UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

VALPARAÍSO – CHILE

"GENERACIÓN DE PELLETS Y COMPOST A PARTIR DE RESIDUOS AGRÍCOLAS"

NICOLÁS JUMO SOTO ROJAS

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL MECÁNICO

PROFESOR GUÍA: Ing. RAFAEL MENA YANSSEN

PROFESOR CORREFERENTE: Mg.-Ing. JAIME ESPINOZA SILVA

JUNIO 2017

Agradecimientos

En esta sección quisiera agradecer a todas las personas que me han apoyado a lo largo de mis estudios universitarios, especialmente a mi familia, familiares y amigos. Así como también a profesores y docentes del departamento de mecánica de la universidad.

Quiero agradecer principalmente a mis padres, Julio y Mónica, a mi hermano, prima y abuelos que siempre me han guiado y apoyado. Además de mis amigos de universidad que han estado presente en todos los ámbitos de mi vida estudiantil.

También agradecer a los docentes del laboratorio de Termodinámica, Jacqueline Souza y Rodrigo Morales, así como también al Sr. Luis Cabrera, presidente de la feria Femacal, que me ayudaron y permitieron trabajar adecuadamente en el proyecto.

Agradecer especialmente a los profesores Rafael Mena y Jaime Espinoza, por las múltiples enseñanzas tanto en el ámbito académico como personal, y valorar la disposición y el apoyo que me han entregado para desarrollar este trabajo sin problemas.

Resumen

El proyecto realiza una cuantificación de residuos agrícolas en el recinto de Feria Mayorista Femacal, ubicada en La Calera, Valparaíso, la cual es una de las ferias más grandes del país y que posee una superficie total de 6.000 [m2] aproximadamente. La problemática radica en la gestión de los residuos agrícolas y el costo del transporte de estos, por lo que se busca la posibilidad de convertir esta biomasa en algún otro recurso de valor. Por lo tanto, se hizo un levantamiento de información en La Feria, donde se concluye que hay cerca de 900 [ton/semana] de productos, tales como frutas, vegetales y semillas, y se generan aproximadamente 28 [ton/semana] de residuos agrícolas.

Luego de la cuantificación de la biomasa, se realizan ensayos de medición de humedad y poder calorífico de los residuos agrícolas presentes en la feria, lo que permite realizar una caracterización de este tipo de biomasa presente en la feria Femacal, tomando cuatro muestras representativas y obteniendo como resultado importantes parámetros, tales como la humedad promedio de las muestras de 85% y poder calorífico inferior (PCI) promedio de 13.766 [kJ/kg]. Estos resultados demuestran que existe una fuente potencial de energía en estos residuos agrícolas.

Para la evaluación económica de la planta de tratamiento de residuos agrícolas se descarta el proceso de compostaje, principalmente debido a la alta duración de estos procesos, los cuales pueden demorar varias semanas y en segundo lugar, debido al bajo precio de venta de compost. Por lo que se opta por la tecnología de densificación de biomasa como lo es el peletizado, en donde se obtienen pellets como productos aumentando el poder calorífico de estos residuos agrícolas y obteniendo un potencial energético considerable.

Para el aprovechamiento energético de este tipo de biomasa, se debe tener un proceso de secado eficiente, por lo que se opta por la utilización de la tecnología de Techo Solar Activo, en donde se aprovecha la energía solar para aumentar la temperatura del aire de secado y así, poder secar estos residuos agrícolas vegetales y disminuir la humedad desde un 85% hasta un 15%, que es lo ideal para el proceso de peletizado.

Se evalúa una planta de procesamiento de biomasa, realizando el secado de una cantidad inicial de 5.000 [kg/día] de residuos agrícolas húmedos, obteniendo cerca de 900 [kg] de material seco dispuestos para el proceso de peletización.

Los diferentes tipos de ingresos que se proyectan para la planta de peletizado están compuestos por el concepto de venta de pellets de biomasa e ingreso por arriendo del galpón, estimados en 7.530 [UF/año] y el ahorro por concepto de recolección de residuos agrícolas, estimado en 380 [UF/año].

