media tensión para conexonado/cercanía de nodos es importante para distribuir la energía generada													
Presencia de Cooperativas eléctricas en cercanía es muy importante para la distribución de energía generada con menor infraestructura necesaria													
Existencia de rutas/caminos de acceso en buen estado es importante para la provisión de insumos y el trabajo de O&M													

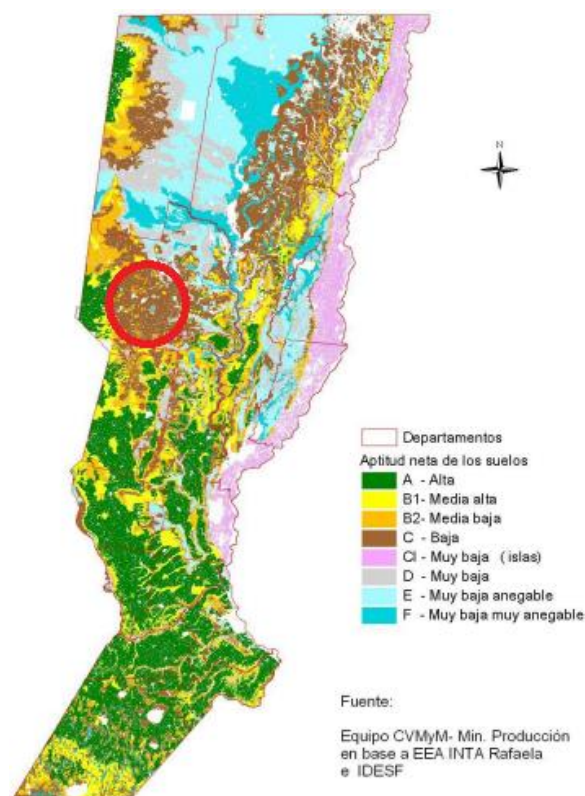
La ubicación de la zona de cultivo del cardo es en la provincia de Santa Fe. Tomando criterios similares:

- Sitio que no compita con la región cerealera de la provincia
- Que haya soporte técnico adecuado para O&M en la planta de generación de energía.
- Que haya localidad cercana para obtener insumos materiales para O&M
- Que haya cooperativas de suministro de energía eléctrica cercanas
- Que haya industrias o agroindustrias cercanas para poder suministrar productos secundarios como agua caliente para tambos, vapor para procesos industriales, o las cenizas que se pueden mezclar en razón de un 20-25% con asfalto (Reyes Ortiz et al., 2006) para reparar tramos de caminos y calzadas.

El radio de ubicación de la zona de cultivo se puede ver en la Figura 18.

Figura 18

Radio de ubicación de la zona de cultivo del cardo en la provincia de Santa Fe



Nota: La Figura 18 muestra la zona de cultivo del cardo sobre la base del mapa de Aptitud Agropecuaria Neta de los Suelos de Santa Fe. Tomado de Giunta et al. (2015). IDESF. <https://www.santafe.gov.ar/>

La Figura 18 muestra la zona del Departamento San Cristóbal (Santa Fe) en la cual existe actividad ganadera con tambos dispersos y cerca de dos cooperativas de suministro eléctrico (Hersilia en Santa Fe y Selva en Santiago del Estero). La ciudad de San Cristóbal cuenta con dos escuelas técnicas de nivel secundario; una de ellas con la modalidad agrotécnica. Lo mismo sucede en la ciudad de Ceres. Además en la ciudad de Rafaela existen dos universidades: UTN Rafaela y la UNRaf (Universidad Nacional de Rafaela). La ciudad de Ceres posee conexión eléctrica con la EPE (Empresa Provincial de la Energía), pero las localidades de Hersilia (Santa Fe) y Selva (Santiago del Estero) poseen cooperativas de distribución de energía eléctrica. Por lo tanto, el sitio elegido se muestra en la Figura 19.

Figura 19

Ubicación del sitio de cultivo del cardo en la provincia de Santa Fe y las cooperativas adyacentes



Nota: La Figura 19 muestra la ubicación del sitio de cultivo del cardo en la provincia de Santa Fe (-29.95640S, -61.995480W) y las cooperativas de servicios eléctricos adyacentes. Tomado de <https://www.google.com.ar/maps/> y FACE (Federación Argentina de Cooperativas de Electricidad y Otros Servicios Públicos)

Este punto de coordenadas está a unos 14 km, aproximadamente, de la ciudad de Hersilia que posee cooperativa de servicios de electricidad y a unos 21 km aproximadamente de la ciudad de Selva (Santiago del Estero) que también posee una cooperativa de servicios eléctricos. Los accesos vehiculares son la ruta nacional (RN) 34, que vincula al área seleccionada con la ciudad de Rosario y su puerto, pasando por las ciudades de Rafaela y Ceres. Otro acceso importante es la RP 39 que une la ciudad de Gdor. Crespo (ruta nacional RN11) con la ciudad

de San Cristóbal y cruza a la ruta 34 en la localidad de Arrufó, distante 30 km aproximadamente de la localidad de Hersilia. El sitio elegido para el cultivo posee además una conexión por camino rural con dicha localidad, accediendo a la planta de generación de energía que estará afuera del casco urbano en el punto noroeste de la localidad. Las distancias del sitio a las localidades más cercanas se muestran en la Tabla 16.

Tabla 16

Distancia de localidades más cercanas al sitio del proyecto

Localidad	Provincia	Distancia al sitio del proyecto
Ceres	Santa Fe	6,3
Colonia Alpina	Santiago del Estero	8
Hersilia	Santa Fe	14
La Isleta	Santiago del Estero	4,3
La Unión	Santiago del Estero	7,8
Monte Grande	Santiago del Estero	10
Selva	Santiago del Estero	21

El suelo posee un pH entre 5,4 y 8,4 con un promedio de 6,9 (Revelli et al., 2010), mientras que las características del suelo se muestran en la Tabla 17.

Tabla 17

Características del suelo de la zona del sitio del proyecto

Características	Descripción
Relieve	Subnormal
Micro relieve	Plano
Pendiente	< 0,2%
Escurecimiento	Lento
Permeabilidad	Moderada
Drenaje	Moderadamente bien drenado
Biota	Pastos bajos, predominantemente gramíneas
Cultivo	Crops (cultivos energéticos)
Profundidad de la capa de agua	6 – 10m
Limitación principal	Climática
Otras limitaciones	Degradación física y biológica por manejo de suelo no adecuado
Clima	Templado, subhúmedo
Clima edáfico	Térmico, údico

Nota: Tabla 17, características del suelo de la zona del sitio del proyecto. Tomado de Panigatti, (2010). (p. 235).

El nivel de temperaturas y precipitaciones de la zona a lo largo de 20 años tomados de la página de la NASA se muestra en la Tabla 18.

Tabla 18

Temperaturas medias, máximas y mínimas y precipitaciones anuales para el sitio elegido

año	Tmed (°C)	Tmax (°C)	Tmin (°C)	Precip (mm)
2001	19,99	39,99	-1,31	1175,98
2002	19,8	41,23	-0,26	1228,71
2003	19,74	42,5	-0,36	1033,59
2004	20,63	42,87	-0,81	611,72
2005	19,51	40,98	0,3	1033,59
2006	20,81	42,59	0	722,46
2007	18,86	40,96	-3,56	1017,77
2008	21,25	43,02	0,4	369,14
2009	20,89	43,91	-3,02	622,27
2010	19,43	39,57	-2,48	696,09
2011	19,48	43,93	-2,1	880,66
2012	20,59	43,66	-2,46	838,48
2013	20,33	44,23	-2,03	606,45
2014	20,08	41,56	-0,34	1297,27
2015	20,31	36,2	0,02	1028,32
2016	19,19	42,49	0,08	1017,77
2017	20,6	43,89	-1,65	885,96
2018	20,89	41,69	-0,51	769,92
2019	19,7	40,87	-0,11	1070,51
2020	20,55	42,38	-0,02	643,36
2021	20,25	42,9	-1,19	767,51
Promedio	20,14	42,97	-1,02	872,26

3.1.2 Rendimiento y balance energético del proceso de cultivo del cardo común

Se partió de los datos de la Tabla 2 y adoptando un 30% de material seco en la cosecha (Cravero, 2012), se obtuvo un rendimiento de 8.985,15 kg.ha⁻¹ con un PCI de 3.795 kCal.Kg⁻¹ (15,9 MJ.kg⁻¹). Tomando en cuenta las pérdidas en la recolección y en el traslado de los rollos al depósito de biomasa, los resultados se muestran en la Tabla 19.

Tabla 19

Rendimiento de biomasa (cardo común) en campo

Rendimiento de biomasa desde la cosecha hasta el depósito			
Rendimiento de biomasa seca [kg.ha ⁻¹]	Pérdida (10%) de biomasa en la recolección [kg.ha ⁻¹]	Pérdida de biomasa (0,1%) en el traslado [kg.ha ⁻¹]	Total de biomasa seca en depósito [kg.ha ⁻¹]
8,985,15	898,515	8,98515	8.077,65

A los efectos de los cálculos posteriores se adoptó un rendimiento de biomasa (cardo) en depósito de 8 t.ha⁻¹. De la información del ítem 2.3 se calculó la energía total consumida y producida en la cadena energética (Tabla 20) y se aplicó la ecuación (2.1).

Tabla 20

Energía total consumida y producida en la cadena energética

Energía total consumida en la cadena energética		
Insumo	Cálculo	Valor [MJ.ha ⁻¹]
Semilla	8,2 MJ.kg ⁻¹ . 5 kg.ha ⁻¹	41
Combustible	65,5 L.ha ⁻¹ . 35,86 MJ.L ⁻¹	2.348,83
Fertilizante	80 MJ.kg ⁻¹ . 150 kg.ha ⁻¹	12.000
Maquinaria agrícola		
Subsolado	419 MJ.h ⁻¹ . 8,12 h.ha ⁻¹	3.402,28
vibrocultivador	280 MJ.h ⁻¹ . 0,22 h.ha ⁻¹	61,6
Fertilizado	280 MJ.h ⁻¹ . 0,13 h.ha ⁻¹	36,4
Siembra	280 MJ.h ⁻¹ . 1,01 h.ha ⁻¹	282,8
Laboreo secundario	280 MJ.h ⁻¹ . 0,29 h.ha ⁻¹	81,2
Cosechado	87,6 MJ.h ⁻¹ . 1,79 h.ha ⁻¹	156,8
Enfardado	74 MJ.h ⁻¹ . 0,67 h.ha ⁻¹	49,58
Mano de obra en tareas agrícolas	18 MJ.h ⁻¹ . 12,23 h.ha ⁻¹	220,14
Mano de obra en transporte	0,27 MJ.h ⁻¹ . 0,48 h.ha ⁻¹	0,13
Total		≈ 18.681
Energía total producida en la cadena energética		
Rendimiento energético del cardo por hectárea	8.000 kg.ha ⁻¹ . 15,9 MJ.kg ⁻¹	127.200

El resultado del balance energético es:

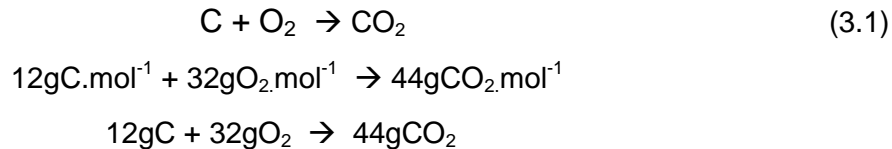
$$\text{El balance energético} = 127.200 \text{ Mj.ha}^{-1} / 18.681 \text{ Mj.ha}^{-1} = 6,8 > 1$$

Por lo tanto el sistema de cultivo del cardo común genera energía y puede ser llevado adelante.

3.1.3 Balances de masa y energía en el proceso de generación de energía

3.1.3.1 Resultados de los balances teóricos en el gasificador y tren de limpieza.

Balance en el gasificador: El caudal teórico inicial de biomasa al ingreso del gasificador considerado es de $1 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$. Para calcular el flujo másico del aire, se tuvo en cuenta la composición del aire (21% de O_2 + 1% de H_2 + 78% de N_2). Entonces, para la combustión completa se tiene:



Un kilo de biomasa posee el 43,7% de C, entonces la proporción de oxígeno es de 1165,33 g O_2 . Como la relación $\text{ER} = 0,33$, entonces la cantidad de O_2 es 384,45 g O_2 . Esta cantidad representa el 21% de la composición del aire. Por lo tanto, la composición completa del aire será:

$$\text{O}_2 = 384,45 \text{ g}$$

$$\text{H}_2 = 11,65 \text{ g}$$

$$\text{N}_2 = 909 \text{ g}$$

$$\text{Aire} = (384,45 + 11,65 + 909) \text{ g} = 1305,1 \text{ g} \approx 1,3 \text{ kg}$$

Es decir, por cada kg de cardo son necesarios 1,3 kg de aire para llevar a cabo la reacción completa.

Según el Instituto para Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), en su artículo "Biomasa: Gasificación" del año 2007, establece para un gasificación tipo downdraf, con un caudal promedio de 675 kg de biomasa y la obtención de 35 kg de cenizas. Haciendo los cálculos para la base 1kg de biomasa, se obtuvieron 0,051kg de cenizas. Entonces, de la ecuación (2.4) se tiene:

$$m_{\text{gas}} = m_{\text{combustible}} + m_{\text{aire}} - m_{\text{ceniza}} = 1\text{kg cardo}\cdot\text{h}^{-1} + 1,3 \text{ kg aire}\cdot\text{h}^{-1} - 0,051 \text{ kg cenizas}\cdot\text{h}^{-1} = 2,249 \text{ kg gas}\cdot\text{h}^{-1} \approx 2,25 \text{ kg gas}\cdot\text{h}^{-1}$$

La densidad del gas de síntesis es $\delta = 1,05 - 1,16 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (Incropera, F. De Witt, D. 4° Ed. 1996). Se adopta $\delta = 1,105 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$

$$m_{\text{gas}} = 2,25 \text{ kg gas}\cdot\text{h}^{-1} / 1,105 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3} = 2,04 \text{ m}^3 \text{ gas}\cdot\text{h}^{-1}$$

Este valor obtenido se acerca a lo establecido en la hoja técnica de gasificación de Probiomasa (Hoja técnica 04) – FAO, que indica que por cada 1kg de biomasa se obtiene entre 2,5 y 3 m³ de gas de síntesis.

Para el caso del balance de energía, se adoptó la composición del gas de síntesis de Alzueta Ania, (2011) según la Tabla 21.

Tabla 21

Composición del gas de síntesis (syngas)

Composición del Gas de síntesis					Fuente
CO (%)	CO ₂ (%)	N ₂ (%)	H ₂ (%)	CH ₄ (%)	
19	10	50	18	3	Lesme, R. et al. 2008
20	12	50	16	2	Alzueta Ania, U. 2011
15-20	8 - 12	45-55	15-20	1-4	Probiomasa-FAO

Los poderes caloríficos (PCI) de los compuestos son:

$$PCI_{CO} = 12,6 \text{ MJ.Nm}^{-3}$$

$$PCI_{H_2} = 10,7 \text{ MJ.Nm}^{-3}$$

$$PCI_{CH_4} = 35,8 \text{ MJ.Nm}^{-3}$$

Entonces, según Lesme, et al. 2008, el PCI del gas de síntesis es:

$$\begin{aligned} \sum PCI_{gas} &= 0,2PCI_{CO} + 0,16PCI_{H_2} + 0,02PCI_{CH_4} = [(0,2.12,6 + 0,16.10,7 + \\ &+ 0,02.35,8) \text{ MJ.Nm}^{-3} = (2,52 + 1,712 + 0,716) \text{ MJ.Nm}^{-3} = 4.948 \text{ kJ.Nm}^{-3} \end{aligned}$$

Para conocer el rendimiento en frío del gasificador se aplicó la fórmula de Barajas Peñaranda, 2013 (ecuación 2.7):

$$\eta_m = (H_g \cdot Q_g / H_s \cdot M_s) \cdot 100$$

$$H_g = PCI_{gas} = 4.948 \text{ kJ.m}^{-3}$$

$$Q_g = \text{Flujo de gas de síntesis} = 2,04 \text{ m}^3$$

$$H_s = PCI \text{ (Biomasa)} = 15.741 \text{ kJ.kg}^{-1} \text{ (restando el 1\% por la densificación – Junta de Andalucía. 2009)}$$

$$M_s = \text{Flujo de biomasa (cardo)} = 1 \text{ kg}$$

Entonces:

$$\eta_m = (H_g \cdot Q_g / H_s \cdot M_s) \cdot 100 = (4.948 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 2,04 \text{ m}^3 / 1 \text{ kg} \cdot 15.741 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}) \cdot 100 \approx 64\%$$

Frank Colombres (2017) muestra un rendimiento en frío del 80% para biomasa residual (cosecha de caña, residuos de poda y renovación de citrus).

El balance de masa y energía en el gasificador se planteó (Lesme Jaén. et al., 2008) a partir de la ecuación (2.6)

$$m_{\text{comb.}} \cdot \text{PCI}_{\text{comb.}} + m_{\text{aire}} \cdot H_{\text{aire}} = m_{\text{gas.}} \cdot \text{PCI}_{\text{gas}} + m_{\text{gas.}} \cdot H_{\text{gas}} + Q_{\text{cen.}} + Q_{\text{amb.}}$$

$$C_{\text{cen.}} = \text{Calor específico de las cenizas} = 0,96 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \text{K}^{-1}$$

$$Q_{\text{cen.}} = m_{\text{cen.}} \cdot C_{\text{cen.}} \cdot (T_{\text{cen.}} - T_{\alpha})$$

$$T_{\text{cen.}} = 800^{\circ}\text{C}; \text{ y } T_{\alpha} = 27^{\circ}\text{C}$$

$$Q_{\text{cen.}} = 0,051 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1} \cdot 0,96 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot 873 \text{ K} = 42,742 \text{ kJ} \cdot \text{h}^{-1} = 0,012 \text{ kW}$$

La entalpía del gas de síntesis se establece como:

$$H_{\text{gas}} = (C_{\text{CO}} \cdot H_{\text{CO}}) + (C_{\text{CO}_2} \cdot H_{\text{CO}_2}) + (C_{\text{H}_2} \cdot H_{\text{H}_2}) + (C_{\text{CH}_4} \cdot H_{\text{CH}_4})$$

$$H_{\text{CO}} = 10969,12 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$H_{\text{CO}_2} = 11853,53 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$H_{\text{H}_2} = 10706,76 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$H_{\text{CH}_4} = - 94735,3 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

(Cengel y Boles, 2011.)

La composición de los elementos que forman el gas de síntesis se toma de la Tabla 21, por lo tanto, H_{gas} vale:

$$H_{\text{gas}} = [(0,2 \cdot 10.969,12) + (0,12 \cdot 11.853,53) + (0,16 \cdot 10.706,76) - (0,02 \cdot 94.735,3)] \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} = 3.434,62 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

El balance de energía queda (ecuación 2.6):

$$m_{comb} \cdot PCI_{comb} + m_{aire} \cdot H_{aire} = m_{gas} \cdot PCI_{gas} + m_{gas} \cdot H_{gas} + Q_{cen} + Q_{amb}$$

$$1 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1} \cdot (15.741 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}) + 1,3 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1} (300 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}) = 2,25 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1} (4.478 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}) + 2,25 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1} (3.434,62 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}) + 42,742 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} + Q_{amb}$$

$$Q_{amb} = 1715,2 \text{ kJ} \cdot \text{h}^{-1} \approx 0,48 \text{ kW}$$

La pérdida de calor debido a las cenizas es $42,742 \text{ kJ} \cdot \text{h}^{-1} = 0,012 \text{ kW}$, por lo tanto, pueden considerarse despreciable. Este valor de pérdidas de calor por cenizas está dentro del rango de valores mostrados en el trabajo de Lesme Jaén. et al., (2008) que establece un $Q_{cen} = 0,01 \text{ kW}$ para las cenizas de leña (algarrobo). El resultado del balance se muestra en la Tabla 22.

Tabla 22

Resultado del balance teórico de masa y energía en el gasificador

Resultado del balance teórico de masa y energía en el gasificador			
Entradas	Valores	Salidas	Valores
Flujo másico de cardo	1 kg.h ⁻¹	Flujo másico de syngas	2,04 m ³ .h ⁻¹ (2,25 kg.h ⁻¹)
Flujo másico de aire	1,3 kg.h ⁻¹	Flujo másico de cenizas	0,051 kg.h ⁻¹
Entalpía del cardo	300 kJ.kg ⁻¹	Calor perdido por las cenizas (Q _{cen})	0,012 kWh
Calor específico de la ceniza	0,96 kJ.kg ⁻¹	Calor cedido al ambiente (Q _{amb})	0,48 kWh
PCI cardo	15.741 kJ.kg ⁻¹		

Balance en el ciclón: Para el cálculo de masa en el ciclón se tomó una eficiencia del equipo del 90% y se operó según la ecuación (2.2). Como flujo de entrada se tomaron los siguientes valores:

Flujo de syngas = 2,04 m³.h⁻¹ (2,25 kg. h⁻¹)

Partículas = 8 g.Nm⁻³ (Basu, 2013)

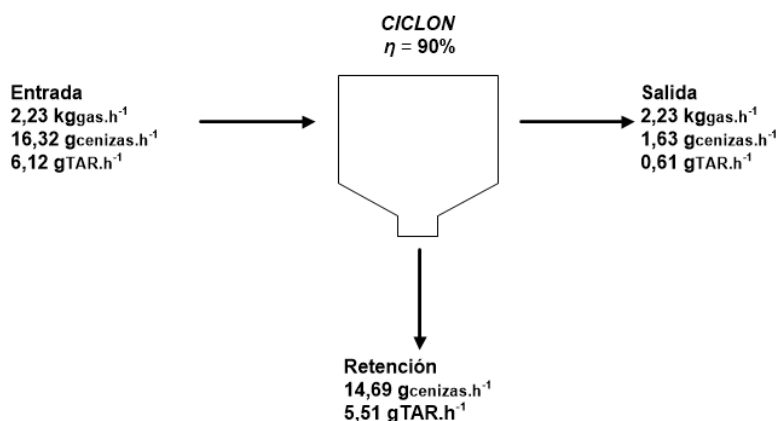
Alquitrán = 3 g.Nm⁻³ (Basu, 2013)

Temperatura de salida del syngas = 800 °C (Cuba Arroyo, 2011)

Para el balance (Figura 20) se adoptaron los valores mayores tanto para las partículas (cenizas) como para el alquitrán.

Figura 20

Esquema del balance de masa en el ciclón



Balance en el primer recuperador de calor: Para el cálculo del balance teórico de masa y energía en el primer recuperador de calor se ha elegido un intercambiador a contraflujo dada su sencillez considerando que no hay pérdidas de calor.

Entrada caliente (syngas) = $T_{C1} = 800^{\circ}\text{C} = 1073^{\circ}\text{K}$

Salida caliente (syngas) = $T_{C2} = 380^{\circ}\text{C}$

$T_m = (T_{C1} + T_{C2})/2 = 590^{\circ}\text{C} (863^{\circ}\text{K})$

El calor específico del syngas se halla de acuerdo a los valores de la Tabla A-16 de Cengel, (2011) e interpolando para $T_m = 863^{\circ}\text{K}$. Los resultados se muestran en la Tabla 23.