Los principales costos de la planta de peletizado radican en los costos de Inversión, compuesto principalmente por el costo de la infraestructura (construcción de galpón e instalación de Techo solar activo), costo de obras civiles y equipos, los que suman un costo total de 19.624 [UF]. Por otro lado, los costos de operación de la planta (Opex) se estiman en 2.524 [UF] al año.

A modo de conclusión de la evaluación, se obtienen indicadores económicos positivos en la evaluación de la planta, obteniendo como resultados el VAN = 2.963,32 [UF], equivalente a $ 78.015.402 pesos chilenos, y TIR=18,89%. En el análisis de sensibilidad se muestra que el proyecto solo es rentable si se construye una planta de al menos 2.000 [m2], esto se debe principalmente a la evaluación de ingreso por concepto de arriendo de la estructura. Además se tiene que el proyecto es factible solo si el precio de venta de pellets es de más de 200 [CLP/kg].

Finalmente se evalúan otras opciones a ser consideradas para incorporar en la feria Femacal, las que incluyen la posibilidad de la construcción de una planta de fruta deshidratada de 200 [m2], en donde con esa cantidad de superficie de Techo Solar Activo, las frutas presentes en Femacal obtienen un valor agregado para su venta. Alternativa que también se evalúa económicamente en un horizonte de 10 años. Se tiene el secado de 436 [kg/día] de frutas, obteniendo 80 [kg/día] de fruta deshidratada. A un precio de venta promedio de 6.280 [CLP], se obtienen unos ingresos de 4.579 [UF/año].

Los principales costos de la planta estarán dados por los costos de Inversión, principalmente por la Infraestructura (Galpón y Techo Solar) y los equipos para el proceso de deshidratado, estimados en 6.576 [UF]. Los costos de operación serán de 2.500 [UF], representados por los

costos de mano de obra, energía y mantención de equipos. Finalmente se obtienen indicadores positivos representados en VAN=2417,80 [UF] y TIR=24,4%. Lo que demuestra que el proyecto de procesamiento de frutas y verduras es factible para el caso de la Feria Femacal.

Abstract

The project carries out a quantification of agricultural residues at the Feria Mayorista La Calera "Femacal", located in La Calera, Valparaíso, which is one of the largest fairs in the country and has a total area of 6,000 [m2]. The problem lies in the management of agricultural residues and the cost of transporting them, so the possibility of converting this biomass to some other resource of value is sought. Therefore, a survey was conducted at La Feria, where it is concluded that there are about 900 [ton/week] of products, such as fruits, vegetables and seeds, and approximately 28 [ton/week] of agricultural waste.

After the quantification of the biomass, tests are carried out to measure the moisture and calorific value of the agricultural residues present at the fair, which allows a characterization of this type of biomass present at the Femacal. Four representative samples were analyzed and important parameters were obtained, such as the average sample humidity of 85% and the lower calorific value of 13,766 [kJ/kg]. These results demonstrate that there is a potential source of energy in these agricultural residues.

In the economic evaluation of the agricultural waste treatment plant, the composting process is ruled out, mainly due to the high duration of these processes, which can take several weeks and secondly, due to the low sales price of compost. As a result, biomass densification technology is used, such as pelletizing, where pellets are obtained as products, increasing the calorific value of these agricultural residues and obtaining considerable energy potential.

For the energy use of this type of biomass, an efficient drying process must be performed, which is why the use of Active Solar Roof technology is used, where solar energy is used to increase the temperature of the drying air and thus, be able to dry these agricultural vegetable residues and reduce humidity from 85% to 15%, which is ideal for the pelletizing process.

The biomass processing plant is evaluated by drying an initial amount of 5,000 [kg / day] of moist agricultural waste, obtaining about 900 [kg] of dry material ready for the pelletizing process.

The different types of income that are projected for the pellet plant are composed of the sale of pellets of biomass and income from lease of the warehouse, estimated at 7,530 [UF/year] and savings for the collection of agricultural waste, estimated at 380 [UF/year].

The main costs of the pelletizing plant are in the costs of investment, composed mainly of the cost of the infrastructure (construction of shed and installation of active solar ceiling), cost of civil works and equipment, which add up to a total cost of 19,624 [UF]. On the other hand, the operating costs of the plant (Opex) are estimated at 2,524 [UF] per year.

As a conclusion, positive economic indicators are obtained in the evaluation of the plant, obtaining as result the NPV = 2,963 [UF] and IRR = 18.89%. In the sensitivity analysis it is shown that the project is only profitable if a plant of at least 2,000 [m2] is constructed, this is mainly due to the income evaluation for lease of the structure. In addition, the project is feasible only if the pellet sales price is more than 200 [CLP/kg].

Finally, other options to be considered for incorporation in the Femacal fair are evaluated, including the possibility of building a dehydrated fruit plant of 200 [m2], where with that amount of Active Solar Roof, the fruits present In Femacal get added value for sale. This option was also evaluated economically over a 10 year horizon. Drying of 436 [kg/day] of fruits is obtained, obtaining 80 [kg/day] of dehydrated fruit. At an average selling price of 6,280 [CLP], revenues are obtained at 4,579 [UF / year].

The main costs of the plant are in the investment costs, mainly in the Infrastructure (Warehouse and Active Solar Roof) and equipment for the dehydration process, estimated at 6,576 [UF]. Operating costs are 2,500 [UF], represented by costs of labor, energy and equipment maintenance. Finally the economic indicators are positive, represented in NPV = 2417 [UF] and IRR = 24.4%. This demonstrates that the fruit and vegetable processing project is feasible in “Feria La Calera”.

Contenido

1 Introducción 1

2 Objetivos 2

3 Problemática Residuos agrícolas en Feria La Calera 3

4 Cuantificación de biomasa 3

5 Características generales de la biomasa 6

6 Caracterización de los residuos agrícolas 7

7 Tecnologías de pre-procesamiento de la biomasa 9

7.1 Métodos de reducción de humedad 9

7.2 Tecnologías de compactación 11

7.2.1 Briquetas 11

7.2.2 Peletización 14

8.1 Procesos Termoquímicos de conversión de biomasa 17

8.1.1 Combustión de Biomasa 18

8.1.2 Gasificación 20

8.1.3 Pirólisis 27

8.1.4 Licuefacción 29

8.2 Proceso de Conversión Bioquímica 31

8.2.1 Compostaje Industrial 32

8.2.2 Digestión anaeróbica 48

8.3 Proceso físico-químico 50

9 Selección de tecnologías y equipos 51

9.1 Radiación solar en la zona 52

9.1.2 Fuente de información climática NCh 20.365 53

9.1.3 Cantidad de residuos agrícolas a secar en función de la superficie de techo solar 55
9.2 Procesos de acondicionamiento del aire 59
9.3 Carta psicométrica 60
9.3.1 Consumo energético en el secado 62
9.4 Evaluación Planta de Peletizado en feria La Calera 65
9.4.1 Área de techo solar activo requerida 65
9.4.2 Selección de ventilador 66
9.4.3 Techo solar activo 67
9.5 Diagrama de flujo del Proceso productivo 69
10 Evaluación económica 70
10.1 Ingresos 71
10.2 Terreno e Infraestructura 73
10.3 Costo de los equipos 74
10.4 Costo de las inversiones (CAPEX) 76
10.5 Costos de operación (OPEX) 77
10.7 Flujo de caja 81
10.8 Análisis de sensibilidad 82
11 Análisis de otras opciones disponibles 86
11.1 Caso 2: Evaluación de planta deshidratadora a escala de 200 [m^2] 86
12 Conclusiones 89
13 Referencias 91
14 Anexos 93