Tabla 23

Calor específico promedio del gas de síntesis para $T = 863^{\circ}\text{K}$

Compuesto	C_P (kJ.kg ⁻¹ °C ⁻¹)	Fracción molar	C_P (kJ.kg ⁻¹ °C ⁻¹)
CO	1,2012	0,2	0,2404
H ₂	15,309	0,16	2,44944
CH ₄	4,7116	0,02	0,094232
CO ₂	1,255	0,12	0,1506
N ₂	1,875	0,5	0,59375
			3,5283

Entrada fría (aire) = $T_{F1} = 25^{\circ}\text{C}$

Salida fría (aire) = $T_{F2} = 600^{\circ}\text{C}$

$$T_{m\text{Aire}} = (T_{F1} + T_{F2})/2 = 312,5^{\circ}\text{C}$$

Interpolando entre los valores de la Tabla A-15 (Cengel, 2011) para una temperatura $T_m = 312,5^{\circ}\text{C}$, se tiene $\hat{C}_{\text{Paire}} = 1,1631 \text{ kJ.kg}^{-1}\text{C}^{-1}$ y $\hat{C}_{\text{PSyngas}} = 3,5283 \text{ kJ.kg}^{-1}\text{C}^{-1}$.

Para obtener el calor que se pierde durante el enfriamiento del gas de síntesis al pasar por un intercambiador de calor a contracorriente, se toma el flujo de syngas obtenido teóricamente desde el último ciclón ($2,23 \text{ kg.h}^{-1}$). Entonces, sin considerar las pérdidas de calor del intercambiador, se tiene (ecuación 2.3):

$$Q = Q_C = Q_F = \dot{m}_{\text{syngas}} \cdot C_{\text{PSyngas}} \cdot \Delta T$$

$$Q = Q_C = 2,23 \text{ kg.h}^{-1} \cdot 3,5283 \text{ kJ.kg}^{-1}\text{C}^{-1} \cdot (800 - 380)^{\circ}\text{C} = 3.304,6 \text{ kJ.h}^{-1} \approx 3.305 \text{ kJ.h}^{-1}$$

$$Q_C = Q_F = \dot{m}_{\text{aire}} \cdot C_{\text{paire}} \cdot (T_{F2} - T_{F1}) = \dot{m}_{\text{aire}} \cdot 1,1631 \text{ kJ.kg}^{-1}\text{C}^{-1} \cdot 395^{\circ}\text{C}$$

$$\text{Por lo tanto: } \dot{m}_{\text{aire}} = Q/1,1631 \text{ kJ.kg}^{-1}\text{C}^{-1} \cdot 395^{\circ}\text{C} = 7,2 \text{ kg}_{\text{aire}} \cdot \text{h}^{-1}$$

El calor cedido al medio ambiente es $Q = 3.305 \text{ kJ.h}^{-1}$. Este calor se puede aprovechar para calentar agua para limpieza en tambos de la zona con una temperatura de salida entre 80 y 85°C (Caputo, 2007), o bien para destinarlo a generar vapor, etc. Los resultados del balance se muestran en la Tabla 24.

Tabla 24

Resultado del balance de masa y energía en el 1° recuperador de calor

Resultado del balance de masa y energía en el 1° recuperador de calor			
Entradas	Valores	Salidas	Valores
T° entrada de aire	25 °C	T° salida de aire	600°C
		T° media de aire en el recuperador	312,5 °C
T° entrada de syngas	800 °C	T° salida de syngas	380 °C
		T° media en el recuperador	590 °C
Calor específico syngas (T° = 590 °C)	3,5283 kJ.kg ⁻¹ C ⁻¹	Calor cedido al exterior	3.305 kJ.h ⁻¹
Calor específico aire (T° = 312,5 °C)	1,1631 kJ.kg ⁻¹ C ⁻¹	Flujo másico de aire	7,2 kg.h ⁻¹

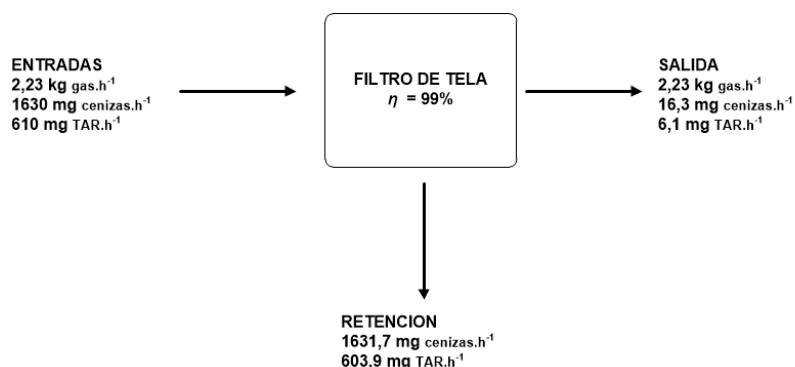
Balance de masa en el filtro: El gas de syngas que sale del recuperador de calor tiene una temperatura de 380°C . Esta temperatura de salida del gas de

síntesis con impurezas se debe a que los alquitranes poseen puntos de rocío en la franja de 150 a 350 °C (Cuba Arroyo, 2011). Una temperatura del syngas inferior a los 350°C provocaría una condensación de los alquitranes en el equipo de filtración.

La eficiencia de este tipo de filtros debe estar en el orden de 99 – 99,9% (Peralta Castillo, 2001). Entonces se adoptó una eficiencia del 99% y la ecuación (2.2). El resultado se muestra en la Figura 21.

Figura 21

Esquema del balance de masa en el filtro



Balance de masa y energía en el segundo recuperador de calor: Para el cálculo del balance teórico de masa y energía en el 2° recuperador de calor se tiene:

$$TC1 = 380^{\circ}C; TC2 = 80^{\circ}C; TF1 = 25^{\circ}C; TF2 = 340^{\circ}C$$

$$TmC = 240^{\circ}C; TmF = 182,5^{\circ}C$$

El calor específico promedio para el caso del syngas tomando la fracción molar y los valores de la Tabla A-16. Cengel, (2011), se muestra en la Tabla 25. Como en el primer recuperador, aquí se consideró que no hay pérdidas de calor.

Tabla 25

Calor específico del syngas a $Tm = 240^{\circ}C$

Compuesto	C _P (kJ.kg ⁻¹ °C ⁻¹)	Fración molar	C _P (kJ.kg ⁻¹ °C ⁻¹)
CO	1,0625	0,2	0,2125
H ₂	14,482	0,16	2,31712
CH ₄	2,828	0,02	0,5656
CO ₂	1,0017	0,12	0,1202
N ₂	1,052	0,5	0,526
			3,2324

Para el caso del C_{PAire} a T_m = 182,5°C se opera de la misma forma interpolando con datos de la Tabla A-15. Cengel, (2011). Así: $\hat{C}_{PAire} = 1,0195$ kJ.kg⁻¹°C⁻¹. De la ecuación (2.3) se tiene:

$$Q_C = 2,23 \text{ kg.h}^{-1} \cdot 3,2324 \text{ kJ.kg}^{-1}\text{°C}^{-1} (380 - 80) \text{ °C} = 2.162,5 \text{ kJ.h}^{-1}$$

$$\dot{m}_{aire} = 2.162,5 \text{ kJ.h}^{-1} / 1,0195 \text{ kJ.kg}^{-1}\text{°C}^{-1} (340 - 25) \text{ °C} \approx 6,73 \text{ kg}_{aire}.\text{h}^{-1}$$

El total de calor liberado y el caudal de aire requerido se muestran en la Tabla 26.

Tabla 26

Caudal total de calor liberado y aire requerido

Recuperadores	Q liberado	Flujo de aire requerido
1° recuperador de calor	3.305 kJ.h ⁻¹	7,2 kg.h ⁻¹
2° recuperador de calor	2.162,5 kJ.h ⁻¹	6,73 kg.h ⁻¹
Total	5467,5 kJ.h ⁻¹	≈ 14 kg.h ⁻¹

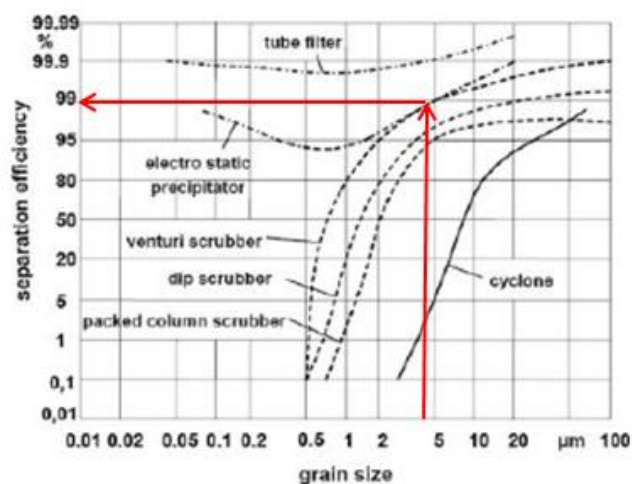
Balace de masa en el lavador de gases: El syngas sale del 2° recuperador a una temperatura de 40°C. Suele contener pequeñas trazas de compuestos como H₂S; HCl, NH₃ y metales alcalinos (Durán Moreno, 2013) cuya presencia puede dañar el motor de combustión interna, más las cenizas y el alquitrán que provienen luego de dicha limpieza.

En una torre lavadora de aspersión las partículas del gas al pasar en contracorriente con las gotas de agua, aumentan su masa y por gravedad caen al fondo arrastrando el líquido mientras que el gas sale por la parte superior del equipo (Toledo Melchor, 2011). La caída de presión es muy poca, por lo tanto la pérdida de calor del syngas es muy baja y casi no se modifica. El gas húmedo no posee inconvenientes con el ingreso al MCI.

Se adoptó el tamaño menor de partículas (4 μm) entre cenizas y alquitrán. Se consideró la eficiencia del lavador de gases según la Figura 22.

Figura 22

Eficiencia de lavador de gases en función del tamaño de partícula

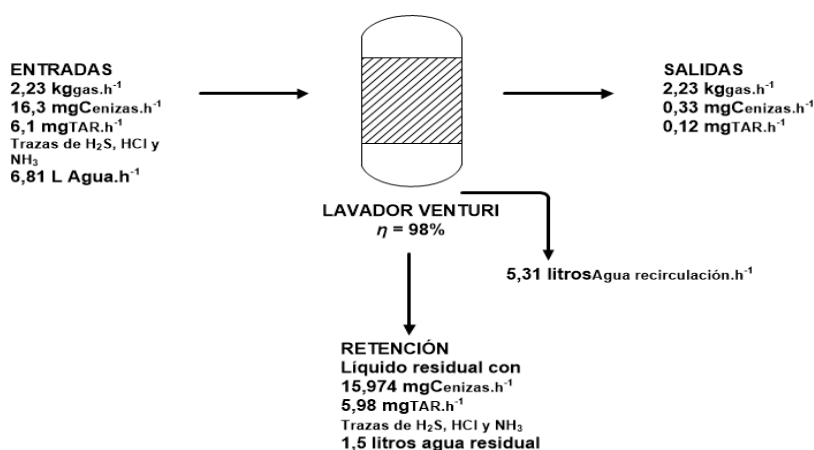


Nota: La Figura 22 muestra el cálculo de la eficiencia de lavador de gases en función del tamaño de partícula. Tomado de Nicolau, (2016). (p. 17).

Según la Figura 22 se adoptó una eficiencia del 98%. La densidad del syngas considerada fue de $0,984 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ($T^\circ = 80^\circ\text{C}$). Se estimó que la temperatura descendió a 40°C con una humedad menor al 34% (Suarez Porras, 2017). La Figura 23 muestra el esquema del balance de masa en el lavador de gases, aplicando la ecuación (2.2).

Figura 23

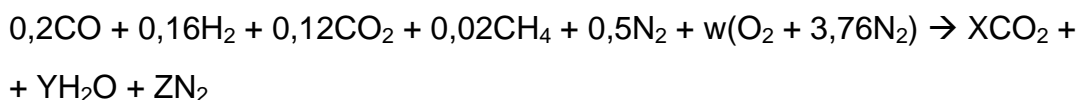
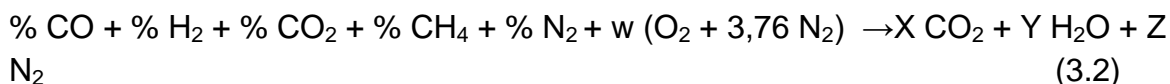
Esquema del balance de masa en el lavador de gases



Con una densidad del syngas de $0,984 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, se obtuvieron $2,27 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ de syngas. Para reducir la humedad del gas en la cámara de niebla se consideró una eficiencia del 90%. El gas saturado de humedad contiene $36 \text{ gH}_2\text{O}\cdot\text{kg}^{-1}$. Con lo cual de la ecuación (2.2) el gas saldrá del equipo lavador con $3,6 \text{ gH}_2\text{O}\cdot\text{kg}^{-1}$. Esto provoca un menor porcentaje de NOx en los gases de escape del MCI pero un aumento en el porcentaje de CO que se resuelve con un filtro adecuado.

3.1.4 Resultado del balance estequiométrico en el MCI

El balance estequiométrico sigue el lineamiento de Naranjo Anaya y Gamarra Quintero, (2017). La ecuación (3.2) estequiométrica del syngas con el aire al ingreso del MCI, es:



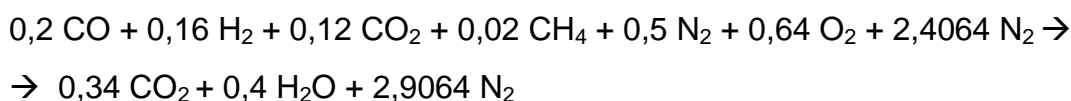
Transportando los prefijos estequiométricos de la ecuación a la Tabla 27, se tiene:

Tabla 27

Valores de los prefijos estequiométricos de la reacción

Elementos	Valores
Carbono	$0,2 + 0,12 + 0,02 = X = 0,34$
Hidrógeno	$0,32 + 0,08 = Y = 0,4$
Oxígeno	$0,2 + 0,24 + 2w = 2X + Y$ $0,44 + 2w = 2(0,34) + 0,4 = 1,08 \rightarrow w = 0,64$
Nitrógeno	$1 + 4,8128 = 2Z \rightarrow Z = 2,9064$

Entonces la ecuación estequiométrica queda:



Los componentes de la mezcla (aire/gas) en el mezclador son el syngas a una temperatura de 40°C y el aire a una temperatura de 25°C, mientras que los gases de escape salen a una temperatura de 900 a 1100°K (Soca Cabrera, 2022). Entonces para los cálculos posteriores se adopta una temperatura de 800°C para de gases de escape. Para el cálculo teórico de las pérdidas principales y el calor transformado en trabajo es necesario analizar el contenido molar y fraccional de los reactivos (syngas y aire) y los productos de reacción (CO₂, H₂O y N₂). Los óxidos nitrosos (NO_x) se producen como consecuencia de la propia combustión dentro del motor y dependiendo del tipo de motor, son solo trazas que están referenciados dentro del nitrógeno resultante en los gases de escape (Por ejemplo: < 1,1gbhp⁻¹.hr⁻¹ para la gama de motores Siemens Serie SGE-S). En este caso el porcentaje de NO_x disminuye debido a la falta de humedad en el syngas.

La masa y las fracciones molares para el syngas, el aire y los gases de escape (combustión completa) se muestran en las Tablas 28, 29 y 30 respectivamente:

Tabla 28

Masa y fracciones molares para el syngas

Peso molecular	Fracción molar	Masa	
PMCO = 28 g.mol ⁻¹	0,2	5,6 g.mol ⁻¹	5,6 kg.kmol ⁻¹
PMH ₂ = 2 g.mol ⁻¹	0,16	0,32 g.mol ⁻¹	0,32 kg.kmol ⁻¹
PMCO ₂ = 44 g.mol ⁻¹	0,12	5,28 g.mol ⁻¹	5,28 kg.kmol ⁻¹
PMCH ₄ = 16 g.mol ⁻¹	0,02	0,32 g.mol ⁻¹	0,32 kg.kmol ⁻¹
PMN ₂ = 28 g.mol ⁻¹	0,5	14 g.mol ⁻¹	14 kg.kmol ⁻¹

Tabla 29

Masa y fracciones molares para el aire

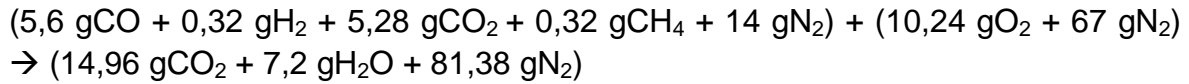
Peso molecular	Fracción molar	Masa	
PMO ₂ = 16 g.mol ⁻¹	0,64	10,24 g.mol ⁻¹	10,24 kg.kmol ⁻¹
PMN ₂ = 28 g.mol ⁻¹	2,4064	67,38 g.mol ⁻¹	67,38 kg.kmol ⁻¹

Tabla 30

Masa y fracciones molares del gas de escape

Peso molecular	Fracción molar	Masa	
PMCO ₂ = 44 g.mol ⁻¹	0,34	14,96 g.mol ⁻¹	14,96 kg.kmol ⁻¹
PMH ₂ O = 18 g.mol ⁻¹	0,4	7,2 g.mol ⁻¹	7,2 kg.kmol ⁻¹
PMN ₂ = 28 g.mol ⁻¹	2,9064	81,38 g.mol ⁻¹	81,38 kg.kmol ⁻¹

De acuerdo a cada caso, entonces la reacción estequiométrica resulta:



$$25,52 \text{ gSyngas} + 77,24 \text{ gAire} \rightarrow 103,54 \text{ gGas de escape}$$

$$25,52 \text{ kgSyngas} + 77,24 \text{ kgAire} \rightarrow 103,54 \text{ kgGas de escape}$$

Por cada kg de syngas se tiene operando con regla de tres simple se tiene: 3,027 kgAire.kgSyngas⁻¹ y 4,06 kgGas de escape.kgSyngas⁻¹ respectivamente.

Para conocer la temperatura de la mezcla de (aire/gas) en la entrada del MCI se tiene:

$$m_{\text{Aire}} = 3,027 \text{ kg}; C_{p_{\text{Aire}}} = 1,007 \text{ kJ.kg}^{-1}\text{°C}^{-1} \text{ (Cengel, Y. 2011. Tabla A-15)}$$

$$T_{\text{Aire}} = 25\text{°C}$$

$$m_{\text{Syngas}} = 1 \text{ kg}; C_{p_{\text{Syngas}}} = 3,14 \text{ kJ.kg}^{-1}\text{°C}^{-1} \text{ (Cengel, Y. 2011. Tabla A-16)}$$

$$T_{\text{Syngas}} = 40\text{°C}$$

$$m_{\text{Gas escape}} = 4,06 \text{ kg}$$

$$Q_{\text{Syngas}} = Q_{\text{Aire}}$$

$$m_{\text{Syngas}} \cdot C_{p_{\text{Syngas}}} (40 - T_F) = m_{\text{Aire}} \cdot C_{p_{\text{Aire}}} (T_F - 25)$$

$$1 \text{ kg} \cdot 3,14 \text{ kJ.kg}^{-1}\text{°C}^{-1} (40 - T_F) = 3,027 \text{ kg} \cdot 1,007 \text{ kJ.kg}^{-1}\text{°C}^{-1} (T_F - 25) \text{ °C}$$

$$3,14 \text{ kJ.°C}^{-1} (40 - T_F) = 3,0482 \text{ kJ.°C}^{-1} (T_F - 25) \text{ °C}$$

$$(3,14 \text{ kJ.°C}^{-1} / 3,0482 \text{ kJ.kg}^{-1}\text{°C}^{-1}) (40 - T_F) = (T_F - 25) \text{ °C}$$

$$1,03 (40 - T_F) = (T_F - 25) \text{ °C} \rightarrow T_F = 32,61\text{°C} \approx 33\text{°C}$$

$$T_{\text{Gas escape}} = 800\text{°C}; C_{p_{\text{CO}_2}} = 1,063 \text{ kJ.kg}^{-1}\text{°C}^{-1}; C_{p_{\text{N}_2}} = 1,114 \text{ kJ.kg}^{-1}\text{°C}^{-1}$$

Para el caso del vapor de agua, se recurre a la Tabla A-16 Cengel, (2011). Se adoptó para T° = 800°C un C_{PV.Agua} = 2,3374 kJ.kg⁻¹°C⁻¹. Ahora el C_P del gas de escape se muestra en la Tabla 31.

Tabla 31

Calor específico del gas de escape

Compuesto	C _P (kJ.kg ⁻¹ °C ⁻¹)	Fracción molar	C _P (kJ.kg ⁻¹ °C ⁻¹)
CO ₂	1,063	0,34	0,36142
N ₂	1,114	2,9064	3,238
H ₂ O (vapor)	2,3374	0,4	0,935
			4,53442

De la aplicación de la ecuación (2.3), se tiene:

$$Q_{\text{Gas escape}} = m_{\text{Gas escape}} \cdot C_{P\text{Gas escape}} (800 - 33) \text{ °C} = 4,06 \text{ kg} \cdot 4,53442 \text{ kJ.kg}^{-1}\text{°C}^{-1} \cdot 767 \text{ °C} \approx 12.120,3 \text{ kJ}$$

Como la unidad de flujo másico de syngas es [kg.h⁻¹] de ingreso al motor, se tiene: $q = Q/t \approx 12.120 \text{ kJ.h}^{-1}$. Este valor del calor cedido a los gases de escape representa el 35% del total (Ver Figura 16), el calor transformado en trabajo por el motor representa el 25% y el calor cedido al sistema de refrigeración representa el 20%. Esta última pérdida es compleja de recuperar por cuanto depende de una modificación del sistema de refrigeración del MCI en principio y de la modificación del conjunto MCI + generador de electricidad. Los valores totales hallados son:

$$Q_{\text{Gases escape}} = 12.120,5 \text{ kJ.h}^{-1} = 3,4 \text{ kW (35\%)}$$

$$Q_{\text{Sist. Refrigeración}} = 1,94 \text{ kW}$$

$$Q_{\text{Trabajo}} = 2,43 \text{ kW}$$

Este valor teórico luego se ajusta de acuerdo al flujo másico de ingreso al gasificador de acuerdo a la producción de biomasa.

3.1.5 Ajuste de los resultados según el equipamiento propuesto

Para el ajuste de los resultados, se tomó en cuenta los parámetros de trabajo del gasificador marca ANKUR WBG 850 y el MCI marca Siemens modelo SGE-56SM de 1500 rpm. Los datos que son de interés para el gasificador son:

Gasificador ANKUR WBG 850

Caudal de ingreso: hasta $765 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ de biomasa

Humedad de la biomasa al ingreso: $< 20\%$

Flujo medio de syngas: $1,912 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$

Temperatura de syngas a la salida: $300 - 500 \text{ }^\circ\text{C}$

Los datos que son de interés para el MCI son:

Motor marca Siemens modelo SGE-56SM

Flujo de aire al ingreso: $5,32 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$

Total energía eléctrica: 1.066 kWe

Eficiencia eléctrica del motor: $37,9\%$

Eficiencia térmica del motor: $52,9\%$

Temperatura máxima admisible del syngas: $55 \text{ }^\circ\text{C}$

Temperatura de salida de gases de escape: $528 \text{ }^\circ\text{C}$

Rendimiento global: $90,8\%$

Por lo tanto para la capacidad horaria de producción de la planta (8.000 horas), se tiene una generación eléctrica de $8.528 \text{ MWh}\cdot\text{año}^{-1}$.

Elegido el sitio de la implantación del emprendimiento, se consideró abastecer a las cooperativas de distribución de energía eléctrica de la zona (Cooperativas de Hersilia – SFE y Selva – Santiago del Estero). La demanda de energía de ambas cooperativas según CESPARG es (Tabla 32):

Tabla 32

Demanda de energía de las cooperativas de servicios eléctricos

Año [hs]	Demanda Coop. Hersilia [MWh]	Demanda Coop. Selva [MWh]	Total Demanda [MWh]
8.760	3.169	2.565	5.734
Trabajo Planta (8.000 hs)	2.894,1	2.342,5	≈ 5.237

El valor adoptado de autoconsumo es del 20% (Bridgwater, Bolhar-Nordenkampf, 2019), al que se le debe adicionar un 15% para el arranque de los

motores y trabajo continuo, más el consumo inductivo (luces y demás artefactos). El valor es de 373,1 kWh y la energía total producida al año es de 5.543,2 MWh.año⁻¹. Por lo tanto, la producción energética anual para el funcionamiento de 8.000 horas, cubre completamente con la demanda y cubre el 96,7% de la demanda total anual para ambas cooperativas.

Para el ajuste se consideró el consumo de 5,32 kg aire.h⁻¹ al MCI, por lo tanto el consumo de syngas es de 2,42 kg gas.h⁻¹. Se consideró un pulmón en el depósito de almacenamiento de gas al ingreso del MCI de una semana para no tener inconvenientes de abastecimiento. Por lo tanto el abastecimiento diario de syngas al depósito es de 58,07 kg y 406,5 kg por semana. Se consideró además que a lo largo del tren de limpieza del syngas las pérdidas son mínimas. Por lo tanto, a la salida del gasificador los parámetros del syngas son:

Caudal de syngas: 311 kg.h⁻¹

T° salida del syngas: 500 °C

Densidad del gas (T° = 500 °C) = 0,364 kg.m⁻³

Caudal a la salida del gasificador = 311 kg.h⁻¹/0,346 kg.m⁻³ = 898,9 m³.h⁻¹

Si el rendimiento del gasificador es de 1,912 m³.h⁻¹ por cada kg de biomasa, entonces es necesario un caudal de abastecimiento de biomasa de 470,1 kg.h⁻¹ (≈ 470 kg.h⁻¹). El abastecimiento diario es de 11.280 kg (≈ 11,3 toneladas). Para cumplir con el funcionamiento anual de la planta y tomando en cuenta el rendimiento de 8 t.ha⁻¹, son necesarios 470 hectáreas de cultivo. Se adoptó una superficie de cultivo de 500 ha y una superficie total de 510 ha en la cual se ubican el depósito de biomasa con equipos auxiliares y la planta de biomasa propiamente dicha con sus servicios auxiliares.

Los resultados en función de la energía de entrada y salida en el gasificador y el tren de limpieza y en MCI se muestran mediante la Tabla 33 y el diagrama de Sankey se muestra en la Figura 24 y 25 para cada caso en las cuales se utiliza el MW como unidad de medida. Mientras que el detalle se muestra en Anexo B.

Tabla 33

Entradas y salidas de energía en el gasificador y el tren de limpieza

Energía de entrada al gasificador		Energía de salida del gasificador	
Cardo	205,9 MWh	Syngas	150,5 MWh
Aire	5,14 MWh	Cenizas	4,4 MWh
		Calor del gasificador	56 MWh
		Calor en el 1° Rec. recuperador	0,13 MWh
		Calor en el 2° Rec.	0,085 MW
Energía de entrada al MCI		Energía de salida del MCI	
Syngas	2,908 MWh	Energía eléctrica	1,066 MWh
Aire	0,065 MWh	Energía térmica	1,575 MWh
		Energía perdida en motor	0,311 MWh

Figura 24

Diagrama de Sankey para el flujo de energía en el gasificador

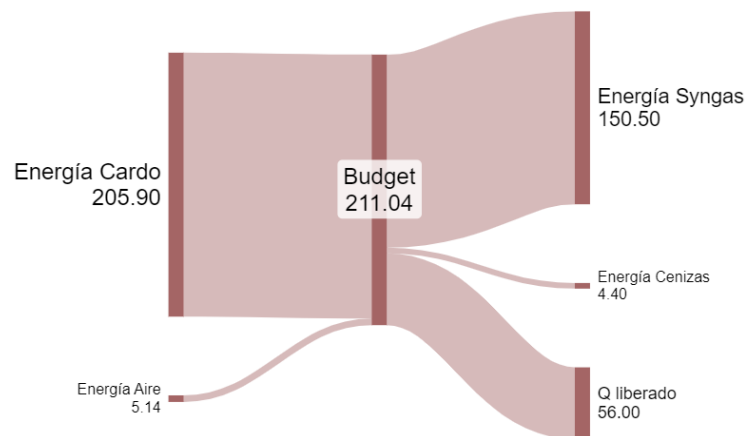
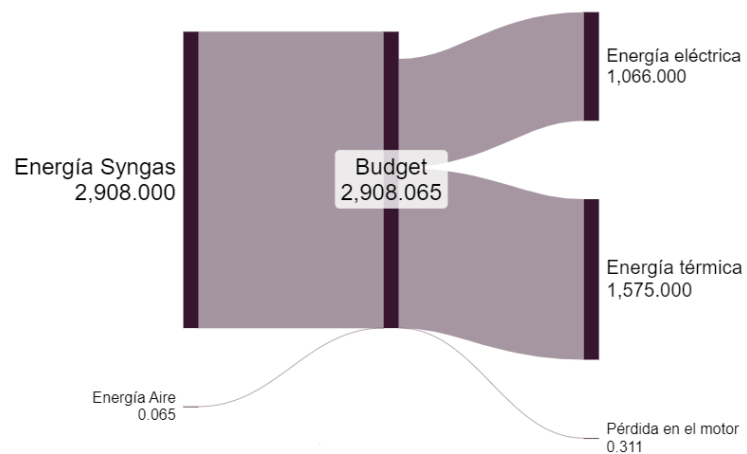


Figura 25

Diagrama de Sankey para el flujo de energía en el MCI



3.1.6 Resultado de la estimación de las emisiones de CO₂ para el proceso completo

Para el cálculo en el proceso de cultivo, se consideraron los datos de las Tablas 3 y 4 del punto 2.3 y la emisión de óxido nitroso para tareas agroproductivas en Argentina. Se adoptaron solo los factores directos en la emisión de dióxido de carbono.

Factor de emisión de CO₂: 2,64 kgCO₂.L⁻¹

Consumo de combustible en tareas agrícolas: 65,5 L.ha⁻¹

Consumo de lubricante en tareas agrícolas: 0,17 L.ha⁻¹

Densidad del lubricante mineral: 0,88 kg.L⁻¹

Emisión del CO₂ del lubricante: 0,985 kgCO₂.kg⁻¹

Emisión de N₂O en actividades agroproductivas: 2 a 3 kg.ha⁻¹.año⁻¹

La emisión de CO₂ del lubricante por su densidad es de 0,866 kgCO₂.L⁻¹. Se adoptó el valor superior para la emisión de N₂O. Como el tiempo de fertilizado por hectárea es de 0,13 h.ha⁻¹, el valor de emisión fue de 6,6.10⁻⁵ kgN₂O.ha⁻¹. Ingresando con ese valor en la calculadora de emisión de CO₂ equivalente de la EPA, se obtuvo un valor de 0,012 kgCO₂.ha⁻¹. Para la emisión del combustible el cálculo arrojó un valor de 172,92 kgCO₂.ha⁻¹ (≈ 173 kgCO₂.ha⁻¹).

El valor total (173 kgCO₂.ha⁻¹) se convirtió a gCO₂.kg⁻¹ de cardo con un resultado de 19,25 gCO₂.kg⁻¹. Tomando en cuenta que 1 kg de cardo tiene un valor energético de 15,9 MJ, entonces la emisión de CO₂ es de 1,21 gCO₂.MJ⁻¹. Para el cultivo de cardo con fines energético la Secretaría General del Medio Rural y Producción Ecológica de la Junta de Andalucía en 2010 publicó a través de un estudio, el valor de 1,437 gCO₂.MJ⁻¹.

En comparación la soja que produce biodiesel tiene una emisión de 160 kgCO₂.t⁻¹ (CONICET, 2018). Mientras que el rinde medio en Argentina es de 14,4 QQ/ha⁻¹ (Conde et al., 2023), es decir 1,4 t/ha⁻¹. Entonces la emisión por hectárea es de 224 kg CO₂ soja.ha⁻¹.

Por otra parte, como se mencionó, la captura de CO₂ por parte del terreno cultivado para el cardo debería restarse de la emisión total en el proceso de cultivo del cardo. No se cuenta con datos precisos en este caso. El estudio de Guerra, V. (2021) a través del INTA muestra un mapa con una tasa potencial de secuestro de carbono con un rango de 0,06 – 0,1 tC.ha⁻¹.año⁻¹ para la zona de cultivo elegida para el cardo, modificando sensiblemente las prácticas agrícolas actuales. El cardo como cultivo tipo C3 tiene menor rendimiento en la fotosíntesis que un cultivo del tipo C4 como el pasto varilla debido a la pérdida de agua. No se

encontraron estudios más actuales sobre el potencial de captura de CO₂ por parte de un cultivo tipo C3 como el cardo común.

La generación de energía de la panta es de 1,066 MWh y el factor de emisión de CO₂ para la generación eléctrica en Argentina es 0,486 kgCO₂.kWh⁻¹. Por lo tanto la emisión para la planta propuesta es de 0,52 kgCO₂.MWh⁻¹. Este valor si se puede comparar con la generación de energía eléctrica por otros medios distintos al de gasificación de cardo y obtención de energía eléctrica mediante un MCI. Para el caso de la región peninsular de España que es una de las zonas de origen del cardo, la Tabla 34 muestra la generación energética en España por distintos medios y la emisión de CO₂ por MWh generado. Mientras que la Tabla 35 muestra valores para la zona no peninsular.

Tabla 34

Emisiones de CO₂ asociadas a la generación de electricidad del sistema peninsular de España de marzo de 2021

Sistema Peninsular	
Tecnología	Emisiones CO ₂ -eq (tCO ₂ -eq/MWh)
Central Térmica de Carbón	0,95
Central Térmica Ciclo Combinado (Gas Natural)	0,37
Central Térmica Fuel-Gas	0,77
Cogeneración	0,38
Residuos	0,24

Tabla 35

Emisiones de CO₂ asociadas a la generación de electricidad del sistema no peninsular de España de marzo de 2021

Territorios no peninsulares	
Tecnología	Emisiones CO ₂ -eq (tCO ₂ -eq/MWh)
Central Térmica Ciclo Combinado (Gasóleo)	0,60
Central Térmica Ciclo Combinado (Gas Natural)	0,41
Central Térmica de Carbón	1,05
Motores Diesel (gasoil, fuel, gas natural)	0,68
Central Térmica Vapor	0,90
Turbina de Gas (Gasóleo)	1,12
Turbina de Gas (Gas Natural)	0,84
Cogeneración	0,38
Residuos	0,24

En la Tabla 34 se puede observar que el resultado del presente trabajo está por debajo de la emisión de CO₂ correspondiente a una central térmica de carbón y por debajo de una central térmica Fuel-Gas para generar energía eléctrica. En la Tabla 35 se puede observar que el resultado obtenido en el presente trabajo está por debajo de las emisiones generadas por una central térmica de ciclo combinado (gas oil), la generación por un MCI (gas oil, fuel oil, GN) por ejemplo.

La utilización del agua como un recurso dentro del proceso de generación de energía eléctrica es otra fuente de emisión de CO₂. El tratamiento del fluido conlleva un consumo de 0,37 kWh.m⁻³ para agua de río y de 0,48 kWh.m⁻³ para agua subterránea (Iagua, 2014). Según el proceso planteado el consumo de agua es de 6,81 L.h⁻¹ con una reposición del 22%. El fluido recibe un tratamiento de purificación necesaria que consume 0,717 kWh.L⁻¹ (De la Fuente Rodríguez, J. 2023). El consumo total es de 0,63 m³.MWh⁻¹. La bibliografía consultada no permitió realizar una analogía entre la emisión de CO₂ por el consumo de agua en otros procesos de generación de energía con el planteado en el presente trabajo dada la diferencia de potencias en todos los casos. De todos modos, el consumo de agua en este caso es menor comparado con el de otros procesos. La Tabla 36 muestra consumos de agua del sector español de generación de energía eléctrica.

Tabla 36

Consumo de agua para la generación eléctrica por distintos procesos en el sector español

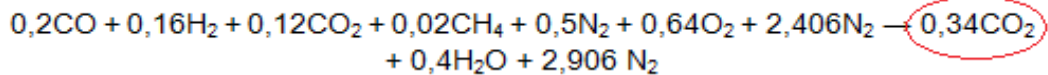
Tipo de combustible	Refrigeración	Extracción Media (m ³ /MWh)	Consumo Medio (m ³ /MWh)
NUCLEAR	Torres	4,17	2,54
	Ciclo abierto	167,88	1,02
GAS NATURAL-CICLO COMB.	Torres	0,97	0,78
	Ciclo abierto	43,08	0,38
CARBÓN	Torres	3,80	2,60
	Ciclo abierto	137,60	0,95

Nota: Tabla 39, consumo de agua para la generación eléctrica por distintos procesos en el sector español. Tomado de *Macknick et al., (2012)*. (p. 7)

Tomando el valor 1,21 gCO₂.MJ⁻¹ para el cultivo del cardo y teniendo en cuenta la relación MJ a MWh, la emisión de CO₂ es de 0,00436 kCO₂.MWh⁻¹. Este valor es despreciable frente a la emisión de la planta de generación de energía eléctrica (0,52 kgCO₂.MWh⁻¹). Por lo tanto la emisión del cultivo sumada al funcionamiento de la planta (8.000 h.año⁻¹) es de 4.160,3 tCO₂.año⁻¹.

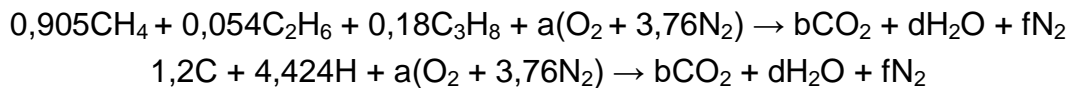
Para la estimación de la emisión de CO₂ en los gases de escape del MCI, depende de muchos factores relativos al syngas, a las condiciones físicas en el ingreso al equipo y al tipo y motor y sus parámetros de funcionamiento. Por lo tanto, la estimación se basó en un cálculo teórico estequiométrico considerando una combustión completa. Se utilizó la ecuación (2.7) para los distintos combustibles.

Para el caso del syngas se tiene:



Para el caso del gas natural (GN) la fórmula general es una mezcla constituida por: 90,5% CH₄ (metano); 5,4% C₂H₆ (etano); y 18% C₃H₈ (propano).

Entonces el balance estequiométrico queda:



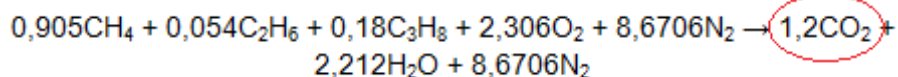
$$\text{C (carbono)} \rightarrow b = 12$$

$$\text{H (hidrógeno)} \rightarrow d = 2,212$$

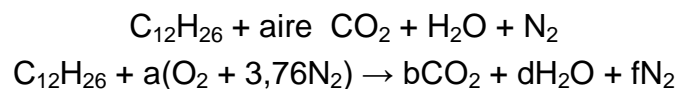
$$\text{O (oxígeno)} \rightarrow a = (2b + d)/2 = (2,4 + 2,212)/2 = 2,306$$

$$\text{N (nitrógeno)} \rightarrow f = 3,76 a = 8,6706$$

Reemplazando valores, queda:



Para el caso del gas oil su fórmula general es C₁₂H₂₆ y el balance estequiométrico en las condiciones anteriores es:



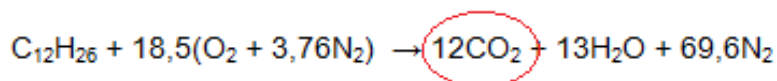
$$\text{C (carbono)} \rightarrow b = 12$$

$$\text{H (hidrógeno)} \rightarrow d = 13$$

$$\text{O (oxígeno)} \rightarrow a = (2b + d)/2 = 18,5$$

$$\text{N (nitrógeno)} \rightarrow f = 3,76 a = 69,6$$

Reemplazando valores, queda:



De los 3 balances estequiométricos considerando una combustión completa y el uso de 3 combustibles diferentes se puede observar que el uso del GN incrementa 3,5 veces la emisión de CO₂, mientras que con el uso del gas oil se incrementa en 35 veces. La combustión en un MCI no es completa. Según Naranjo Anaya y Gamarra Quintero (2017), en una combustión real aparecen otros compuestos como: CO (monóxido de carbono), COV's (compuestos orgánicos volátiles), HC's (trazas de etano), y NOx (óxidos de nitrógeno). Por lo tanto, no es posible en el presente trabajo realizar una estimación más acertada para arribar a valores de emisión de CO₂ en los gases de escape de un MCI que genera energía eléctrica.

3.1.7 Resultado del análisis del impacto ambiental del proceso

3.1.7.1 Marco legal y categorización del proyecto.

Con el dato de la ubicación del sitio de cultivo de cardo y la instalación de la planta de biomasa, el marco legal para analizar el impacto ambiental de las actividades para la generación de energía eléctrica son:

- Decreto 101/03 y 1844/02 – Ley 11707
- Decreto 351/79 y 1338/96 – Ley 19587 de Higiene y Seguridad en el Trabajo
- Res MTySS 075/11 – Trabajo decente en campamentos rurales
- Res MTySS 608/11 – Trabajo decente en campamentos rurales temporales
- Res MTySS 116/11 – Ubicación de locales destinados fitosanitarios
- Ley 12923 provincia de Santa Fe – Plagas agrícolas
- Decretos provinciales 628/11 – Obras en Construcción
- Res 0177/03 y 0201/04 de calidad del aire de Santa Fe
- Norma IRAM 3528 Instalaciones fijas contra incendio
- Res 1049/12 para emisiones de gases de escape del MCI (Secretaría de Energía (<https://www.enre.gov.ar/>)).

Se consideró lo establecido en el Anexo II del decreto 101/2003 para cultivos cultivo de cereales y generación de energía eléctrica no convencional. La Tabla 37 muestra el extracto del anexo II – Decreto 101/03.

Tabla 37

Actividades del Anexo IV – Decreto 101/2003 de la ley 17.177 de la provincia de Santa Fe

401.19	Generación de energía n.c.p.	2
	(Incluye la producción de energía eléctrica mediante fuentes de energía solar, biomasa, eólica, geotérmica, mareomotriz, etc.)	2

Para el cálculo de la categoría se usó la fórmula del Anexo IV:

$$FC = ER + CA + R + D + Lo \quad (3.3)$$

Siendo:

FC = Fórmula de categorización

ER = Efluentes y residuos

CA = Clasificación de actividad (anexo II)

R = Riesgo presunto

D = Dimensionamiento

Lo = Localización

Los valores de FC se muestran en la Tabla 38.

Tabla 38

Valores de FC para categorización de establecimientos

Valores de FC	Categoría del establecimiento
Hasta 11	1°
De más de 11 a 25	2°
Mayor de 25	3°

Para poder acotar el estudio del impacto ambiental del proyecto se adoptó como AID un círculo cuyo baricentro coincide con el centro del predio y su radio alcanza hasta la Parroquia San Antonio distante a 3 km en línea recta. El área AII está constituida por un círculo más grande en el cual se pueden producir los impactos ambientales, socioculturales y económicos con la localidad más cercana en línea recta que es Ceres distante a 8 km (Figura 26).

Figura 26

Determinación de las áreas AID y All para el emprendimiento



Para llevar adelante el E.I.A, se consideró todos los factores indicados en el punto 2.5. Los resultados de los factores se muestran en la Tabla 39 y luego el valor de FC.

Tabla 39

Factores adoptados para la fórmula de categorización FC

ER	CA	R	D	Lo
Tipo 2: Sólidos/semisólidos: que pueden contener sustancias peligrosas o pueden generar residuos peligrosos. Valor = 6	Estándar 2 Valor = 5	Acústico/sustancias Químicas. Valor = 1	Potencia instalada > 500 HP Valor = 3	Zona industrial y rural Valor = 1

De la aplicación de la fórmula (3.3), resulta:

$$FC = 6 + 5 + 1 + 3 + 1 = 16 \text{ (segunda categoría)}$$

3.1.7.2 Determinación de la línea de base ambiental.

Medio biótico: En el medio biótico para la flora conviven árboles y arbustos de hojas caducas adaptadas al déficit hídrico con zonas con zonas de pastizales y pajonales. Para la fauna se destacan animales como las vizcachas, zorros iguanas, lechuzas, perdices, martinetas, armadillos, aguiluchos, cotorras, etc. También aunque en menor medida se pueden ver afectado el ganado con cría extensiva que esté por la zona.

Medio abiótico: Para el medio abiótico valen las consideraciones del punto 3.1. No existen bañados ni lagunas cerca. El aire de la zona es básicamente limpio por no estar cerca de una fábrica. Asimismo el nivel sonoro se puede considerar al nivel de una conversación (60 dBA). La orientación del viento es preferentemente del Este rotando hacia el Sur. Desde Enero hasta Agosto la velocidad promedio es de 10,9 km.h⁻¹. Luego asciende hasta mediados de Setiembre a 14,2 km.h⁻¹ para descender a finales de Noviembre a 12,5 km.h⁻¹. La radiación solar oscila en verano desde 6,7 a 7,6 kWh, Luego desciende hasta el comienzo de mayo con un valor de 4 kWh con un pico inferior en junio con 3,1 kWh para ascender en a principios de agosto al valor de mayo y tener un valor de 6,7 kWh en el final de Octubre (meteoblue.com). El paisaje es propio de la llamada zona del espinal.