Glosario

Símbolo	Descripción
PCS	Poder calorífico superior [cal/g] o [kJ/Kg]
PCI	Poder calorífico inferior [cal/g] o [kJ/Kg]
m	Masa de H_2O en los productos por unidad de masa de combustible [kmol/Kg].
h_{fg}	Entalpía de vaporización del agua [kJ/kmol].
K	Constante que incluye la capacidad calorífica del calorímetro, masa del agua del vaso calorimétrico y calor especifico del agua del vaso calorimétrico [J/°C]
ΔT	Aumento de la temperatura del agua del vaso calorimétrico por efecto de la combustión [°C]
Q	Calor generado por el alambre de niquelina quemado y la formación de ácidos [J]
H_2	Porcentaje de hidrógeno [%]
H_2O	Masa de agua [g].
η_i	Eficiencia instantánea [-]
m	Flujo másico de aire del colector [kg/s]
C_p	calor especifico del fluido [kJ/kg °C]
T_{in}	temperatura de entrada del fluido [°C]
T_{out}	temperatura de salida del fluido [°C]
I	radiación incidente [kJ]
A_c	área del colector [m^2]
m_{vapor}	masa de vapor de agua [kg]
m_a	masa de aire seco [kg aire seco]
m_g	Cantidad máxima de humedad que el aire puede contener a una temperatura determinada [kg]
P_v	Presión de vapor [Pa]
P_{sat}	Presión de saturación del agua a una determinada temperatura [Pa]
ω	Humedad absoluta o específica [Kg H_2O/kg aire seco]
Ø	Humedad relativa [%]
T°	Temperatura [°C]
h	Entalpía [kJ/kg]
v	Volumen específico [m^3/kg aire seco]
W_a	Cantidad de agua a eliminar en un tiempo t en un proceso de secado [kg/día]
W_o	Masa inicial de material sin secar [kg]
t	Tiempo [s]

ρ_a	Densidad del aire [kg/m^3]

1 Introducción

En el presente trabajo se da una concepción general de lo que significa biomasa, se analizan las características de esta y se hace una clasificación de los métodos de conversión de biomasa en diferentes tipos de energía. Se analiza un caso en particular, la conversión de residuos agrícolas. Se realiza una cuantificación de este tipo de biomasa en una zona de la región de Valparaíso de Chile, realizando un levantamiento de información de la cantidad de material producido en la feria La Calera. Además de realizar ensayos que otorgan la caracterización de la biomasa. Posteriormente se realiza una selección de tecnologías y equipos, donde se decide aprovechar la energía solar existente en el lugar, debido a que es una zona expuesta a gran radiación solar. Se evalúa el consumo energético en el secado de la biomasa y finalmente se evalúa la posibilidad de procesar los residuos agrícolas generados en la feria, utilizando tecnologías disponibles para la obtención de pellets y así lograr darle valor agregado a este material y también poder reducir la cantidad de residuos que genera la empresa, disminuyendo los costos de almacenamiento y procesamiento de estos.

2 Objetivos

El objetivo general de este trabajo es analizar las alternativas de conversión de desechos agrícolas en recursos combustibles y se evaluará la factibilidad técnica-económica de una planta de tamaño industrial.

Los objetivos específicos son:

- Estudio de procesos de conversión de biomasa.
- Recopilar información de los residuos orgánicos generados por empresa agrícola de región de Valparaíso.
- Selección de tecnologías y equipos.
- Dimensionamiento y diseño de planta tamaño industrial.
- Estudio de la logística de recolección, distribución y almacenamiento.
- Evaluación técnico-económica de una planta de procesamiento de residuos agrícolas.

3 Problemática Residuos agrícolas en Feria La Calera

Este trabajo trata sobre la problemática del recinto de la feria La Calera, ubicada en Valparaíso, la cual es una de las ferias más grandes del país, con una superficie de 6.000 [m^2]. La problemática radica en la cantidad de residuos agrícolas producidos en la feria, producto de la gran cantidad de frutos y vegetales que ingresan a esta. Por lo que estos residuos agrícolas quedan sin tratamiento alguno, generando problemas de almacenamiento en la feria y un alto costo en el transporte de esta biomasa, debido a que se contrata a una empresa externa para el retiro de los residuos, pagando un alto costo anual.