Medio antrópico: Las ciudades más cercanas son Ceres y Hersilia. La población del departamento San Cristóbal tiene una población de 72.716 personas (INDEC, 2023). Convive la cría de ganado extensiva con parte de la cuenca lechera. En Hersilia existen dos bancos (Bco. Santa Fe y Bco. Nación), un hospital rural (SAMCO) y una escuela de educación primaria y secundaria. Mientras que en Ceres existen dos bancos, cuatro centros de salud y educación terciaria virtual a través de la Universidad Blas Pascal. También es posible realizar dos tecnicaturas: administración rural y programación a través una extensión áulica de la UTN Rafaela. Los empleos están relacionados básicamente a la agricultura, ganadería y lechería. La población indígena se concentra en un 70% en las zonas urbanas. Para los pobladores indígenas se toma el alcance del AI. Es decir las localidades de Ceres y La Isleta. En Ceres son 156 personas y está compuesta por Chanes, Kollas, Tobas y Tupí Guaraní. Mientras que en La Isleta no se contabilizan pobladores indígenas (INDEC, Censo 2010).

3.1.7.3 Lista de chequeo y naturaleza del impacto ambiental.

Las listas se muestran en las Tablas 40 y 41 respectivamente.

Tabla 40

Lista de chequeo para la identificación de componentes del sistema ambiental

Generación de energía (Cultivo y Planta de Biomasa) - Lista de Chequeo					
Actividades factibles de producir impacto	Componentes del Sistema Ambiental				
Etapas	Aire	Agua	Suelo	Factor Social	Descripción
1. Planificación					
Gestiones y trámites				X	Incorporación de energía no convencional en forma distribuida a cooperativas
Relevamiento topográfico y amojonamiento	X			X	Partículas en suspensión. Liberación de gases de escape. Generación de ruido
Contratación de mano de obra y capacitación				X	Incorporación de personal. Toma de conocimiento en aspecto técnicos y laborales
Movimiento vehicular	X			X	Afecta el aire por generación de material particulado. Liberación de gases de escape. Generación de ruido.
Cercado perimetral y cartelería			X	X	Modificación del paisaje. Ruido por colocación del cerco
Transporte de materiales y equipos	X		X	X	Partículas en suspensión. Impactos y cambios en la estructura del suelo. Contaminación Visual. Ruido. Gases de escape de vehículos
Depósito de materiales y equipos			X	X	Partículas en suspensión. Impactos y cambios en la estructura del suelo. Contaminación Visual. Ruido. Gases de escape de v
Instalación del obrador	X		X	X	Utilización de agua potable envasada. Utilización de productos de limpieza que puede afectar el agua y suelo. Impactos en la calidad del aire (MP). Generación de olores.
Sanitarios y vestuarios		X	X	X	Impactos y cambios en la estructura del suelo. Utilización de agua potable envasada. Empobrecimiento del paisaje.
2. Instalación					
Acondicionamiento del terreno (subsulado y vibrocultivación)			X	X	Impactos y cambios en la estructura del suelo. Eliminación de cobertura vegetal. Partículas en suspensión. Contaminación visual y auditiva.
Fertilización del terreno cultivable y sembrado para el 1º año de crecimiento del cardo			X	X	Partículas en suspensión. Ruido. Contaminación visual.
Movimiento de terreno para la			X	X	Impactos y cambios en la estructura del suelo. Impacto en

Generación de energía (Cultivo y Planta de Biomasa) - Lista de Chequeo					
plataforma de la Planta de Biomasa					calidad de aire (MP). Contaminación visual y auditiva
Construcción de la plataforma de la Planta de Biomasa			X	X	Impactos y cambios en la estructura del suelo. Impacto en calidad de aire (MP). Contaminación visual y auditiva
Instalación del depósito de biomasa. Ubicación de silos y depósito de maquinarias y equipos			X	X	Impactos y cambios en la estructura del suelo. Impactos en la calidad del aire (por uso de máquinas que funcionan con combustible fósil). Contaminación visual y auditiva.
Instalación de la nave de la Planta de Biomasa y los tanques para cenizas y el residuo líquido negro. Puesta a punto de la Planta		X	X	X	Impacto visual y en el suelo debido a la construcción de plataforma para la nave industrial. Ruido por obra civil de instalación de equipos. Impacto visual
Cosecha y resiembra para el primer año de producción de cardo			X	X	Impacto visual. Partículas en suspensión. Ruido
3. O&M					
Cosecha y recolección. Traslado al depósito de biomasa.	X		X	X	Partículas en suspensión. Ruido. Gases de escape del tractor.
Trabajo de trituración de la biomasa y trabajo propio de la planta	X		X	X	Generación de material particulado por tránsito de vehículo liviano en el predio. Impacto visual. Peligro de incendio en silo de material triturado
Traslado del líquido negro en camión cisterna a tratamiento y disposición final	X	X	X	X	Generación de material Particulado por tránsito de vehículo liviano en el predio. Impacto visual. Peligro por derrame de líquido residual
Traslado de cenizas en depósito cerrados	X		X	X	Generación de material particulado. Generación de residuos vegetales. Ruido. Impacto visual
4. Cierre y abandono					
Cierre y clausura de las instalaciones				X	Cese de actividad laboral del personal de O&M y de proveedores y contratistas
Desmantelamiento de infraestructura (retiro de máquinas y equipos; equipos auxiliares; tanques y depósitos. MCI)	X	X	X	X	Generación de material particulado. Ruido. Impacto visual. Cese de personal contratado
Recomposición del paisaje	X	X	X	X	Generación de material particulado. Ruido. Impacto visual

Generación de energía (Cultivo y Planta de Biomasa) - Lista de Chequeo					
(movimiento y nivelación de suelo; reforestación con arbustiva de la zona)					
Transporte	X		X	X	Movimiento de camiones para retiro de las instalaciones. Degradación de suelo. Transporte, con el consiguiente uso de combustibles fósiles. Ruidos molestos. Generación de MP.

Tabla 41

Lista de chequeo para la clasificación de componentes del sistema ambiental

Generación de energía (Cultivo y Planta de Biomasa) - Lista de Chequeo					
Actividades factibles de producir impacto	Componentes del Sistema Ambiental				
Etapas	Aire	Agua	Suelo	Factor Social	Descripción
1. Planificación					
Gestiones y trámites				(-)	Afecta el aire por generación de material particulado. Liberación de gases de escape. Generación de ruido
Relevamiento topográfico y amojonamiento	(-)			(+)	Incorporación de energía no convencional generada en forma distribuida a las Cooperativa de Hersilia y Selva
Contratación de mano de obra y capacitación				(+)	Incorporación de personal. Toma de conocimiento en aspecto técnicos y laborales
Movimiento vehicular	(-)			(+)	Afecta el aire por generación de material particulado. Liberación de gases de escape. Generación de ruido.
Cercado perimetral y cartelería			(-)	(+)	Modificación del paisaje. Ruido por colocación del cerco
Transporte de materiales y equipos	(-)		(-)	(+)	Generación de material particulado. Impactos y cambios en la estructura del suelo. Contaminación Visual. Ruido
Depósito de materiales y equipos			(-)	(+)	Generación de material particulado. Impactos y cambios en la estructura del suelo. Contaminación Visual. Ruido
Instalación del obrador	(-)		(-)	(+)	Generación de material particulado. Impactos y cambios en la estructura del suelo. Contaminación Visual. Ruido
Sanitarios y vestuarios		(-)	(-)	(-)	Impactos y cambios en la estructura del suelo. Utilización

Generación de energía (Cultivo y Planta de Biomasa) - Lista de Chequeo					
					de agua potable. Empobrecimiento del paisaje.
2. Instalación					
Acondicionamiento del terreno (subsulado y vibrocultivación)			(-)	(-)	Impactos y cambios en la estructura del suelo. Eliminación de cobertura vegetal. Generación de MP. Contaminación visual y auditiva.
Fertilización del terreno cultivable y sembrado para el 1º año de crecimiento del cardo			(-)	(-)	Cambio en la estructura superficial del suelo. Generación de material particulado. Ruido. Contaminación visual.
Movimiento de terreno para la plataforma de la Planta de Biomasa			(-)	(-)	Impactos y cambios en la estructura del suelo. Impacto en calidad de aire (MP). Contaminación visual y auditiva
Construcción de la plataforma de la Planta de Biomasa			(-)	(-)	Impactos y cambios en la estructura del suelo. Impacto en calidad de aire (MP). Contaminación visual y auditiva
Instalación del depósito de biomasa. Ubicación de silos y depósito de maquinarias y equipos			(-)	(-)	Impactos y cambios en la estructura del suelo. Impactos en la calidad del aire (por uso de máquinas que funcionan con combustible fósil). Contaminación visual y auditiva.
Instalación de la nave de la Planta de Biomasa y los tanques para cenizas y el residuo líquido negro. Puesta a punto de la Planta		(-)	(-)	(-)	Impacto visual y en el suelo debido a la construcción de plataforma para la Planta de Biomasa y los tanques. Generación de MP. Obstrucción de corrientes de aire. Ruido por el hormigonado. Posible contaminación de agua superficial por resto de cemento líquido.
Cosecha y resiembra para el primer año de producción de cardo			(-)	(-)	Impacto visual. Material particulado. Ruido ambiente de las maquinarias de cosecha, fertilización y siembra
3. O&M					
Cosecha y recolección. Traslado al depósito de biomasa.	(-)		(-)	(-)	Partículas en suspensión. Ruido. Gases de escape del tractor.
Trabajo de trituración de la biomasa y trabajo propio de la planta	(-)		(-)	(-)	Generación de material particulado por tránsito de vehículo liviano en el predio. Impacto visual. Peligro de incendio en silo de material triturado
Traslado del líquido negro en camión cisterna a tratamiento y	(-)	(-)	(-)	(-)	Generación de material particulado por tránsito de vehículo liviano en el predio. Impacto visual. Peligro por

Generación de energía (Cultivo y Planta de Biomasa) - Lista de Chequeo					
disposición final					derrame de líquido residual
Traslado de cenizas en depósito cerrados	(-)		(-)	(-)	Generación de material particulado. Generación de residuos vegetales. Ruido. Impacto visual
4. Cierre y abandono					
Cierre y clausura de las instalaciones				(-)	Cese de actividad laboral del personal de O&M y de proveedores y contratistas
Desmantelamiento de infraestructura (retiro de máquinas y equipos; equipos auxiliares; tanques y depósitos. MCI)	(-)	(-)	(-)	(-)	Generación de Mat. Particulado. Ruido. Impacto visual.
Recomposición del paisaje (movimiento y nivelación de suelo; reforestación con arbustiva de la zona)	(-)	(-)	(-)	(-)	Generación de material particulado. Ruido. Impacto visual
Transporte	(-)		(-)	(-)	Movimiento de camiones para retiro de las instalaciones. Degradación de suelo. Transporte, con el consiguiente uso de combustibles fósiles. Ruidos molestos. Generación de material particulado.

3.1.7.4 Generación de la matriz de impacto ambiental.

La tabla del cronograma de la vida útil del emprendimiento y las tablas de las matrices según los criterios se muestran en el Anexo C. El impacto ambiental de acuerdo a esos criterios se muestra en la Tabla 42.

Tabla 42

Resultado de la aplicación de los criterios de la Matriz de Impacto Ambiental

Resultados de aplicación de los Criterios de la Matriz de Impacto Ambiental					
Extensión		Duración		Reversibilidad	
Biótico	14	Biótico	39,8	Biótico	27,3
Abiótico	19	Abiótico	43,8	Abiótico	18,3
Antrópico	27	Antrópico	30,8	Antrópico	21,1

La importancia del impacto ambiental del proceso completo para la generación de energía eléctrica a partir de la gasificación de cardo usando la ecuación (2.8) es:

$$\text{Importancia} = W_e \times E + W_d \times D + W_r \times R = 84,2 \text{ (Severo)}$$

Valoración de impactos	
Bajo	1 - 30
Medio	31 - 61
Severo	61 - 92
Crítico	> 93

Para cada una de las etapas del proyecto los factores afectados del medio abiótico se muestran consecutivamente en las Figuras 27 y 28 respectivamente.

Figura 27

Afectación del medio abiótico en las etapas de planificación e instalación

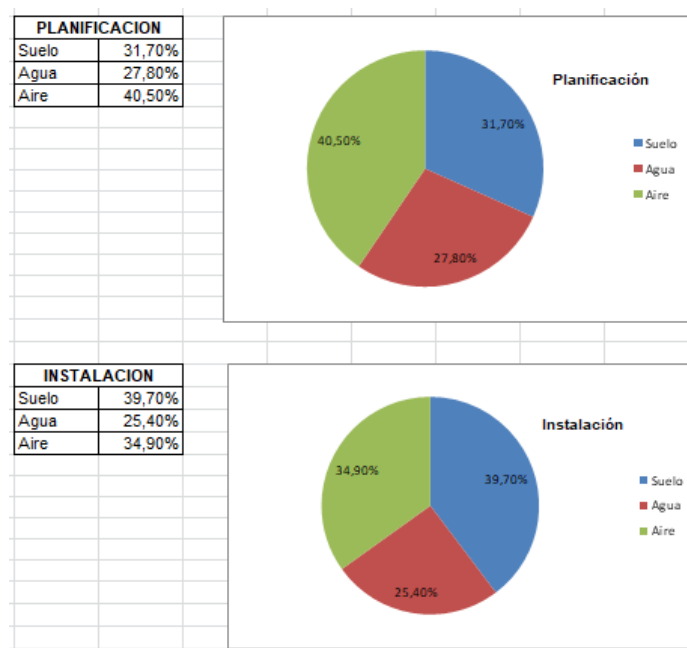
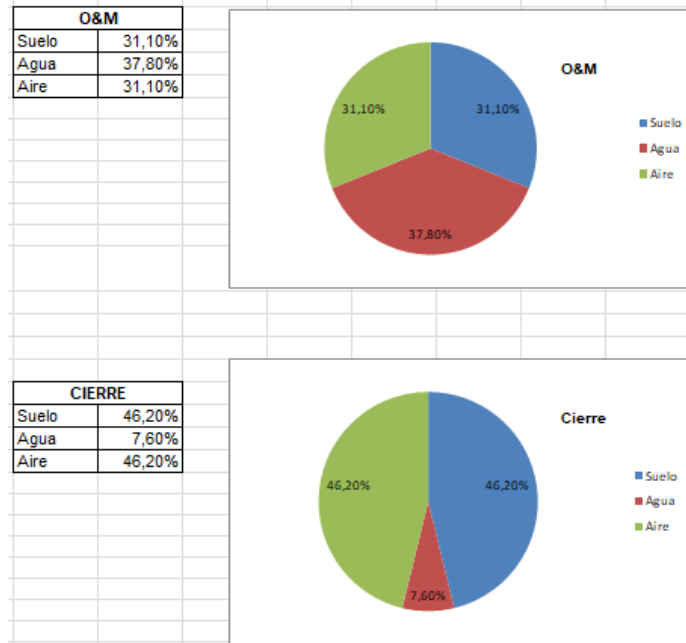


Figura 28

Afectación del medio abiótico en las etapas de O&M y cierre

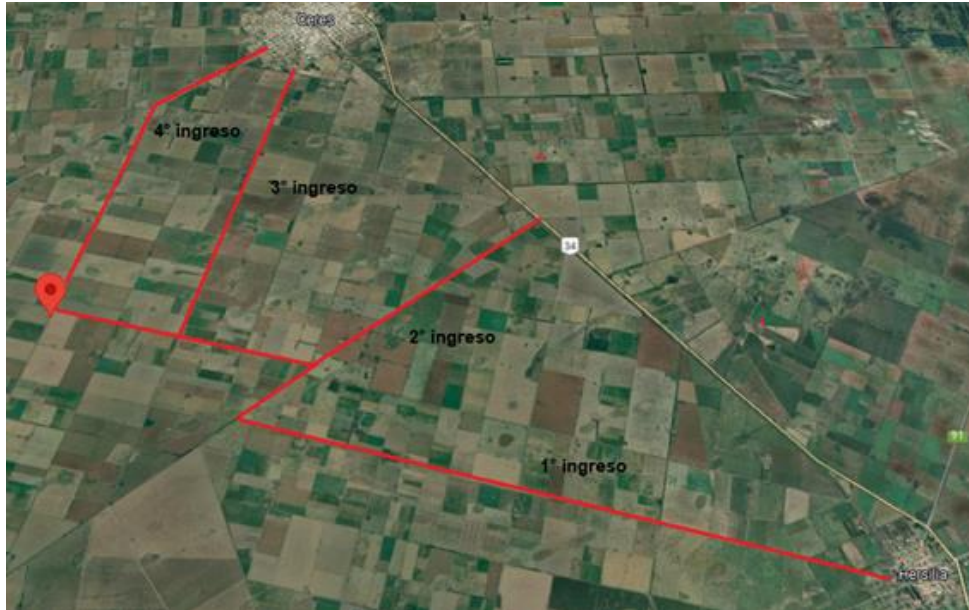


3.1.7.5 Plan de gestión ambiental y monitoreo.

Las entradas para la elaboración del plan de gestión ambiental se determinaron en los puntos 3.1.7.1 al 3.1.7.4. La identificación del sitio se encuentra en la Figura 19. La Figura 29 muestra el detalle de los ingresos.

Figura 29

Ingresos rurales al sitio de cultivo y planta de generación de energía del proyecto



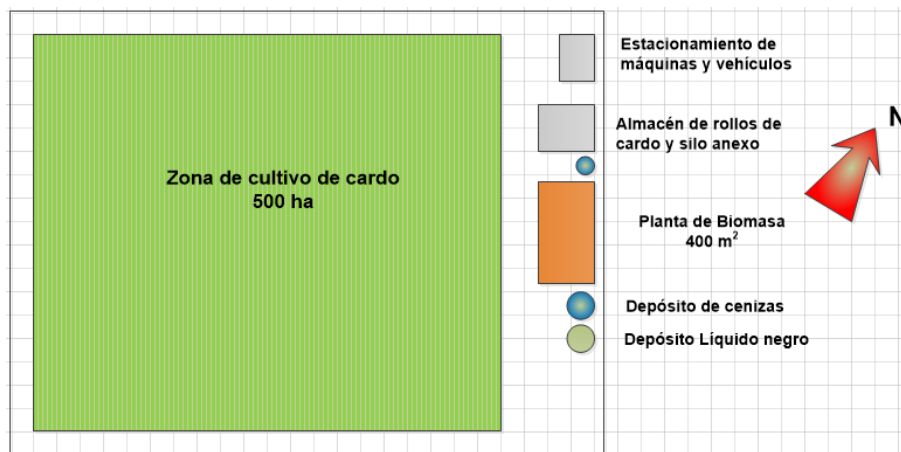
El principal es el camino rural constituido por la salida de Hersilia desde la Avenida San Antonio. Al próximo se accede desde la Ruta 34 camino hacia Ceres y los otros dos ingresos son caminos rurales; uno desde la continuación del Boulevard Gral. López en Ceres y el otro, desde la continuación de la Avenida Italia también en Ceres.

Estos ingresos están previstos para el ingreso de proveedores y contratista, como el personal que trabaja en la planta y por cualquier problema de seguridad o asistencia médica. Se tomó como primer ingreso el de Hersilia dada la conexión eléctrica establecida con la Cooperativa para el abastecimiento de energía.

La Figura 30 muestra el esquema del sitio con la zona de cultivo y la planta de biomasa con los servicios auxiliares.

Figura 30

Esquema del sitio con la zona de cultivo de cardo y la planta de biomasa con los servicios auxiliares



Para las actividades establecidas en la etapa de planificación se tomaron en cuenta:

- Actividades de riego dos veces al día sobre el ingreso principal para disminuir la producción de material particulado ocasionado por vehículos y transporte de materiales y equipos.
- Se estableció un ciclo de capacitación a técnicos y profesionales sobre el proceso y características de la generación eléctrica a base de gasificación de biomasa y sobre higiene y seguridad en el trabajo.
- El armado del obrador consistió en un contenedor con puerta y ventanas. Un sector para cambiarse y dos baños incorporados con baño químico que se retira todos los días mientras dura el trabajo de laboreo, fertilización y siembra del cardo y en forma paralela la obra civil de la plataforma de cemento para la nave industrial y los galpones correspondientes, además de los tanques depósito y el silo de biomasa.
- El cerco perimetral está constituido de postes y un alambrado de 7 hilos. El material particulado que provoca no es considerable dada la distancia considerada en el AID y la velocidad del viento citada en el punto 3.1.7.2. La cartelería describe el nombre del emprendimiento y los elementos de protección personal de uso obligatorio dentro del predio (protector visual, guantes de protección, protectores auditivos y mascarilla para el material particulado en suspensión).
- El depósito de los materiales y equipos para el cultivo del cardo y la obra civil de la planta industrial se colocan al costado de la zona de cultivo, identificada con cartelería y cinta de seguridad. Solo el personal autorizado puede ingresar y manipular elementos, materiales o equipos.

Para la etapa de instalación se tomaron en cuenta las siguientes actividades:

- El personal contratado posee todos los elementos de protección personal (EPP) para realizar la obra civil del cimiento de la planta industrial. Paralelamente se procede al cultivo del cardo según lo establecido en la Figura 3 (preparación del terreno y siembra) con el personal contratado a tal fin. El mismo cumple con todos los requisitos legales administrativos y de seguridad. El término de esta tarea el personal se retira hasta el aclareo y posterior cosecha.
- Una vez consolidado el cimiento para la nave industrial se construye el depósito de biomasa con la zona de trituración y el silo contiguo. El material es preensamblado para las paredes y el techo es de chapa a dos aguas.
- Para la nave industrial la construcción es de la misma forma con sectores diferenciados: gasificación, tren de limpieza y MCI. Luego se coloca el sector de los depósitos de cenizas y de líquido residual. Entre el depósito de biomasa y el sector de gasificador se dispone de una oficina pequeña con dos baños.
- Para el depósito de biomasa se contempla lo establecido en el decreto 351/79 de la ley 19587 de HST. El silo de biomasa contiene sensores de temperatura y humedad. La nave industrial también respeta lo establecido en el decreto 351/79, teniendo un extintor de incendio cada 15 metros de distancia entre sí, colocados cerca de los ingresos. Además el techo de la nave cuenta con sensores de humo en el sector de gasificación y en el sector del MCI y tableros.
- Por último con el responsable del emprendimiento y los profesionales y técnicos se realiza los ensayos para la puesta en marcha de la planta para determinar el correcto funcionamiento de todos los equipos que integran cada etapa del proceso.
- Todo el personal actuante y por contrato debe poseer sus EPP y demostrar que posee protección a través de una ART.

Para la etapa de O&M se tomaron en cuenta las actividades:

- La cosecha, enfardado y traslado al depósito de biomasa
- Trituración de la biomasa y depósito en silo a la espera de su utilización como materia prima al gasificador. El personal debe tener y utilizar los EPP adecuados (ropa de trabajo, anteojos de protección, protectores auditivos, mascarilla para material particulado y guantes de tela entramada).
- Gasificación y obtención de syngas por un lado y cenizas de fondo en la parte inferior del gasificador. Aquí el personal debe contar con los EPP adecuados
- Limpieza del syngas a través del tren de limpieza, obteniendo por un lado gas limpio de acuerdo a los parámetros para el ingreso al MCI, cenizas volantes y líquido residual obtenido desde el lavador de gases. El retiro de las cenizas volantes se realiza por vuelco en el depósito de cenizas, mientras que el retiro

del líquido negro residual se retira en un envase cerrado y se trasvasa mediante bombeo al depósito. Personal especializado contratado retira una vez por semana el líquido residual para su tratamiento y disposición final fuera del ámbito del emprendimiento. Tanto en el sector del gasificador como en la del tren de limpieza debe haber termómetros para medir la temperatura ambiente. El personal de ambos sectores debe estar convenientemente hidratado

- Para el funcionamiento del MCI el personal debe poseer los elementos de protección personal adecuados y para el riesgo eléctrico.

Para la etapa del cierre y abandono se tomaron en cuenta las siguientes actividades:

- Realizar las diligencias ante las autoridades y clientes para comunicar el cierre del emprendimiento. Realizar las actividades administrativas para el cese del personal de acuerdo a la legislación vigente en materia laboral.
- Realizar capacitación al personal que haya realizado la operación y mantenimiento del emprendimiento durante la vida útil a los efectos de que pueda tener una nueva inserción laboral
- Realizar el desmantelamiento de los equipos e instalaciones de la planta de biomasa. Realizar el desmonte del cerco perimetral y la cartelería.
- Proceder a la obra civil de eliminar la plataforma base de la nave industrial
- Recomponer la flora con especies arbustivas de la zona de crecimiento rápido

Para desplegar todas estas actividades en cada etapa según convengan se tuvo en cuenta los siguientes controles:

- Para el área de cultivo se respetan las normativas y resoluciones provinciales (programa responsable de uso de agroquímicos, Res MTySS 075/11 y Res MTySS 608/11). Para las obras de construcción se respeta el Decreto provincial 1172 y la Res MTySS 611/11 (<https://www.santafe.gov.ar>).
- Se considera un sistema de control de vectores de enfermedades y de especies de plagas según la Ley N° 4390 y Decretos Reglamentarios o la que en el futuro las reemplace.
- Se instrumenta un sistema adecuado de Gestión de Residuos Sólidos, explicitando las corrientes de desechos y su destino o disposición final.
- El establecimiento cuenta con un sector adecuadamente identificado y confinado destinado al almacenamiento de los envases llenos, en uso y vacíos de agroquímicos que sean utilizados en la conservación y preservación del grano. Los residuos que revistan las características de residuos peligrosos

están alcanzados por lo normado en el Decreto N° 1844/02 (En este caso, la acumulación de granos es pequeña y dos veces al año, como así los envases de fertilizantes).

- La medición de material particulado sedimentable se realiza de acuerdo a la Norma ASTM D 1739-89 y material particulado (PM10) según norma EPA N° 40 CFR. Pt 50 Appj.
- En cuanto a la calidad del aire (depósito de biomasa y zona de trituración) los parámetros son los establecidos por las Resoluciones 0177/03 y 0201/04 de la provincia de Santa Fe respectivamente. Para las emisiones del MCI a través de su chimenea se adopta lo normado por la Resolución 1049/12 de la Secretaría de Energía (<https://www.enre.gov.ar/>). La Tabla 43 muestra los parámetros para las emisiones en la chimenea del MCI. El Plan de monitoreo se muestra en la Tabla 44.

Tabla 43

Parámetros que debe cumplir el gas de escape a la salida del MCI

		NOx g/kWh	CO g/kWh	MP g/kWh	SO2 g/kWh	HC g/kWh
ETAPA 1 Hasta 01/01/2015	Fuel Oil	16	1,0	1,5	NE	1,0
	Gas Natural ●	7	9,0	0,5	NE	9,0
ETAPA 2 de 02/01/2015 en adelante		Los valores límites podrán ser reformulados al 02/01/2013, en función de los resultados de los monitoreos efectuados sobre estas unidades, en cumplimiento de lo establecido en el punto 3.1.				

● Se adoptan los valores para el GN.

Tabla 44

Plan de monitoreo del programa de control de los impactos negativos

Monitoreo	Responsable
Verificar que el plan de capacitación se haya realizado debidamente. Guardar los registros	Responsable del proyecto/Encargado de planta
Verificar que los convenios celebrados con el Municipio y la Cooperativa de Hersilia se lleven a cabo conveniente. Asimismo, los convenios celebrados con nosocomios o centros de primeros auxilios. Guardar documentación y	Responsable del proyecto/Encargado de planta

Monitoreo	Responsable
registros	
Verificar que el despliegue de materiales, máquinas y equipos dentro del predio se realice convenientemente y en tiempo. Llevar planilla de comentarios. Guardar documentación	Encargado de planta
Verificar que el estado del cerco perimetral y la cartelería externa e interna esté integra y legible. Documentar en planilla	Encargado de planta
Verificar que los equipos de obra civil y maquinarias y equipos sean dispuestos en el galpón transitorio en forma conveniente. Y retirados cuando su función termine. Documentar el estado y cese de las funciones	Encargado de planta
Verificar que el despliegue de preparación del terreno, sembrado y cosechado y los cuidados sobre granos y agroquímicos se desarrolle adecuadamente	Encargado de planta/Encargado de HST contratado
Verificar que el movimiento de la planta se desarrolle normalmente de acuerdo al proceso (cartelería de seguridad; cartelería de proceso; etc). Verificar que el sistemas de extracción de material pulverulento sedimentable producto de la trituración de la biomasa funcione correctamente	Encargado de planta/Encargado de HST contratado
Verificar que los dispositivos de seguridad contra incendio estén correctamente dispuestos y en funcionamiento (extintores; sensores de temperatura; sensores de humos, etc) según lo establecido en la norma IRAM 3528. Verificar que las condiciones establecidas en el Decreto 351/79 para la planta se lleven a cabo adecuadamente (iluminación, ventilación, temperatura, humedad, etc)	Encargado de planta/Encargado de HST contratado
Verificar que la disposición de los subproductos (agua caliente, cenizas para la industria cementera, etc) sea la correcta. Documentar la disposición. Guardar documentación	Encargado de planta/ Responsable del proyecto
Verificar que los insumos para el proceso estén a término. Llevar y guardar registros	Encargado de planta/Responsable del proyecto
Verificar que el residuo negro sea dispuesto y retirado por la empresa encargada de su tratamiento y disposición final. Guardar registro.	Encargado de planta/Responsable del proyecto
Verificar que el desmonte de los elementos del predio (elementos edilicios, equipos, aparatos auxiliares, tanques, tableros, etc) sea convenientemente realizado. Documentar y guardar documentos.	Encargado de planta/Responsable del proyecto

Monitoreo	Responsable
Verificar que la reforestación se lleva a cabo según lo establecido en el proceso. Documentar.	Encargado de planta
Cesar funcionamiento de tableros eléctricos y subestación. Documentar y guardar registros.	Encargado de planta/Responsable del proyecto/Técnico de la Cooperativa
Verificar que las condiciones de seguridad e higiene laboral se cumplan. Documentar periódicamente los resultados	Encargado de planta/Encargado de HST
Verificar que los convenios, contratos y asistencias técnico-comerciales se hayan celebrado y cerrado convenientemente. Guardar comprobantes	Responsable del proyecto

La presentación de la DIA y su renovación con toda su documentación sigue los lineamientos del Decreto 0101/03 – Anexo VI.

3.1.8 Resultados del análisis de la factibilidad económica del proceso

3.1.8.1 Inversiones.

Como inversiones se tomó en cuenta el costo del cultivo con el arrendamiento del campo, los insumos, el costo de las operaciones del cultivo del cardo, los costos del proyecto y los equipos de para la instalación de la nave industrial y la nómina del personal para el primer año. La Tabla 45 muestra las inversiones para el período cero y el primer bimestre del período 1.

Tabla 45

Total de Inversiones para el período 0 y el 1° bimestre del período 1

Rubros del proyecto	Periodo 0												Periodo 1	
	Mes 1	Mes 2	Mes 3	Mes 4	Mes 5	Mes 6	Mes 7	Mes 8	Mes 9	Mes 10	Mes 11	Mes 12	Mes 1	Mes 2
(1) Arrendamiento del terreno en el sitio elegido														
(2) Alquiler de maquinarias agrícolas y mano de obra para la preparación del terreno, fertilización y siembra														
(3) Compra de insumos para la fertilización y siembra del cardo.														
(4) Contratación para la obra civil de la instalación de la planta industrial. Compra de equipos y mobiliario de oficina y vehículos														
(5) Compra de equipos para el proceso de tratamiento de la biomasa y gasificación, limpieza del gas y generación de energía														
(6) Contratación para la instalación de servicio asociados														
(7) Compra de equipos para el retiro de cenizas y líquido residual														
(8) Traslado del equipamiento al sitio del proyecto														
(9) Obra civil para instalación del equipamiento en la nave industrial y puesta en marcha														
(10) Alquiler de maquinarias agrícolas para la cosecha, enfarfado y traslado de la biomasa al depósito														
	USD1.522.167,6													

3.1.8.2 Activos tangibles e intangibles.

Las Tablas 46 y 47 muestran los cuadros resúmenes de los activos tangibles e intangibles respectivamente.

Tabla 46

Cuadro resumen de los activos tangibles

Conceptos	Aportes propios (U\$D)	Financiamiento (U\$D)	Total (U\$D)
Terreno (arrendamiento)		3.652,20	3.652,20
Equipamiento		956.388	956.388
Obra civil		95.900	95.900
Infraestructura industrial		190.484	190.484
Insumos para el cultivo (semillas + fertilizante)		104.786,20	104.786,20
Vehículos	38.429		38.429
Mobiliario	4.270		4.270
Total			1.393.909,40

Tabla 47

Cuadro resumen de los activos intangibles

Conceptos	Aportes propios (U\$D)	Financiamiento (U\$D)	Total (U\$D)
Ingeniería del proyecto	11.250		11.250
Estudio de impacto ambiental	4.000		4.000
Licencias y permisos		15.000	15.000
Gestión y administración	2.050		2.050
Seguros e impuestos		10.000	10.000
Total			42.300

3.1.8.3 Capital de trabajo.

La Tabla 48 muestra el cuadro resumen del Capital de Trabajo.

Tabla 48

Cuadro resumen del Capital de Trabajo

Capital de Trabajo (1° año)	Total (U\$D)	Capital de Trabajo (2° año)	Total (U\$D)
Materias primas	0	Materias primas	0
Insumos	104.786,20	Insumos	27.418,30
Nómina	58.111,30	Nómina	18.158.061
Gastos generales	3.500	Gastos generales	3.500
Total	166.487,50	Total	49.076,40

3.1.8.4 Análisis de depreciación y valor de rescate.

Para el análisis de depreciación se adoptó el método de depreciación lineal, es decir que los bienes prestan sus servicios de modo uniforme. La vida útil del emprendimiento es de 15 años, esto coincide con la vida útil del rendimiento del cultivo, con la mayoría de la vida útil de los equipos a excepción de la obra civil que supera esa cantidad. Los trabajos de reparación y mantenimiento se realizan cuando la planta ha trabajado durante su período anual de 8000 horas. No se consideraron otros equipos como bombas o sopladores de reemplazo o incluso un MCI en paralelo como sería en caso de ser un proyecto de planta. El análisis de depreciación y valor de rescate para un período se muestra en la Tabla 49.

Tabla 49*Cuadro de Depreciación y Valor de Rescate*

Vida útil emprendimiento (15 años)	Inversión (USD)	Depreciación (USD)	Valor de rescate (USD)
Equipamiento	956.388	47.819,40	191.277,60
Obra civil	95.900	4.795	19.180
Vehículos	38.429	1.291,45	7.685,80
Capital de trabajo			
Estudio de impacto ambiental			
Infraestructura industrial	104.786,20		
Mobiliario	4.270	213,5	854
Inversión total por período	1.199.773,20	54.119,35	218.997,40
Depreciación		Total	Vida útil estimada (años)
Equipamiento		47.819,40	15
Obra civil		4.795	25
Vehículos		1.291,45	15
Mobiliario		213,5	15
Total		54.119,35	

Para el caso de la vida útil de emprendimiento (15 años) los valores de depreciación y rescate, se muestran en la Tabla 50. En dicha tabla se le ocultó una serie de columnas para que se puedan ver correctamente los valores.

Tabla 50*Depreciación y valor de rescate a través de la vida útil del emprendimiento*

Vida útil emprendimiento (15 años)	Periodo 0	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Periodo 14	Periodo 15		
	2023	2024	2025	2026	2037	2038	Depreciación (USD)	Valor de rescate (USD)
Inversiones	Valores (USD)						47819,4	191277,6
Equipamiento	956388						4795	19180
Obra civil	95900						1291,45	7685,8
Vehículos	38429						213,5	854
Capital de trabajo								
Estudio de impacto ambiental								
Infraestructura industrial	104786,2							
Mobiliario	4270							
Inversión total por periodo	1199773,2							
Depreciación							Total	Vida útil estimada (años)
Equipamiento		47819,4	47819,4	47819,4	47819,4	47819,4	191277,6	15
Obra civil		4795	4795	4795	4795	4795	19180	15
Vehículos		1291,45	1291,45	1291,45	1291,45	1291,45	7685,8	15
Capital de trabajo								
Estudio de impacto ambiental								
Infraestructura industrial								
Mobiliario		213,5	213,5	213,5	213,5	213,5	854	15
Subtotal		54119,35	54119,35	54119,35	54119,35	54119,35	218997,4	

3.1.8.5 Costos de operación.

Respecto de los costos de operación, la planta de gasificación de biomasa trabaja 8000 horas.año⁻¹ en 3 turnos, el resto de los días del año están dedicados a las tareas de reparación y mantenimiento. Estos costos están compuestos por los insumos, la nómina de personal y los servicios. La Tabla 51 muestra un resumen para la vida útil del emprendimiento.

Tabla 51

Costos de operación en base anual

Conceptos/año	Insumos	Nómina	Servicios	Servicios (o)	Costos de operación (USD)
1	27.418,30	58.111,30	94.320	9.120	198.089,60
2	17.642	181.580,61	125.280	10.080	344.662,10
3	17.642	181.580,61	125.280	10.080	344.662,10
4	17.642	181.580,61	125.280	10.080	344.662,10
5	17.642	181.580,61	125.280	10.080	344.662,10
6	17.642	181.580,61	125.280	10.080	344.662,10
7	17.642	181.580,61	125.280	10.080	344.662,10
8	17.642	181.580,61	125.280	10.080	344.662,10
9	17.642	181.580,61	125.280	10.080	344.662,10
10	17.642	181.580,61	125.280	10.080	344.662,10
11	17.642	181.580,61	125.280	10.080	344.662,10
12	17.642	181.580,61	125.280	10.080	344.662,10
13	17.642	181.580,61	125.280	10.080	344.662,10
14	17.642	181.580,61	125.280	10.080	344.662,10
15	17.642	181.580,61	125.280	10.080	344.662,10

Los insumos son superiores en el primer año dado que la cantidad de semillas es de $5\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ y para el 2° año en adelante es de solo $1\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$. Con el fertilizante sucede algo similar. Los servicios tercerizados y los servicios operativos son menores en el primer año, dado que la planta todavía no está operativa, sino a partir del segundo año.

3.1.8.6 Ingresos del proyecto.

El emprendimiento posee dos escenarios. Para el primero solo se consideró solo el aporte de energía eléctrica en BT a las Cooperativas de Hersilia (Sta. Fe) y Selva (Stgo. del Estero). El aporte de energía calórica para generar vapor, el aire comprimido o bien al agua caliente para tambos aledaños y las cenizas volantes para la industria cementera o para fertilizante no se consideraron por cuanto no se ha desarrollado en el presente trabajo la infraestructura para su explotación. Para este caso, se adoptaron tres contextos diferentes: el valor de la potencia eléctrica promedio regional, el valor de la potencia eléctrica en Argentina y un valor medio entre los dos anteriores. En la Tabla 32 se mostró la demanda de ambas cooperativa y su relación al funcionamiento anual de la planta de generación de energía, mientras que la Tabla 52 muestra el promedio regional adoptado.

Tabla 52

Valor promedio de referencia del MWh a noviembre 2023

Pais	Industrial (USD/MWh)	Residencial (USD/MWh)
Uruguay	134	282
Chile	132	163
Brasil	124	211
Argentina	87	56
Paraguay	38	55
Totales	515	767
Promedios	103	153,4
Promedio total		128,2

Nota: Tabla 52, valor promedio de referencia del MWh a Noviembre 2023. Tomado de Segingenieria. <https://www.segingenieria.com>

3.1.8.7 Análisis del flujo de fondo y cálculo de tasas (VAN, TIR y Repago).

El análisis del flujo de fondo se realizó tomando en cuenta los 15 años de vida útil del emprendimiento. La tasa de corte estándar es del 12% para este tipo de emprendimientos. La Tabla 53 muestra los flujos de fondo constantes para el período indicado.

Tabla 53

Cuadro resumen de inversión, ingreso neto y flujo de fondo

emprendimiento 15 años	Período 0 2023	Período 1 2024	Período 2 2025	Período 3 2026	Período 10 2033	Período 11 2034	Período 12 2035	Período 13 2036	Período 14 2037	Período 15 2038
Inversión (Activos fijos + Ac. Intangibles + Cap. De trabajo)	1526139									
Depreciación		54119,35	54119,35	54119,35	54119,35	54119,35	54119,35	54119,35	54119,35	54119,35
Gastos operativos	188969,6	334582,61	334582,61	334582,61	334582,61	334582,61	334582,61	334582,61	334582,61	334582,61
Ingresos por ventas		671383	671383	671383	671383	671383	671383	671383	671383	671383
Utilidad marginal		282681,04	282681,04	282681,04	282681,04	282681,04	282681,04	282681,04	282681,04	282681,04
Impuestos (3%)		22850,06	22850,06	22850,06	22850,06	22850,06	22850,06	22850,06	22850,06	22850,06
Ingresos netos		259830,98	259830,98	259830,98	259830,98	259830,98	259830,98	259830,98	259830,98	259830,98
Inversión; ingresos netos + depreciación	-1715108,6	313950,33	313950,33	313950,33	313950,33	313950,33	313950,33	313950,33	313950,33	313950,33
	-\$ 1.715.108,60	\$ 280.312,80	\$ 250.279,30	\$ 223.452,20	\$ 101.078,66	\$ 90.253,22	\$ 80.582,73	\$ 71.949,20	\$ 64.240,62	\$ 57.357,20

En el primer contexto utilizando el precio de $USD128,2.MWh^{-1}$ y las ecuaciones (2.8) y (2.9) para una tasa de corte del 12% sin financiación los valores de VAN, TIR y PR se muestran en la Tabla 54.

Tabla 54

Cuadro resumen de TIR, VAN y Período de Repago a un valor de $USD128,2 MWh^{-1}$ sin financiación

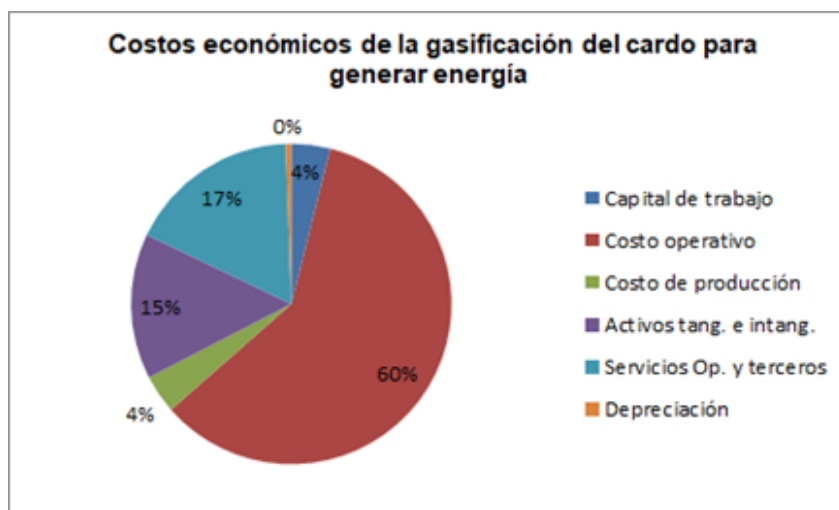
emprendimiento 15 años	Período 0 2023	Período 1 2024	Período 2 2025	Período 3 2026	Período 10 2033	Período 11 2034	Período 12 2035	Período 13 2036	Período 14 2037	Período 15 2038
Inversión (Activos fijos + Ac. Intangibles + Cap. De trabajo)	1526139									
Depreciación		54119,35	54119,35	54119,35	54119,35	54119,35	54119,35	54119,35	54119,35	54119,35
Gastos operativos	188969,6	334582,61	334582,61	334582,61	334582,61	334582,61	334582,61	334582,61	334582,61	334582,61
Ingresos por ventas		671383	671383	671383	671383	671383	671383	671383	671383	671383
Utilidad marginal		282681,04	282681,04	282681,04	282681,04	282681,04	282681,04	282681,04	282681,04	282681,04
Impuestos (3%)		22850,06	22850,06	22850,06	22850,06	22850,06	22850,06	22850,06	22850,06	22850,06
Ingresos netos		259830,98	259830,98	259830,98	259830,98	259830,98	259830,98	259830,98	259830,98	259830,98
Inversión; ingresos netos + depreciación	-1715108,6	313950,33	313950,33	313950,33	313950,33	313950,33	313950,33	313950,33	313950,33	313950,33
	-\$ 1.715.108,60	\$ 280.312,80	\$ 250.279,30	\$ 223.452,20	\$ 101.078,66	\$ 90.253,22	\$ 80.582,73	\$ 71.949,20	\$ 64.240,62	\$ 57.357,20
		-\$ 1.434.795,80	-\$ 1.184.516,50	-\$ 961.064,30	\$ 58.591,42	\$ 148.844,64	\$ 229.427,37	\$ 301.376,57	\$ 365.617	\$ 422.974,39
Tasa de descuento	12%									
TIR	12,96%									
VAN	\$ 422.974,39									
Período de recuero	10									

Para la vida útil del proceso establecida en 15 años, los distintos tipos de costos (producción y operación), los servicios (operativos y de terceros), los

activos fijos tangibles e intangibles y el costo de capital (incluidos los insumos y la nómina) se muestran en la Figura 31.

Figura 31

Costos económicos de la gasificación del cardo común para generar energía



Para los otros dos contextos sin financiación la Tabla 55 muestra las variaciones de los indicadores citados anteriormente. En el primer contexto el valor de la TIR supera la tasa de corte

Tabla 55

Variaciones del VAN y la TIR en función del precio del MWh sin financiación

Mercado	Precio MWh (U\$D)	VAN (Miles de U\$D)	TIR (%)
Regional	128,2	422,97	12,96
Argentina	71,5	-1459,9	-17,81
Valor medio	99,85	587,85	-6,93

Para el segundo escenario se consideró un préstamo bancario de U\$D1.000.000 como financiación sobre la inversión inicial (U\$D1.715.108,6). La Tabla 56 muestra los resultados. Se adoptó una tasa de interés de 11,6%.