4 Cuantificación de biomasa

Se realiza un levantamiento de información en la feria mayorista La Calera "Femacal", ubicada en la comuna de La Calera, Valparaíso, para obtener muestras de biomasa (particularmente de residuos agrícolas) con el fin de realizar una caracterización de la materia orgánica presente en el recinto. Además de conocer la cantidad de residuos hortofrutícolas que se generan en una semana y verificar el tipo de gestión de los desechos.

.

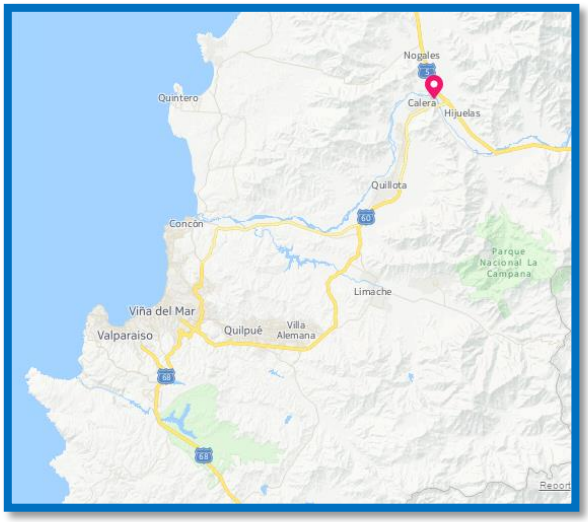

Ilustración 1: Localización de la feria FEMACAL, La Calera.

Ilustración 2: Entrada principal de la feria Femacal.

Datos de la Empresa

Empresa:	Femacal Sociedad Anónima
Datos de contacto:	Luis Cabrera, presidente Feria Mayorista "Femacal" lcabrera@femacal.cl
Número de contacto:	92290441
Localización de la feria:	Avenida Gonzalo Lizasoin 581 Calera, La Calera.
Superficie total:	6.000 [m^2] aprox.
Número de trabajadores:	20 trabajadores en ámbito gerencial aprox.
Número de puestos de trabajo:	700 puestos aproximadamente.

Horarios de Trabajo

Horario de trabajo: domingo a viernes (6 días de feria), desde las 2:00 hasta las 14:00 horas.
Temporada alta: noviembre a febrero
Temporada baja: marzo a octubre
Fuentes de abastecimiento de materia prima**:** Diversa procedencia.

Los productos hortofrutícolas llegan en camiones provenientes de diferentes partes del país, desde la XV región de Arica y Parinacota hasta la XI Región de Aysén. En temporada alta, los productos en esta época provienen de diferentes lugares de la Región de Valparaíso, Región metropolitana, VI región, etc.

Ilustración 4: Tipo estándar de camión cargado a la entrada de feria

Ilustración 3: Vista del interior de la feria.

Con respecto a la cantidad de productos que ingresan a la feria, se recopila información de la cantidad de camiones que ingresan a la feria diariamente (Tabla 1), para posteriormente estimar la cantidad de productos que ingresan en el período de una semana, lo que da un resultado de 900 [ton/semana] en temporada baja y 1440 [ton/semana] en temporada alta.

Temporada	Número de camiones que ingresan a la feria [camión/día]	Cantidad de productos vegetales [ton/día]	Cantidad de productos en feria [ton/semana]
Baja	15	150	**900**
Alta	24	240	**1.440**

Tabla 1: Cantidad de productos que ingresa a la feria Femacal en una semana.

Con respecto a la cantidad de residuos en la feria Femacal, se generan en total, 28 [ton/semana] en período invernal y cerca de 44 [ton/semana] en período de verano (Tabla 2), debido a las nuevas temporadas de frutas, en donde se debe contratar a más camiones para eliminar los residuos, significando un costo extra para la empresa.