Tabla 56

Cuadro resumen de TIR, VAN y Período de Repago a un valor de U\$D128,2. MWh⁻¹ con financiación

emprendimiento 15 años	Período 0 2023	Período 1 2024	Período 2 2025	Período 3 2026	Período 10 2033	Período 11 2034	Período 12 2035	Período 13 2036	Período 14 2037	Período 15 2038
Inversión (Activos fijos + Ac. Intangibles + Cap. De trabajo)	1526139									
Depreciación		54119,35	54119,35	54119,35	54119,35	54119,35	54119,35	54119,35	54119,35	54119,35
Gastos operativos	188969,6	334582,61	334582,61	334582,61	334582,61	334582,61	334582,61	334582,61	334582,61	334582,61
Ingresos por ventas		671383	671383	671383	671383	671383	671383	671383	671383	671383
Utilidad marginal		282681,04	282681,04	282681,04	282681,04	282681,04	282681,04	282681,04	282681,04	282681,04
Impuestos (3%)		22850,06	22850,06	22850,06	22850,06	22850,06	22850,06	22850,06	22850,06	22850,06
Ingresos netos		259830,98	259830,98	259830,98	259830,98	259830,98	259830,98	259830,98	259830,98	259830,98
Inversión; ingresos netos + depreciación	-1715108,6	313950,33	313950,33	313950,33	313950,33	313950,33	313950,33	313950,33	313950,33	313950,33
	-\$ 1.715.108,60	\$ 280.312,80	\$ 250.279,30	\$ 223.452,20	\$ 101.078,66	\$ 90.253,22	\$ 80.582,73	\$ 71.949,20	\$ 64.240,62	\$ 57.357,20
Préstamo bancario	\$ 1.000.000,00									
Reembolso préstamo		\$ 182.666,67	\$ 66.666,67	\$ 66.666,67	\$ 66.666,67	\$ 66.666,67	\$ 66.666,67	\$ 66.666,67	\$ 66.666,67	\$ 66.666,67
Flujo de Fondo neto	-\$ 715.108,60	\$ 131.283,66	\$ 247.283,66	\$ 247.283,66	\$ 247.283,66	\$ 247.283,66	\$ 247.283,66	\$ 247.283,66	\$ 247.283,66	\$ 247.283,66
Tasa de descuento	12%									
TIR	24,50%									
VAN	\$ 865.512,50									
Período de recupero	5									
Tasa de interés	11,60%									

La Tabla 57 muestra la variación del VAN y la TIR en los 3 contextos con financiación

Tabla 57

Variaciones del VAN y la TIR en función del precio del MWh con financiación

Mercado	Precio MWh (U\$D)	VAN (Miles de U\$D)	TIR (%)
Regional	128,2	865,5	24,5
Argentina	71,5	-1156,86	-14,11
Valor medio	99,85	-145,7	-1,78

De las Tablas 54 a 57 se observa que al utilizar financiación en un 58% aproximadamente de la inversión inicial, los valores del VAN y la TIR prácticamente se duplicaron, mientras que el período de recuperación (PR) se redujo a la mitad. La Tabla 58 muestra un resumen.

Tabla 58

Resumen de la variación del VAN, TIR y PR respecto del precio de la potencia eléctrica con y sin financiación

Análisis económico-financiero sin financiación			
USD.MWh ⁻¹	VAN (Miles deUSD)	TIR (%)	PR (años)
128,2	422974,39	12,96	10
75,1	-1459980,65	-17,81	
99,85	-587850,9	-6,23	
Análisis económico-financiero con financiación			
USD.MWh ⁻¹	VAN (Miles deUSD)	TIR (%)	PR (años)
128,2	865512,5	24,5	5
75,1	-1156857,5	-14,11	
99,85	-145675,95	-1,78	

Para el *Análisis de Sensibilidad* se adoptó como variables el precio de la potencia eléctrica y la inversión. El rango de variación del precio de la potencia eléctrica se tomó ± 10 y $\pm 20\%$ y para la variación de la inversión ± 5 y ± 10 respectivamente. La Figura 32 muestra la variación de los indicadores en relación con el precio de la potencia eléctrica. La Figura 33 muestra la variación de los indicadores en relación a la variación de la inversión.

Figura 32

Variación del VAN y la TIR respecto del precio de la energía eléctrica

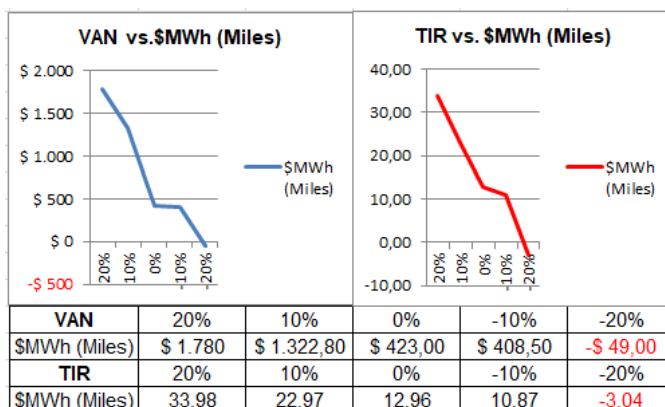
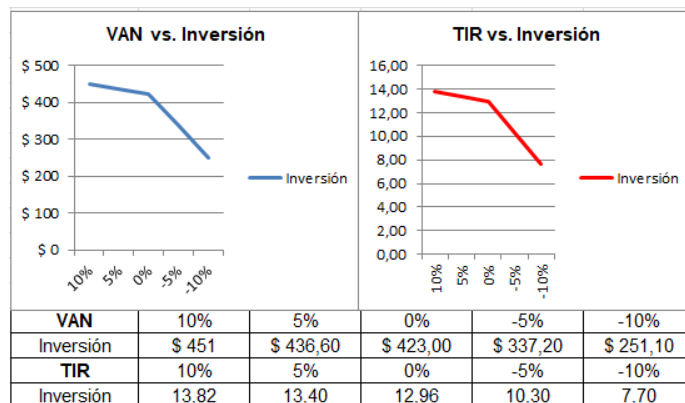


Figura 33

Variación del VAN y la TIR en relación a la variación de la inversión



La Figura 32 muestra que para una reducción del 20% en el precio del MWh el valor del VAN es negativo, mientras que la TIR tiene valores por debajo de la tasa de corte cuando el precio del MWh desciende en un 10 y un 20%. La Figura 33 muestra que con la reducción de la inversión no da valores negativos del VAN, mientras que la TIR tiene valores por debajo de la tasa de corte.

3.2 Discusión

Aquí se abordó lo planteado y realizado en el presente trabajo y se comparó con otros trabajos, características y parámetros similares. Dado que no se ha podido llevar a cabo pruebas experimentales en cada etapa del proceso de generación de energía eléctrica por gasificación, se utilizaron datos secundarios provenientes de la información disponible tanto del origen en el cual se explota el cardo común como fuente de biomasa, como de la escasa bibliografía local. Sin embargo, este análisis permitió determinar las condiciones y características de la planta del *C. cardunculus* L. su clima y tipo de suelo, etc. Comparando los datos y usando el mapa de potencial bioeconómico de la Argentina y los mapas de Falasca y Ulberich (2007), se pudo establecer el sitio de ubicación del cultivo dentro de la zona de secano argentina, determinándose un punto en el Departamento San Cristóbal de la provincia de Santa Fe, distante a unos 16 km de la localidad de Hersilia (Santa Fe) y a 21 km de la localidad de Selva (Santiago del Estero) a cuyas cooperativas de servicios eléctricos se pretende proveer de electricidad. Esto cumple con el primer objetivo planteado.

Para determinar si el balance energético del cultivo del cardo es positivo, el trabajo abarcó desde la preparación del terreno para su plantación hasta su cosecha y traslado a la planta de generación de energía. Para los cálculos se tomaron valores de labores agrícolas convencionales tal como se realiza en la producción de biomasa a partir de cardo común en sus lugares de origen. Para el

punto de partida se usó el material de investigación de Cravero et al., (2012). Las condiciones iniciales fueron de una cantidad de fertilizante (urea) de $150 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ y una producción de $15.000 \text{ plantas}\cdot\text{ha}^{-1}$ (Fernandez, 2006). Las precipitaciones en la zona de cultivo fueron de $872,26 \text{ mm}$ anuales y un rango de temperatura de $-1,02^\circ\text{C}$ a $42,97^\circ\text{C}$ y un pH del suelo entre 5,4 y 8,4. La bibliografía disponible establece un rango de temperaturas entre -5°C y 40°C y un pH de suelo entre 6,7 y 8,3. El rendimiento de biomasa fresca calculado fue de casi $9 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ ($8.895 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) con un peso de $1.699,7 \text{ g}\cdot\text{planta}^{-1}$ y la biomasa seca obtenida fue $8 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ ($8,077 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$). El rendimiento promedio según bibliografía es de unas $15 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$. El rendimiento energético (PCI) obtenido fue de $3.795 \text{ kCal}\cdot\text{kg}^{-1}$ ($15,9 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$), mientras otros estudios muestran valores entre 15 a $16 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Fernandez y Curt, 2005) y 15 y $17 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Piscioneri et al., 2000 y Fernandez, 2006). También se comparó las zonas de secano de origen con la zona de secano argentina. El rendimiento energético por hectárea fue de $16,4 \text{ MWh}\cdot\text{ha}^{-1}$.

El balance energético calculado para el cultivo del cardo común para su uso como fuente de energía fue de 6,8 similar al del trigo (6,9) y superior al de la soja (2,45). Este último cereal utilizado para fabricar biodiesel. Lamentablemente no se dispuso de datos para contrastar el valor obtenido con uno del cardo en su lugar de origen. De este modo se cumplió con el segundo objetivo planteado.

Para llevar adelante la generación de energía, se planteó su trituración, gasificación y limpieza del syngas obtenido para su ingreso a un MCI obteniendo electricidad a su salida. Como subproductos se obtuvo energía térmica en forma de calor, el que puede ser utilizado para calentar agua para uso en tambos próximos o bien obtener vapor para su venta a industrias cercanas o transformarlo en fuente de energía incluso para la propia planta. Otros subproductos fueron ceniza y biochar. La ceniza puede ser usada en la industria cementera o como parte de productos para fertilización. El biochar constituido por un líquido negro residual, se debe enviar a tratamiento y disposición final. Los valores de los flujos alcanzados fueron de $1,066 \text{ MWh}$ y $1,575 \text{ MWh}$ respectivamente para una producción de la planta de $8000 \text{ h}\cdot\text{año}^{-1}$. Con el valor de potencia eléctrica es posible abastecer en forma distribuida a dos cooperativas de servicios eléctricos cercanas. El valor teórico de caudal de gasificación fue de $2,04 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$. Este valor guarda relación con el informado por la FAO (entre $2,5$ y $3 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$) para biomasa sin especificar en un gasificador del tipo downdraft como el utilizado en el presente trabajo. No se puede comparar la potencia final generada con otros emprendimientos similares dada las características del MCI elegido según su marca y modelo. Para la potencia obtenida el caudal de cardo común se calculó en $470 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$. El consumo de agua por MWh generado fue de $0,63 \text{ m}^3\cdot\text{MWh}^{-1}$. Este valor es inferior al consumido por una planta de cogeneración a GN usando torres de refrigeración. Para el caso de una usina eléctrica convencional a carbón el consumo promedio de agua es de $1,78 \text{ m}^3\cdot\text{MWh}^{-1}$ (Tabla 39). El proceso

utilizado no usó equipamiento como calderas y condensadores que encarecen el mantenimiento. Estos resultados corresponden al tercer objetivo planteado.

La emisión de CO₂ para el cultivo del cardo común arrojó un valor de 173 kgCO₂.ha⁻¹, mientras que para la soja ese valor es de 224 kgCO₂.ha⁻¹. Tomando el valor energético del cardo (15,9 MJ), la emisión de CO₂ calculada es de 1,21 gCO₂.MJ⁻¹. En contraste, la Secretaría del Medio Rural y Producción Ecológica de Andalucía en 2010 (Sanz Pagés, 2010) publicó un valor de 1,437 gCO₂.MJ⁻¹. La emisión de CO₂ para la planta de generación de energía arrojó un valor de 0,52 kgCO₂.MWh⁻¹. No se encontró un valor para una planta de generación de energía de estas características en el lugar de origen del cardo común. Los valores teóricos calculados con el uso de un MCI dieron un resultado de emisión de CO₂ holgadamente menor que con el uso de gas oil y de GN respectivamente. Respecto a la captura de CO₂ como factor relacionado a su emisión, no se pudo encontrar datos de la captura de CO₂ del cardo a través de la fotosíntesis y que se puedan comparar con la de otros cultivos del tipo C3 o C4. Con estos resultados se cumplió con el cuarto objetivo planteado.

Los costos en el proceso del cultivo del cardo común para los insumos fue de USD27.t⁻¹. Para las labores en el terreno y la siembra fue de USD32,43.t⁻¹, mientras que para la cosecha y actividades posteriores el costo fue de USD40,65.t⁻¹. Estos costos en el estudio de Christou et al., (2009), para el cardo en distintos países de origen se muestran en las Tablas 59 y 60 respectivamente. Los costos están referidos a € por tonelada seca (dt).

Tabla 59

Labores de cultivo del cardo común (€/dt)

	FRANCE	GREECE	ITALY	SPAIN
<i>Cynara cardunculus L.</i>				
Annual Equivalent Yield	15,0	15,0	9,4	15,0
PRODUCTION				
Land	7,83	10,87	24,28	8,70
Labour	5,29	2,57	9,71	2,91
Equipment	2,55	2,53	5,01	2,69
Raw materials ⁽¹⁾	12,84	12,90	21,80	13,64
Total	28,51	28,87	60,80	27,94

Tabla 60

Costos de producción (€/dt) para distintos países del mediterráneo

	FRANCE	GREECE	ITALY	SPAIN
<i>Cynara cardunculus L. (Bales)</i>				
Large Scale				
Harvesting & Storage	13,99	10,13	17,84	9,44
Transport	4,51	5,20	4,77	4,98
Total	18,50	15,33	22,61	14,42
Medium Scale				
Harvesting & Storage	13,99	10,13	17,84	9,44
Transport	3,69	4,27	3,91	4,11
Total	17,67	14,41	21,74	13,55
Small Scale				
Harvesting & Storage	20,13	14,33	24,20	12,97
Pelleting	19,32	19,32	19,32	19,32
Transport	13,07	15,41	13,92	14,99
Total	52,52	49,06	57,44	47,28

Realizando la comparación entre estos datos y los obtenidos en el presente trabajo, se construyó la Tabla 61.

Tabla 61

Comparación de costos del cultivo del cardo entre el estudio de Christou et al., (2009) y el presente trabajo

Costos de cultivo del cardo	Proyecto (U\$D)	Francia (U\$D)	Grecia (U\$D)	Italia (U\$D)	España (U\$D)
Preparación y siembra	32,43	31,3*	31,67*	66,7*	30,65*
Cosecha y traslado	40,65	57,61*	53,82*	63,01*	46,38*

*Valores convertidos a dólares (1€ = 1,097U\$D)

De la Tabla 61 se observa que los datos para la preparación y siembra y para la cosecha y traslado del presente trabajo guardan relación con los datos para Francia, Grecia y España. No así para Italia, que son superiores en ambos casos.

El estudio citado también abordó el costo de inversión para una planta encendida con cultivos energéticos. La Tabla 62 muestra los valores. Se observa que del costo total de inversión, los subsidios constituyen el 40% y los créditos el 35% respectivamente, mientras que en el presente trabajo se consideró solamente el aporte de un crédito bancario de aproximadamente el 58% de la inversión inicial.

Tabla 62

Costos de inversión (€/dt) de una planta encendida con cultivos energéticos

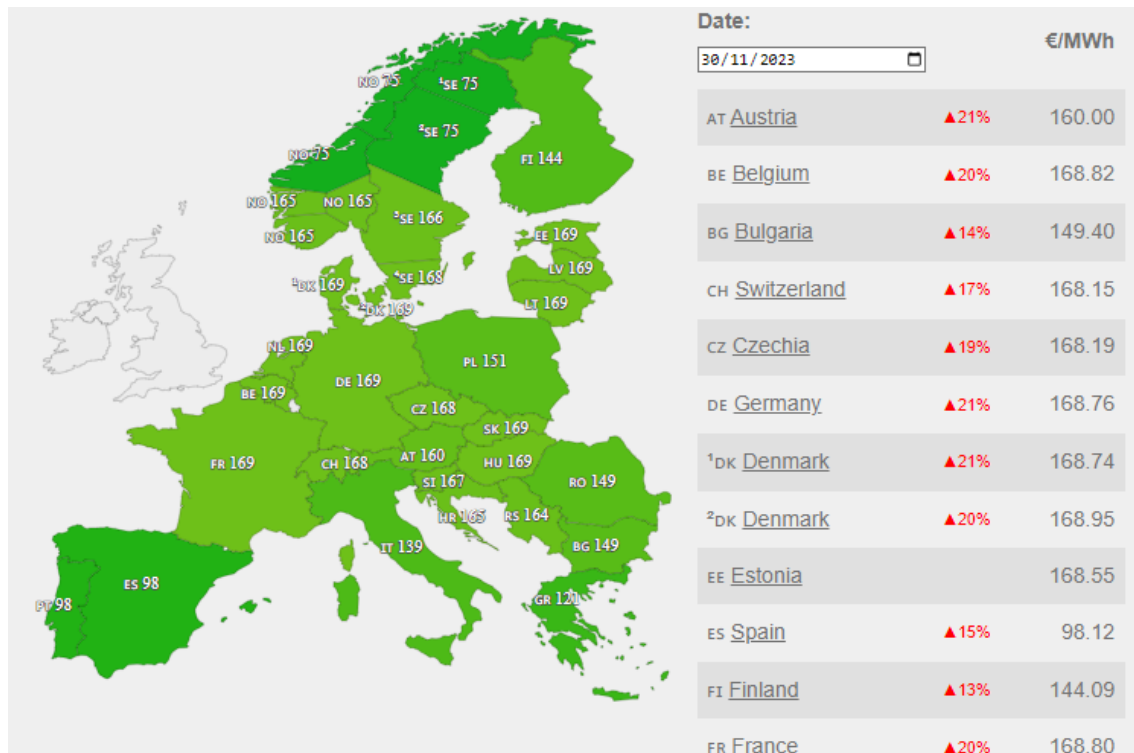
Parameter (unit)	Values
Specific Investment Cost (€/kWe)	1,650
Unit size (kWe)	15
Total investment cost (€)	24,000,000
Needed investment (€)	6,000,000
Expected subsidy (€)	9,600,000
Credit (€)	8,400,000

Nota: Tabla 62, costos de inversión para una planta de generación eléctrica encendida con cultivos energéticos. Tomado de *Christou et al., (2009)*. (p. 3).

El resultado de la factibilidad económica del emprendimiento solo fue viable utilizando un valor regional del MWh con y sin financiación. La mejor opción alcanzada es la primera con valores de VAN y TIR que duplican los valores sin financiación y reducen el período de recuperación de la inversión a la mitad. El resto de los contextos analizados no fueron favorables. El valor del precio de la potencia eléctrica adoptado condice con diferentes precios del MWh en distintos países de Europa al 30/11/2023 que de haber sido tomados en cuenta, el cálculo hubiese dado positivo tanto para el cálculo de la TIR como del VAN. La Figura 34 los diferentes valores del MWh en países europeos.

Figura 34

Precios (€/MWh) de la electricidad en países de Europa al 30-11-23



Nota: La Figura 34 muestra los precios (€/MWh) de la electricidad en países de Europa al 30-11-23. Tomado de euenergy.live [página web]

4. Conclusión

Como conclusión, se cumplieron los objetivos planteados en el presente trabajo. El cardo común (*Cynara cardunculus* L.) como cultivo energético no tradicional no compite con los cultivos tradicionales por lo tanto no atenta contra la seguridad alimentaria y puede ser utilizado como biomasa para generar energía eléctrica en forma distribuida. La factibilidad económico financiera es posible a nivel local solo utilizando el precio de la energía eléctrica regional.

Resta abordar el uso de la energía calórica obtenida durante el proceso de obtención de energía eléctrica, sobre todo en los recuperadores de calor y la salida de gases de escape en el MCI. Esta podría usarse para obtener agua caliente para la limpieza en tambos o incluso generar vapor y comercializarlo o utilizarlo como recurso energético en la misma planta. También es posible explorar la utilización de las cenizas generadas como residuo en el tren de limpieza ya sea como parte de la fertilización de cultivos previo estudio o como insumo en la industria cementera.

5. Anexos

5.1. Anexo A. Criterios y Pasos para confeccionar la Matriz de Decisiones

Las provincias se eligieron en base al Mapa de Potencial de Bioeconomía de Argentina de 2023. Las provincias elegidas para ubicar el sitio de cultivo del cardo común son: Buenos Aires; Córdoba; Entre Ríos; La Pampa; y Santa Fe.

Se determinaron los criterios mandatorios y los deseables. Los criterios mandatorios son:

- Valor de PH del suelo entre 6,7 y 8,3
- Precipitaciones anuales mayores a 400 mm
- Zona sin cultivos alimentarios
- Zona habilitada por legislación para generación distribuida
- Disponibilidad de redes de media tensión para conexión/cercanía de nodos
- Presencia de Cooperativas eléctricas en cercanía
- Existencia de rutas/caminos de acceso en buen estado

Los criterios deseables son:

- Zona de promoción industrial
- Zona de baja ocupación de mano de obra
- Zona de baja humedad ambiental
- Presencia de soporte técnico en cercanía

La escala de valoración ascendente es de 1 a 10. La matriz de decisiones posee una doble entrada. Las filas contienen los criterios y las columnas las provincias. La Figura A1 muestra un extracto de la matriz confeccionada.

Tabla A 1

Matriz de decisiones confeccionada en base a los criterios adoptados

Matriz de Análisis de Decisión		Fecha: 20-12-2023		Participantes:									
Decisión a adoptar----->		Seleccionar el sitio más adecuado para el cultivo de Cardo (<i>Cynara cardunculus</i> L. variedad											
Reponsable: Ing. Jorge Acevedo		Posibles Sitios de implantación->		Santa Fe		La pampa		Entre Ríos		Buenos Aires		Córdoba	
Item	Valoración de Importancia (1-10)	Value	Total	Value	Total	Value	Total	Value	Total	Value	Total	Value	Total
Items mandatorios													
Valor de PH del suelo entre 6,7 y 8,3	10	9	90	9	90	9	90	9	90	9	90	9	90
Precipitaciones anuales mayores a 400 mm	9	8	72	0	0	9	81	8	72	0	0	0	0
Zona sin cultivos alimentarios.	9	7	63	4	36	7	63	7	63	6	54	6	54
Zona habilitada por legislación para generación distribuida	10	10	100	10	100	10	100	10	100	10	100	10	100
Disponibilidad de redes de media tensión para conexiónado/cercanía de nodos	8	8	64	8	64	0	0	5	40	7	56	7	56
Presencia de Cooperativas eléctricas en cercanía.	7	7	49	6	42	8	56	7	49	8	56	8	56
Existencia de rutas/caminos de acceso en buen estado.	8	7	56	6	48	7	56	8	64	8	64	8	64
Puntaje subtotal			494		380		446		478		420		
Items deseables													
Zona de promoción industrial.	9	7	63	6	54	7	63	9	81	8	72	8	72
Zona de baja ocupación de mano de obra.	10	0	0	7	70	6	60	10	100	0	0	0	0
Zona de baja humedad ambiental.	10	10	100	0	0	0	0	0	0	10	100	10	100
Presencia de soporte técnico en cercanía	9	9	81	5	45	6	54	5	45	7	63	7	63
Puntaje subtotal			244		169		177		226		235		
Puntaje total			738		549		623		704		655		

5.2. Anexo B. Equipamiento y resultados del proceso de generación de energía eléctrica

Para este caso se muestra el equipamiento con el cual se ajustó el cálculo teórico de obtención de energía eléctrica. El motor de combustión interna marca Siemens modelo SGE – 56SM y el gasificador marca ANKUR WBG-850.

Tabla B 1

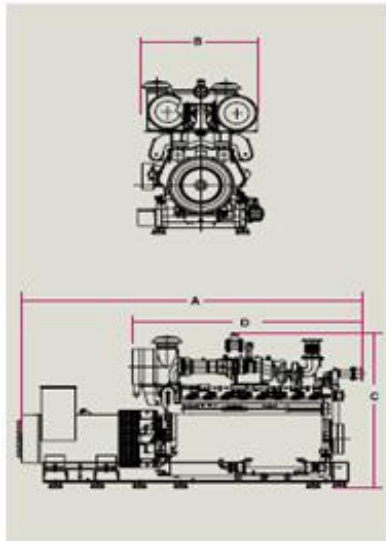
Características de funcionamiento del gasificador ANKUR WBG-850

Gasifier Model	WBG-850
Gasifier Type	Down Draft
Fuel Specifications	
Size (mm) (The size definition here is for wood pieces. If wood chips are to be used, no dimension of the chip should be larger than 40 mm or smaller than 25 mm. Fines should be less than 5% by weight)	Minimum: Diameter (∅) – 10 mm; Length (L) – 10 mm Maximum: ∅ – 75 mm; L – 75 mm
Moisture Content (%)	< 20% (Wet Basis)
Gasifier Output	
Rated Gas Flow (Nm ³ /hr)	1,912
Average Gas Calorific Value (Kcal/Nm ³)	> 1,050
Thermal Rating (Kcal/hr)	2,008,125
Rated Biomass Consumption (Kg/hr)	Up to 765
Gasification Temp. (°C)	1050 – 1100
Indicative Gasification Efficiency (%)	
Hot Gas Mode (No Scrubbing)	> 85%
Cold Gas Mode (With Scrubbing)	> 75%
Temperature of Gas at Gasifier Outlet (°C)	300 to 500°C
Biomass Feeding	
Mode	Skip Charger/ Manual
Frequency	Every 10 minutes
Ash Removal	Continuous, through proprietary control and water seal
Gas Cooling (For Scrubbed and Ultra Clean Gas Modes)	Venturi Scrubber with water re-circulation
Gas Cleaning (For Ultra Clean Gas Mode)	Through proprietary & patented fine filters
Start-Up	Through Scrubber Pump / Blower
Typical Gas Composition	CO - 19±3% H ₂ - 18±2% CO ₂ - 10±3% CH ₄ - Up to 3% N ₂ - 50%

Nota: La Tabla B1 muestra las características de funcionamiento del gasificador ANKUR WBG-850. Tomado de AGVE – Producción de energía con biomasa. (s.f.). Gasificador ANKUR WBG-850. [Folleto]. AGVE. <http://www.agve.com.ar/>

Figura B 1

Motor Siemens modelo SGE – 56SM



Motor para quemar gas de síntesis 4,5 - 14MJ/m ³	
Modelo SGE - 56SM - 1500 rpm	
Caudal de aire = 5,32kg/h	
Caudal syngas = 2,42kg/h (calculado en base al caudal de aire)	
Potencia eléctrica = 1066kWe (37,9%)	
Potencia térmica = 1575,5kWt (52,9%)	
Temperatura máx del gas = hasta 131°C	
Temperatura de salida de gases = 528°C	
Emisiones:	
CO < 1g/bhp.hr	
NOx < 2,2 g/bhp.hr	

Nota: La Figura B1 muestra el esquema del motor Siemens modelo SGE-56SM. Tomado de Siemens. (s.f.). SGE-S series gas engines and gen-sets natural gas 1,200/1,500/1,800 rpm. [Folleto]. Siemens. <https://www.siemens-prensa.es/>

Tabla B 2

Resultado del balance ajustado en el gasificador

ENTRADAS	OPERACIÓN	SALIDAS
Caudal de cardo = 470 kg.h ⁻¹	Gasificador	Caudal de syngas = 311 kg.h ⁻¹ (898,9 m ³ .h ⁻¹)
PCI cardo = 15741 kJ.kg ⁻¹		T°syngas = 500 °C
Caudal de aire = 611 kg.h ⁻¹		PCI syngas = 14835,2 kJ.kg ⁻¹
Cauda de ceniza en cardo = 8 g.m ⁻³		Composición % del syngas (10% CO ₂ ; 18% H ₂ ; 19% CO; 3% CH ₄ ; y 50% N ₂)
Caudal de TAR en cardo = 3 g.m ⁻³		Caudal de cenizas en syngas = 7,1 kg.h ⁻¹
		Caudal de TAR en syngas = 2,66 kg.h ⁻¹
	Retención	23,97 kg (cenizas + TAR).h ⁻¹
	Q liberado	56 MWh

Tabla B 3

Resultado del balance ajustado en el ciclón y el primer recuperador de calor

ENTRADAS	OPERACIÓN	SALIDAS
Caudal de syngas = 311 kg.h ⁻¹	Ciclón	Caudal de syngas = 311 kg.h ⁻¹
T°syngas = 500 °C		T°syngas = 500 °C
Caudal de cenizas en syngas = 7,1 kg.h ⁻¹		Caudal de cenizas en syngas = 0,68 kg.h ⁻¹
Caudal de TAR en syngas = 2,66 kg.h ⁻¹		Caudal de TAR en syngas = 0,256 kg.h ⁻¹
	Retención	6,16 kg cenizas.h ⁻¹ 2,3 kg TAR.h ⁻¹
ENTRADAS	OPERACIÓN	SALIDAS
Caudal de syngas = 311 kg.h ⁻¹	Primer recuperador de calor	Caudal de syngas = 311 kg.h ⁻¹
T°syngas = 500 °C		T°syngas = 380 °C
Cp syngas = 3,616 kJ.kg ⁻¹ °C ⁻¹		Caudal de aire = 1114,5 kg.h ⁻¹
Caudal de aire = 1114,5 kg.h ⁻¹		T° aire = 145 °C
T° aire = 25 °C		Caudal de cenizas en syngas = 0,68 kg.h ⁻¹
Cp aire = 1,009 kJ.kg ⁻¹ °C ⁻¹		Caudal de TAR en syngas = 0,256 kg.h ⁻¹
Caudal de cenizas en syngas = 0,68 kg.h ⁻¹		
Caudal de TAR en syngas = 0,256 kg.h ⁻¹		
	Q liberado en el aire	0,13 MWh

Tabla B 4

Resultado del balance ajustado para el filtro y el 2° recuperador de calor

ENTRADAS	OPERACIÓN	SALIDAS
Caudal de syngas = 311 kg.h ⁻¹	Filtro	Caudal de syngas = 311 kg.h ⁻¹
T°syngas = 380 °C		T°syngas = 380 °C
Caudal de cenizas en syngas = 0,68 kg.h ⁻¹		Caudal de cenizas en syngas = 6,8 g.h ⁻¹
Caudal de TAR en syngas = 0,156 kg.h ⁻¹		Caudal de TAR en syngas = 1,56 g.h ⁻¹
	Retención	0,672 kg cenizas.h ⁻¹ 0,25 kg TAR.h ⁻¹
ENTRADAS	OPERACIÓN	SALIDAS
Caudal de syngas = 311 kg.h ⁻¹	Segundo recuperador de calor	Caudal de syngas = 311 kg.h ⁻¹
T°syngas = 380 °C		T°syngas = 120 °C
Cp syngas = 3,381 kJ.kg ⁻¹ °C ⁻¹		Caudal de aire = 1158,7 kg.h ⁻¹
Caudal de aire = 1158,7 kg.h ⁻¹		T° aire = 260 °C
T° aire = 25 °C		Caudal de cenizas en syngas = 6,8 g.h ⁻¹
Cp aire = 1,0039 kJ.kg ⁻¹ °C ⁻¹		Caudal de TAR en syngas = 1,56 g.h ⁻¹
Caudal de cenizas en syngas = 6,8 g.h ⁻¹		
Caudal de TAR en syngas = 1,56 g.h ⁻¹		
	Q liberado en el aire	0,085 MWh

Tabla B 5

Resultado del balance ajustado en el lavador de gases y el MCI

ENTRADAS	OPERACIÓN	SALIDAS
Caudal de syngas = 311 kg.h ⁻¹ (306 m ³ .h ⁻¹)	Lavador	Caudal de syngas = 311 kg.h ⁻¹ (306 m ³ .h ⁻¹)
Caudal de agua = 671 L.h ⁻¹		T° salida del syngas = 40 °C
Caudal de cenizas en syngas = 6,8 g.h ⁻¹		Caudal de cenizas en syngas = 135,7 mg.h ⁻¹
Caudal de TAR en syngas = 1,56 g.h ⁻¹		Caudal de TAR en syngas = 28.3 mg.h ⁻¹
T° estimada del syngas = 80 °C		Caudal de agua = 147,62 L.h ⁻¹
Densidad del syngas (80 °C) = 0,984 kg.m ⁻³		
Trazas de H ₂ S; HCl; y NH ₃		
	Retención	Líquido negro residual conteniendo: 147,62 L agua.h ⁻¹
		9,95 g cenizas.h ⁻¹
		1,38 g TAR.h ⁻¹
		Trazas de H ₂ S; HCl; y NH ₃
	Agua para reuso	523,5 L.h ⁻¹
ENTRADAS	OPERACIÓN	SALIDAS
Caudal de aire = 5,32 kg.h ⁻¹	MCI	1,066 MWhe
T° aire = 25 °C		1,575 MWht
Caudal de syngas = 2,42 kg.h ⁻¹		0,311 MWh (pérdida en motor)
T° syngas = 55 °C		
	Emisiones	Nox < 1 g.bhp ⁻¹ .h ⁻¹
		CO < 2,2 g.bhp ⁻¹ .h ⁻¹
		CH ₄ < 3,5 g.bhp ⁻¹ .h ⁻¹
		C ₂ H ₆ < 0,37 g.bhp ⁻¹ .h ⁻¹

5.3. Anexo C. Cronograma de Vida Útil del Emprendimiento y Matrices de Criterios

Se muestra la tabla del cronograma de la vida útil del emprendimiento y las tablas de las matrices según los criterios para evaluar el impacto ambiental del emprendimiento.

Tabla C 1

Cronograma de la vida útil del emprendimiento

Cronograma del ciclo de vida útil del emprendimiento						
11° a 15° año	6° a 10° año	5° año	4° año	3° año	2° año	1° año
						1° Etapa - Planificación
						Gestión y trámites
						Relev. Topográfico y mojones
						Contrat. m.o. y capacitación
						Movimiento vehículos
						Cerco perimetral y carteles
						Transpor. Mat. Y equipos
						Instalación de obrador
						Sanitarios y vestuario
						2° Etapa - Instalación
						Acondicionamiento del terreno
						Fertilización y sembrado
						Mov. Terreno para plataforma
						Construcción de plataforma
						Instal. Depósito de biomasa, silo y equipos
						3° Etapa - Operación & Mantenimiento
						Cosecha, recolección y traslado al depósito
						Trituración de biomasa y generación de energía
						Traslado de líquido residual a trat y dispos. Final
						Traslado de cenizas y depósitos cerrados
						4° Etapa - Cierre y abandono
						Cierre y clausura de instalaciones
						Desmantelam. de infraestructuras
						Recomposición del paisaje
						Retiro y transporte de mat. y equipos

Tabla C 2

Matriz de impacto – criterio extensión

Matriz de Impacto Ambiental - Extensión	PLANIFICACION							Ext.	Tot.	INSTALACION				Ext.	Tot.	O&M				Ext.	Tot.						
	Gestión y trámites	Relev. Topográfico y mojones	Contrat. m.o. y capacitación	Movimiento vehículos	Cerco perimetral y carteles	Transpor. Mat. Y equipos	Instalación de obrador			Sanitarios y vestuario	Acondicionamiento del terreno	Fertilización y sembrado	Mov. Terreno para plataforma			Construcción de plataforma	Instal. Depósito de biomasa, silo y equipos	Cosecha, recolección y traslado al depósito	Trituración de biomasa y generación de energía			Traslado de líquido residual a trat y dispos. Final	Traslado de cenizas y depósitos cerrados	Cierre y clausura de instalaciones	Desmantelam. de infraestructuras	Recomposición del paisaje	Retiro y transporte de mat. y equipos
Medio biótico								0,35					0,35					0,35				0,35					
Flora	1	1	2,5	1	2,5	1	1	0,35	3,85	2,5	2,5	1	2,5	0,35	3,325	2,5	1	1	1	1	0,35	1,925	1	1	2,5	0,35	2,45
Fauna	1	1	2,5	2,5	1	2,5	1	0,35	4,375	2,5	2,5	2,5	1	0,35	3,325	2,5	1	1	1	1	0,35	1,925	1	1	2,5	0,35	2,45
Medio abiótico								0,35					0,35					0,35				0,35					
Suelo	1	1	1	2,5	1	2,5	1	0,35	4,375	2,5	2,5	2,5	2,5	0,35	4,375	2,5	1	2,5	1	0,35	2,45	1	5	2,5	0,35	6,475	
Agua	1	1	1	1	1	1	1	0,35	3,85	2,5	2,5	1	1	0,35	2,8	2,5	2,5	1	0,35	2,975	1	1	1	1	0,35	1,05	
Aire	1	1	1	5	1	5	1	0,35	5,6	2,5	2,5	2,5	1	0,35	3,85	2,5	2,5	1	0,35	2,45	1	2,5	5	5	0,35	6,475	
Medio antrópico								0,35					0,35					0,35				0,35					
Población	1	1	1	1	1	1	1	0,35	2,8	2,5	2,5	2,5	2,5	0,35	4,375	5	5	5	5	5	0,35	7	2,5	2,5	2,5	0,35	3,5
Aspectos socioeconómicos	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	0,35	7	2,5	2,5	2,5	2,5	0,35	4,375	5	5	5	5	5	0,35	7	5	5	5	0,35	7
Aspectos culturales	1	1	1	1	1	1	1	0,35	2,8	1	1	1	1	0,35	1,75	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	0,35	3,5	2,5	2,5	2,5	0,35	3,5

Tabla C 3

Matriz de impacto – criterio duración

6. Bibliografía

- Abelleyro, M. et al., (2020). Producción de gas de síntesis a partir de marlo de maíz para generación de energía eléctrica [Trabajo de Fin de Grado, Facultad de Ingeniería de la Universidad de Mar del Plata]. Tabla 10. p. 136. <http://rinfi.fi.mdp.edu.ar>
- Agudo, A. (15 de noviembre de 2022). La humanidad supera los 8.000 millones de personas. El País. <https://elpais.com/planeta-futuro/2022-11-15/la-humanidad-supera-los-8000-millones-de-personas.html>
- AGVE – Producción de energía con biomasa. (s.f.). Gasificador ANKUR WBG-850. [Folleto]. AGVE. <http://www.agve.com.ar/>
- Alzqueta Ania, U. (2011). Estudio Cinético sobre la Devolatilización del Cardo (2/2). Anexos [Trabajo de Fin de Grado, Universidad de Zaragoza]. Tabla 1.1. p. 9. <https://zaguan.unizar.es/>
- Angelini, L. et al., (2009, Mayo). Long-term evaluation of biomass production and quality of two cardoon (*Cynara cardunculus* L.) cultivars for energy use. Revista Biomass and Bioenergy. Volumen 33 (Nº 5). p 813. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.12.004>
- Archontoulis, S. (2011). Analysis of growth dynamics of Mediterranean bioenergy crops. Universidad de Wageningen. Países Bajos. p. 15. <https://www.researchgate.net/publication/260211111>
- Archontoulis, S. et al., (2011). A COMPARATIVE ANALYSIS OF BIOMASS PRODUCTION FROM SEVEN ENERGY CROP SPECIES GROWN IN A MEDITERRANEAN ENVIRONMENT. 19th European Biomass Conference, Berlin, Germany. p 8. <https://www.researchgate.net/publication/260211111>
- Aristizabal Alvarez, M y Valencia Naranjo, L. (2015). Diseño conceptual de un gasificador para la producción de gas de síntesis a partir de residuos de poda generados en la Universidad EAFIT [Trabajo de Fin de Grado, Universidad EAFIT. Escuela de Ingeniería. Medellín – Colombia]. Tabla 21.p. 43. <https://repository.eafit.edu.co/>
- ASTM (American Society for Testing and Materials). (1989). Método de prueba estándar para Recolección y Medición de la caída de polvo. N° 1739. ASTM. <https://la.astm.org/>
- Barajas Peñaranda, F. (2013). Diseño y construcción de un gasificador para el aprovechamiento energético de la biomasa residual forestal de la Universidad Industrial de Santander [Trabajo de Fin de Grado, Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. Colombia]. p. 50. <https://es.studenta.com>

- Basu, P. (2010). *Gasification and Pyrolysis. Practical Design*. (1ra. Ed.). ELSEVIER. Tabla 4.2. p 100.
- Basu, P. (2013). *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction. Practical Design and Theory* (2da. Ed.). ELSEVIER. p. 258.
- Bianchi, A y Cravero, S. (2010). ATLAS CLIMÁTICO DIGITAL DE LA REPÚBLICA ARGENTINA. Mapa de Índice de aridez de Martonne. Ediciones INTA. p 48. <http://sisol.salta.gob.ar/>
- Blanco, G. (2021). BIOENERGÍA Y DESARROLLO SOSTENIBLE: UNA RELACIÓN DIFÍCIL. Resumen ejecutivo. Climate Transparency. p 25. <https://farn.org.ar/>
- Bridgwater, A. Bolhar-Nordemkamp, M. (2005). *Economics of biomass gasification*. En H. Knoef (Ed.). Handbook Biomass Gasification. p. 326.
- Brown, R. (Ed.). (2011). *Thermochemical Processing of Biomass. Conversion into Fuels, Chemicals and Power*. WILEY. Tabla 3.6. p. 58.
- Capote, A. et al., (2012). Cálculo de indicadores de consumo de lubricantes en los tractores. Caso de estudio. Revista Ingeniería Agrícola. Volumen 2 (N°1). p 51. <https://www.redalyc.org/>
- Caputo, J. (2007). Residuos, bacterias y limpieza en el tambo. Sitio Argentino de Producción Animal. p. 1. <https://www.produccion-animal.com.ar/>
- Cassin, M. (2017). Energía para el desarrollo sustentable. [Apunte de curso]. Curso PRINCIPIOS BÁSICOS Y TECNOLOGÍAS ENERGÉTICAS. Maestría Energía para el Desarrollo Sostenible. Universidad Nacional de Rosario. p 27.
- Cengel, Y et al., (2011). *Transferencia de calor y masa. Fundamentos y aplicaciones*. (4ta. Edición). Figura 11.1. p 653. <https://www.freelibros.net>
- Cengel, Y et al., (2011). *Transferencia de calor y masa. Fundamentos y aplicaciones*. (4ta. Edición). Tabla A-15. p 884. <https://www.freelibros.net>
- Cengel, Y et al., (2011). *Transferencia de calor y masa. Fundamentos y aplicaciones*. (4ta. Edición). Tabla A-16. p 885. <https://www.freelibros.net/>
- Cespar. [https://www.facebook.com/CESPAR.SELVA/Cooperativa de Servicios Públicos Hersilia](https://www.facebook.com/CESPAR.SELVA/Cooperativa-de-Servicios-Publicos-Hersilia). <https://www.facebook.com/p/Cooperativa-de-Servicios-Publicos-Hersilia-100063902388594/>
- Christou, M. et al., (2009, 29 de Junio – 03 de Julio). Could energy crops be an economic and sustainable option for head ad Electricity? [Artículo]. 17th European Biomass Conference and Exhibition. From Research to Industry and Markets 29 June – 3 July 2009, CCH – Congress Center Hamburg, Germany. <https://www.researchgate.net/>

- Conde, C. et al., (2023). PAS. Panorama Agrícola Semanal. p. 3. Bolsa de Comercio de Cereales CABA. <https://www.bolsadecereales.com/>
- CONICET. (9 de Marzo de 2018). Eficiencia energética e impacto ambiental en las producciones de soja y maíz. [Nota de Prensa]. <https://www.conicet.gov.ar/>
- Cravero, P. (2017). El cardo como materia prima para la obtención de biocombustibles de segunda generación. Publicación periódica anual de la Sociedad de Biología de Rosario. p 21. <https://www.sbr.org.ar/>
- Cravero, V. et al., (2012). Fresh biomass production and partitioning of aboveground growth in the three botanical varieties of *Cynara cardunculus* L. Industrial Revista Crops and Products. Volumen 37 (N° 1). p 256. <https://doi.org/10.1016/j.incrop.2011.12.028>
- Cuba Arroyo, C. (2011). Piloto gasificador operado con biomasa. [Trabajo de Fin de Grado, Universitat Politècnica de Catalunya]. Tabla 4.2. p 25. <http://hdl.handle.net/2099.1/11591>
- Curt et al., (2002). The potential of *Cynara cardunculus* L. for seed oil production in a perennial cultivation system. Revista Biomass & Energy. Volumen 23 (N° 1). p 34. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(02\)00030-2](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(02)00030-2)
- D'Avino et al., (2020, Julio). Introduction of Cardoon (*Cynara cardunculus* L.) in a Rainfed Rotation to Improve Soil Organic Carbon Stock in Marginal Lands. Revista Agronomy. Volumen 10 (N° 7). p 11. <https://doi.org/10.3390/agronomy10070946>
- Decreto 351/79 de 1979. Reglamento de la Ley de Higiene y Seguridad del trabajo. 05 de febrero de 1979. <https://servicios.infoleg.gob.ar/>
- Decreto 1338/96 de 1996. Servicios de Medicina y de Higiene y Seguridad en el Trabajo. 25 de noviembre de 1996. <https://servicios.infoleg.gob.ar/>
- Decreto provincial 101/03 de 2004. Reglamento de la ley de 11.717. 14 de marzo de 2004. <https://www.santafe.gob.ar/>
- Decreto provincial 1884/02 de 2002. Reglamento de la ley de 11.717. 06 de setiembre de 2002. <https://www.santafe.gob.ar/>
- De la Fuente Rodriguez, J. (04 de Mayo de 2023). El hidrógeno verde y la crisis del agua [página web]. El Periódico de la Energía. Recuperado de: <https://elperiodicodelaenergia.com/>
- Doz, M., (2012). Valutazione Agronomica di Ricino (*Ricinus communis* L.) e Cardo (*Cynara cardunculus* L.) per la Produzione di Biodiesel in Ambiente Mediterraneo [Tesis doctoral, Università degli Studi di Catania]. p 76. <http://dspace.unict.it/>
- Donoso Baquerizo, O. (2010). Pruebas Experimentales en un Filtro de Mangas Tipo Pulse Jet del Laboratorio de Calidad del Aire de la FIMCP, [Trabajo de

- Fin de Grado, Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción, Guayaquil]. <https://www.dspace.espol.edu.ec/>
- Dufour, A. (2016). *Thermochemical Conversion of Biomass for the Production of Energy and Chemicals*. p. 43. WILEY. <https://www.wiley.com/>
- Durán Moreno, E. (2013). Estimación de la generación de alquitranes obtenidos en la gasificación de biomasa para su uso en motores de combustión interna, [Trabajo de Fin de Grado, Universidad Autónoma de México]. p. 35. <https://ru.dgb.unam.mx>
- Echeverri Londoño, C. (22 de Agosto de 2006). Diseño óptimo de ciclones. Revista Ingenierías Universidad de Medellín. Volumen 5 (N° 9). Tabla 1. p 6. <https://www.researchgate.net/>
- ECYT-AR. (s.f.). Regiones forestales de Argentina. La enciclopedia de ciencias y tecnologías en Argentina. [Página web]. <https://cyt-ar.com.ar/>
- Edwards, R. (2007). WELL-TO-WHEELS ANALYSIS OF FUTURE AUTOMOTIVE FUELS AND POWERTRAINS IN THE EUROPEAN CONTEXT. Tank-to-Wheels Report. European Commision. Tabla 2.1. p.6. <http://ies.jrc.ec.europa.eu/WTW>
- EIA (U.S. Energy Information Administration). (2019). Global Energy Consumption by Sector (2010 – 2050). <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=41433>
- EMBER (Coal to Clean Energy Policy). (2022). Global Electricity Review 2022. <https://ember-climate.org/>
- EPA (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos). (2024). Calculador de equivalencias de gases de efecto invernadero. <https://espanol.epa.gov/>
- EUENERGY. Electricity prices Europe al 30-11-23. [página web]. <https://euenergy.live/>
- Falasca y Ulberich. (2007). ¿Una plaga nacional utilizada como cultivo energético en áreas semidesérticas de Argentina? PREMAPA – CINEA. Universidad Nacional del Centro de la provincia de Buenos Aires. p. 5. <https://docplayer.es/>
- FAO (Food and Agriculture Organization). (2020). Actualización del balance de biomasa con fines energéticos en la Argentina. Colección Documentos Técnicos N.º 19. Buenos Aires. <https://doi.org/10.4060/ca8764es>
- FACMA (Federación Argentina de Contratistas de Máquinas Agrícolas). Precios orientativos de servicios agrícolas (26 de noviembre de 2023). <https://www.facma.com.ar/>
- Fernandez, J. (2006). El cardo un cultivo de secano para producción de biocombustibles. Revista Vida Rural. Dossier agroenergética. p 44.

https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/revistas/pdf_Vrural/Vrural_2006_240_44_47.pdf

- Fernandez, J. et al., (2005). Performance of *Cynara cardunculus* grown on a calcic haploxeralf under xeric Mediterranean climate. Universidad Politécnica de Madrid. p. 1. <https://www.researchgate.net/>
- Fernandez, J. et al., (2006). Industrial Applications of *Cynara cardunculus* L. for energy and other uses. *Industrial Crops and Products*. ELSEVIER. p 222. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2006.06.010>
- Fernandez y Curt. (2006). State of the art of *Cynara cardunculus* L. as an energy crop. Universidad Politécnica de Madrid. p 2. <https://www.academia.edu.ar/>
- Françaviglia, R. et al., (2016, Enero). Yields and quality of *Cynara cardunculus* L. wild and cultivated cardoon genotypes. A case study from a marginal land in Central Italy. *Revista European Journal Agronomy*. (N° 72). p 14. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2015.09.014>
- Franck Colombres, F. (2017). Gasificación como alternativa para generación distribuida de energía eléctrica a partir de biomásas residuales de Tucumán, Argentina (Trabajo Final Integrador. UTN). p 10.
- García Herrero, E. (2012). Diseño básico del tren de limpieza de gases de turbina de una central de gasificación con ciclo combinado con IGCC [Trabajo de Fin de Grado, Universidad Carlos III de Madrid]. Escuela Politécnica Superior. Madrid-España. p 60. <http://hdl.handle.net/10016/15322>
- Giunta, R. et al., (2015). Mapa base de aptitud neta agropecuaria y forestal de la provincia de Santa Fe. IDESF. p. 9. <https://www.santafe.gov.ar/>
- Gominho, J. et al., (2011). Large scale cultivation of *Cynara cardunculus* L. for biomass production—A case study. *Revista Biomass and Bioenergy*. Volumen 109. (p. 6). ELSEVIER. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.01.001>
- Grammelis, P. et al., (2008). Cultivation and Characterization of *Cynara Cardunculus* for Solid Biofuels Production in the Mediterranean Region. *Revista International Journal of Molecular Sciences*. (N° 9). p. 1247. <https://www.mdpi.com/1422-0067/9/7/1241>
- Gnecco, M. (2008). Riesgo País y Tasa de Corte en Evaluación de Proyectos. p. 37. <https://nulan.mdp.edu.ar/>
- Gomez Timoneda, D. (2005). Diseño del colector de gases de una planta de cogeneración [Trabajo de Fin de Grado, Universitat Politécnica de Catalunya]. p. 7. <http://hdl.handle.net/2099.1/2897>
- Guerra, V. (2021). Carbono: el elemento que determina la sustentabilidad del agro. *Revista RIA*. Volumen 47 (N° 2). p. 151. <https://repositorio.inta.gob.ar/>

- Heidenreich, S. Müller, M., Foscolo, P. (2016). *Advanced Biomass Gasification. Fundamental Concepts in Biomass Gasification*. ELSEVIER. p 4.
- Hetz, E. et al., (1997). Costo energético de las operaciones agrícolas mecanizadas. *Revista Agro Sur*. Vol. 25 (N° 2). Cuadro 3. <https://doi.org/10.4206/agrosur.1997.v25n2-03>
- iagua. (18 de Setiembre de 2014). ¿Cuánta energía se necesita para producir un metro cúbico de agua? [página web]. iagua. Recuperado de: <https://www.iagua.es/>
- IDEA (Instituto para Diversificación y Ahorro de la Energía). (2007). *Biomasa gasificación*. 3.4.2 Características técnicas. p. 32. <https://www.idae.es/>
- Incropera, F. y De Witt, D. (1999). *Fundamentos de transferencia de calor*. (4ta. Edición). p. . WILEY. <https://library.lol/>
- INDEC (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos). (2023). Censo Nacional de Hogares y Viviendas 2022. Cuadro 1.21. p. 30. <https://www.indec.gob.ar/>
- IRAM (Instituto Nacional de Racionalización de Materiales). (1981). *Instalaciones fijas contra incendio*. N° 3528. IRAM. <https://www.iram.org.ar/>
- IPCC (Grupo Intergubernamental de expertos sobre el cambio climático). (2019). *Calentamiento global de 1,5°C. Resumen para responsables de políticas*. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/IPCC-Special-Report-1.5-SPM_es.pdf
- Junta de Andalucía. (2009). Balance energético de la producción de pelets a partir de *Cynara cardunculus*. pp 13-14. Consejería de Agricultura y Pesca. Junta de Andalucía. <https://www.juntadeandalucia.es/>
- Lourenco et al., (2015). Biomass production of four *Cynara cardunculus* clones and lignin composition analysis. Introduction. *Revista Biomass & Energy*. Volumen 76 (N° 35). p. 86. <https://repositorio.ipl.pt/handle/10400.21/5820?locale=en>
- Lesme Jaén, R. et al., (Setiembre-Diciembre de 2008). Análisis termodinámico de un gasificador ANKUR WBG 10 trabajando con diferentes biomásas. *Tecnología Química*. Volumen XXVIII (N° 3). Figura 2. p. 73. <https://www.redalyc.org/>
- Ley 11.717 de 1999. Ley de Medio Ambiente y Desarrollo Sustentable de la provincia de Santa Fe. 18 de noviembre de 1999. <https://www.santafe.gob.ar/>
- Ley 12.503 de 2005. Energías renovables alternativas: régimen legal de uso y generación. 30 de noviembre de 2005. <https://www.santafe.gov.ar/>
- Ley 12.692 de 2006. “Régimen Promocional Provincial” para la investigación, desarrollo, generación, producción y uso de productos y/o bienes

- relacionados con las energías renovables. 14 de diciembre de 2006.
<https://www.santafe.gov.ar/>
- Ley 12.923 provincial de 2016. Ley de Plagas Agrícolas. 29 de diciembre de 2016.
<https://www.santafe.gov.ar/>
- Ley 19.587 de 1972. Ley de Higiene y Seguridad en el Trabajo. 21 de abril de 1972. <https://servicios.infoleg.gob.ar/>
- Ley 24.724 de 2017. Ley de Generación Distribuida. 30 de noviembre de 2017.
<https://servicios.infoleg.gob.ar/>
- Ley 25.675 de Noviembre de 2022. Ley General del Ambiente. 27 de Noviembre de 2002.
<https://www.ambiente.gba.gob.ar/sites/default/files/LEY%2025675.pdf>
- Llanes-Cedeño, E. et al., (12 de Diciembre de 2018). Evaluación energética y exergetica en un motor de combustión interna ciclo Otto de 1.6 L. Revista Enfoque UTE. V 9. N° 4. Figura 1. p. 222. <https://www.researchgate.net/>
- Liu, J. Grisso, R. Cundiff, J. (2013). Harvest Systems and Analysis for Herbaceous Biomass (p. 123). En M, Matovic. BIOMASS NOW – CULTIVATION AND UTILIZATION. <http://dx.doi.org/10.5772/3437>
- Macknick, J. et al., (2012). Operational water consumption and withdrawal factors for Electricity generating technologies: a review of existing literature. Revista ENVIRONMENTAL RESEARCH LETTERS. p.7. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/4/045802>
- Manrique, S. (2022). Actualidad, perspectivas y reflexiones en el uso de la biomasa con fines energéticos. Ciencia e Investigación. Tomo 72. N° 1. pp 37-40. <https://aargentinapciencias.org/>
- Manzanares, P. (1997). Introducción al cálculo del balance energético de producción de biomasa. Informes técnicos 839. Departamento de Energías Renovables. CIEMAT. pp 3-8. <https://inis.iaea.org/>
- Marinozi, E. et al., (2022). Informe mensual Junio 2022. CAMMESA. <https://ageera.com.ar/>
- Martín, B. (2013). Grama Rhodes: en la búsqueda de una mayor emergencia de plántulas (2da. Parte). Revista Agromensajes. Volumen 36. <https://fcagr.unr.edu.ar>
- Martinez Capón, C. (2006). Diseño de una planta de gasificación de lodos de EDAR para tratamientos de 28000 Mg/año de fango seco, [Trabajo de Fin de grado, Universitat Politècnica de Catalunya]. p. 29. <http://hdl.handle.net/2099.1/3157>
- Matovic, M. (Ed.).(2013). BIOMASS NOW – CULTIVATION AND UTILIZATION (1ra. Edición). IntechOpen. p 123. <http://dx.doi.org/10.5772/3437>

- Mauromicale, G et al., (2014, Marzo). Suitability of cultivated and wild cardoon as a sustainable bioenergycrop for low input cultivation in low quality Mediterranean soils. *Revista Industrial Crops and Products*. Volumen 57 (N° 1). p 85. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.03.013>
- Mereb, J. (2020). El procedimiento de evaluación de Impacto Ambiental en las provincias argentinas. Análisis comparativo del diseño institucional de la EIA [Tesis de Fin de Maestría, Instituto Tecnológico de Buenos Aires – ITBA. Escuela de Tecnología]. Figura 1. p. 8. <https://ri.itba.edu.ar/>
- Meteoblue. (s.f.). Datos climáticos y meteorológicos observados para la provincia de Santa Fe. Clima (observado). <https://www.meteoblue.com/es/>
- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación de España. (2008). Empacadoras convencionales. [Ficha Técnica]. <https://www.mapa.gob.es/>
- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación de España. (2014). Cálculo de los costos aproximados de las principales operaciones agrícolas mecanizadas. Plataforma de conocimiento para el medio rural y pesquero. pp 2-4. <https://www.mapa.gob.es/>
- Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (2023). Primera estimación georreferenciada del potencial bioeconómico del país. p. 15. <https://www.argentina.gob.ar/>
- Molinos Azteca. (s.f.). Molino triturador de rollos TB 120. [Folleto]. Molinos Azteca. <https://www.molinosazteca.com/>
- Moragues, J. (2022). Energías renovables en Argentina y la transición energética. *Revista Ciencia e Investigación*. Tomo 72. (N° 1). p 60. <https://aargentinapciencias.org/>
- Morales-Villamil, L. (2018). Centrales termoeléctricas de biomasa. Universidad Carlos III de Madrid. Artículo. p. 4. <https://www.researchgate.net/>
- Moreno, A. et al., (2015). Potencial utilización del aceite de cardo para producción de biodiesel y su comparación con el aceite de soja. Repositorio Institucional CONICET Digital. p 137. <https://ri.conicet.gov.ar/>
- Muntean, M., et al., (2021). Comparativa: Emisiones de CO2 2021. Expansión/Datosmacro.com. <https://datosmacro.expansion.com/energia-y-medio-ambiente/emisiones-co2>
- Naranjo, E. A. y Gamarra, J. S. (2017). Evaluación del desempeño de diferentes configuraciones para un sistema de generación de potencia con base en motor de combustión interna integrado a un sistema de gasificación de biomasa. p. 53. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/20.500.12749/1474>

- Nicolau, P. (2016). *Removal, Utilization and Separation of Tras from Syngas*. Universidad Técnica de Delft. Países Bajos. Figura 10. p. 17. <https://repository.tudelft.nl>
- Oliverio, R. (2014). Efecto de la temperatura sobre la germinación de *Cynara Cardunculus* (L.) [Trabajo Final de Grado, Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Católica Argentina]. p. 7. <https://repositorio.uca.edu.ar/bitstream/123456789/308/1/doc.pdf>
- Organización Internacional del Trabajo (2019). OIT Argentina. Ministerio de Producción y Trabajo. Estimación del empleo verde en Argentina. Producción de energía y biocombustibles. (2019). p 22. <https://www.ilo.org/>
- Panigatti, J. (2010). *Argentina 200 años 200 suelos*. Ediciones INTA. p 235. <https://www.suelos.org.ar/>
- Pedraza Sanchez, E. et al., (2010). Caracterización morfofisiológica de *Jatropha curcas* L. variedad Brasil cultivada en dos zonas de Colombia. Revista Acta Agronómica. Volumen 59 (N° 1). p. 33. <https://repositorio.unal.edu.co/>
- Peña Rodriguez, G. et al., (2014). Caracterización morfológica y estructural de polvos de cenizas volantes. Revista Ingeniería Investigación y Desarrollo. Vol. 14 (N° 2). p. 16. <https://doi.org/10.19053/1900771X.3481>
- Peralta Castillo, G. (2001). Cálculo y diseño fluidodinámico de un filtro de mangas para partículas minerales de origen industrial, [Trabajo de Fin de Grado, Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción de Guayaquil]. p. 71. <https://www.dspace.espol.edu.ec/>
- Piscioneri, I. et al., (2000). Promising industrial energy crop, *Cynara cardunculus*: a potential source for biomass production and alternative energy. Volumen 41 (N° 41). Revista Energy Conversion and Management. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(99\)00135-1](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(99)00135-1)
- Power Data Access Viewer. NASA [Conjunto de Datos]. <https://power.larc.nasa.gov/>
- Prabhansu, S. et al., (2015). A review on the fuel gas cleaning technologies in gasification process. Journal of Environmental Chemical Engineering. Revista ELSEVIER. Tabla 2. p 692. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jece.2015.02.011>
- PROBIOMASA. (s.f.) Ficha técnica N° 4. Gasificación. p. 2. <http://www.probiomasa.gob.ar/>
- Quaak, P. et al., (1999). *Energy from Biomass. A Review of Combustion and Gasification Technologies*. World Bank Technical Paper N° 422. Tabla 4.2. p. 33. <https://es.scribd.com/>

- Raccuia y Melilli, (2004). Intraspecific variability in *Cynara cardunculus* L. var. *sylvestris* Lam. Sicilian populations: seed germination under salt and moisture stresses. *Revista Journal of Arid Environments*. Volumen 56 (N° 1). ELSEVIER. p. 111. [https://doi.org/10.1016/S0140-1963\(03\)00006-5](https://doi.org/10.1016/S0140-1963(03)00006-5)
- Red Eléctrica de España. (2021). Emisiones de CO2 asociadas a la generación de electricidad en España. Grupo Red Eléctrica. p. 3. <https://api.esios.ree.es/>
- Resolución 1049/12 de 2012. Emisión de gases de escape de motores de combustión interna a gasoil. 06 de julio de 2012. <https://www.ecofield.net/>
- Resolución MTySS 075/11 de 2011. Trabajo decente en el agro. 25 de febrero de 2011. <https://www.santafe.gob.ar/>
- Resolución MTySS 608/11 de 2011. Trabajo decente en campamentos rurales temporales. 25 de octubre de 2011. <https://www.santafe.gob.ar/>
- Resolución MTySS 116/11 de 2011. Ubicación de locales destinados fitosanitarios. 16 de noviembre de 2011. <https://www.santafe.gob.ar/>
- Resolución MTySS 628/11 de 2011. Difusión del Programa de Seguridad para Obras en Construcción. 08 de noviembre de 2011. <https://www.santafe.gob.ar/>
- Resolución Provincial 0177/2003. Almacenamiento, Clasificación, Acondicionamiento y Conservación de Granos. 10 de diciembre de 2003. <https://www.santafe.gob.ar/>
- Resolución Provincial 3490 de Diciembre de 2004. Calidad del Aire. 21 de diciembre de 2004. <https://www.santafe.gob.ar/>
- Revelli, G. et al., (2010). Propiedades fisicoquímicas en suelos predominantes del Noroeste de Santa Fe y Sur de Santiago del Estero. *Scielo (Argentina)*. Tabla 1. p 126. <http://www.scielo.org.ar>
- Reyes Ortiz, et al., (2006). Comportamiento mecánico y dinámico de una mezcla asfáltica con adición de cenizas volantes. [Artículo]. *Dialnet*. Recuperado de: <https://dialnet.unirioja.es>. [14 de Marzo de 2014].
- Rodriguez, L. et al., (2021). Producción de biomasa de *Arundo donax* L., un cultivo bioenergético para el centro de la provincia de Buenos Aires. *Revista RADA*. Volumen XII. p. 18. <https://www.researchgate.net/>
- Sanchez, D. (2016). Conceptos básicos de filtración [Presentación Power point]. *Sartorium stedim biotech*. p 22. <https://www.bdcint.com.do>
- Sanchez, J. (Setiembre de 2022). Recursos Naturales en América Latina y El Caribe N° 4. Los Servicios básicos de agua potable y electricidad como sectores clave para la recuperación transformadora en América Latina y El Caribe. <https://www.cepal.org/>

- Sanchez Avendaño, J. (2019). Evaluación técnica y ambiental de la sustitución de lubricantes minerales por biolubricantes en las plantas hidroeléctricas Reventazón, Angostura y Río Macho, ICE, [Trabajo de Fin de Grado, Instituto Tecnológico de Costa Rica]. p. 36. <https://repositoriotec.tec.ac.cr/>
- SankeyMATIC. (8 de noviembre de 2022). Make beautiful flow diagrams. SankeyMATIC. <https://sankeymatic.com/>
- Santa Fe Provincia. (2016). Población indígena por sexo según distrito. Provincia Santa Fe. Año 2010, [página web]. <https://www.santafe.gob.ar/>
- Sanz Pagés, A. et al., (2010). Balance de emisiones de GEI procedente de la producción y uso de pelets de *Cynara cardunculus* con fines energéticos. Secretaría General del Medio Rural y Producción Ecológica. Junta de Andalucía. p 10. <https://www.juntadeandalucia.es/>
- SEG Ingeniería. (2023). Indicadores energéticos Noviembre de 2023. [página web]. <https://www.segingeneria.com/>
- Siemens. (s.f.). SGE-S series gas engines and gen-sets natural gas 1,200/1,500/1,800 rpm. [Folleto]. Siemens. <https://www.siemens-prensa.es/>
- Soca Cabrera, J. (2022). Balance térmico de los motores de combustión interna. [Material de clase]. Motores de combustión interna y Motores y tractores agrícolas. Universidad Nacional de Chapingo. Chapingo, México. p. 9. <https://www.researchgate.net/publication/359567118>
- Soria, N et al., (2007). Herbario digital seco de Lavalle. Laboratorio de Desertificación y Ordenamiento Territorial. LADyOT – IADIZA - CRICYT- CONICET. p 40. https://www.mendoza-conicet.gob.ar/ladyot/sig-deser/publicac_sig_pdi/trabajos/herbario_digital.pdf
- Stanway, D. (29 de marzo de 2021). China generó más de la mitad de la energía de carbón del mundo en 2020, según estudio. Portal Reuters. https://es-us.finanzas.yahoo.com/noticias/china-gener%C3%B3-mitad-energ%C3%ADa-carb%C3%B3n-091743611.html?soc_src=social-sh&soc_trk=ma
- Suarez Porras, D. et al., (2017). Diseño a escala laboratorio del sistema de acondicionamiento de gas de síntesis para un motor de combustión interna [Trabajo de Fin de Grado, Fundación Universidad de América. Facultad de Ingenierías. Bogotá – Colombia]. Tabla 6. p. 41. <https://reository.uamerica.edu.co>
- Taboada, M. (2011). Emisión de gases de efecto invernadero derivados del proceso agroproductivo. El caso del Óxido Nitroso (N₂O). Instituto de Suelos, CIRN, INTA – CONICET – Facultad de Agronomía UBA. p. 2. https://www.engormix.com/agricultura/cuidado-suelo/emision-gases-efecto-invernadero_a29386/

- Tito, B. (2020). Matriz de Leopold modificada impacto ambiental excel ejemplos. Ingeniería Ambiental [página web]. <https://ingenieriaambiental.net/matriz-de-leopold/>
- Toledo Melchor, M. (2011). Comportamiento del flujo de un separador tipo lavador mediante simulación numérica [Tesis de Maestría, Instituto Politécnico Nacional de México]. p. 6. <https://repositoriodigital.ipn.mx>
- Viscoso, G. et al., (2020). Importancia del subsolado como práctica de manejo de praderas. Informativo INIA Remehue. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Centro Regional de Investigación Remehue. N° 260. <https://hdl.handle.net/20.500.14001/67253>
- Warnecke, R. (2000). Gasification of biomass: comparison of fixed bed and fluidized bed gasifier. Volumen 18. Revista ELSEVIER. Tabla 7. <https://www.researchgate.net/>
- YPF (Yacimientos Petrolíferos Fiscales). (2019). Estándar para la densidad, densidad relativa, o gravedad API del petróleo o productos del petróleo por el método del hidrómetro (ASTM D-1298). <https://www.ypf.com/productosyservicios/Descargas/EXTRAVIDA-XV-500-LD-FDS.PDF>