Temporada	Gestión de residuos	Cantidad de residuos
Baja	Empresa + Camiones	28 [ton/semana]
	% residuos agrícolas	90%
	Total residuos agrícolas	**25 [ton/semana]**
Alta	Empresa	44 [ton/semana]
	% residuos agrícolas	90%
	Total residuos agrícolas	**40 [ton/semana]**

Tabla 2: Cantidad de residuos agrícolas producidos por la feria Femacal.

Los residuos producidos en la feria mayorista son principalmente de origen agrícola (cerca del 90% del total), los cuales en la mayoría, son frutas y verduras en mal estado, además de residuos vegetales tales como tallos, cáscaras y ramas de vegetales (productos orgánicos). Por lo que se tiene una mínima cantidad de residuos sólidos inorgánicos tales como cartones, plásticos, papel, vidrio, etc.

5 Características generales de la biomasa

Dentro del concepto de biomasa, se pueden distinguir dos grandes categorías (como se puede apreciar en la Tabla 3) estos son los distintos cultivos energéticos, donde se encuentran los cultivos forestales, de azúcar y almidón, de plantas, etc. Estos son utilizados principalmente como fuente de alimentación, por lo que su uso y procesamiento para producir otra fuente energética se encuentra limitado. Por otra parte, se encuentran los distintos tipos de residuos, tales como los desechos agrícolas, forestales y residuos municipales, los cuales pueden ser aprovechados para obtener otro tipo de energía como calor, vapor, electricidad o ser utilizados como biocombustibles.

Biomasa	Tipos	Ejemplos
Cultivos	Cultivos de azúcar y almidón	Granos (Arroz, trigo)
		Caña de azúcar
		Papas
		Maíz
	Plantas	Algas marinas
		Palma
	Forestales	Madera
	Plantas herbáceas	Pasto
		Alfalfa
Residuos	Residuos agrícolas	Residuos horto-frutícolas
		Rastrojos de maíz, arroz, cebada
	Ligno-celulósica	Aserrín, residuos forestales
	Residuos municipales, industriales	Residuos sólidos urbanos

Tabla 3: Tipos de biomasa y ejemplos característicos.

6 Caracterización de los residuos agrícolas

6.1 Ensayo de Humedad y Poder calorífico

Luego de la cuantificación de la biomasa en el recinto de la feria La Calera, se realiza la etapa de caracterización de los residuos agrícolas, realizando un ensayo en el laboratorio de Termodinámica de la Universidad Técnica Federico Santa María, para determinar el porcentaje de humedad a través de un método directo de medición, es decir, midiendo la masa del producto y la masa seca al eliminar toda el agua evaporable contenida en la muestra, aplicando calor a una temperatura de 105 [°C] por un tiempo aproximado de 12 [h], y se determina el poder calorífico superior e inferior (según la norma ASTM D-240) de cuatro muestras de residuos agrícolas representativas presentes en la feria mayorista Femacal, particularmente hojas de lechuga, tallos de acelga, cáscaras de cebolla y hojas de brócoli, con el fin de realizar una caracterización de estos, y así lograr determinar sus propiedades y su contenido energético.

Ilustración 5: Muestras de residuos agrícolas procedentes de feria Femacal.

Ilustración 6: Calorímetro isoperibólico, utilizado en ensayo de poder calorífico superior.

Las características y procedimientos del ensayo de laboratorio se encuentran en el Anexo N°1. Un resumen de los resultados obtenidos se aprecia en la Tabla 4.

Tabla Resumen (base seca)

Muestra	Residuo agrícola	Humedad promedio [%]	PC superior [cal/g]	PC superior [kJ/Kg]	PC inferior [cal/g]	PC inferior [KJ/Kg]
1	Hojas de lechuga	94	3.802	15.922	3.432	14.373
2	Tallo acelga	93	2.879	12.055	2.561	10.725
3	Cáscaras de cebolla	17	3.723	15.589	3.207	13.430
4	Hojas de brócoli	83	4.296	17.990	3.949	16.535

Tabla 4: Resumen de resultados obtenidos en el ensayo de porcentaje de humedad y poder calorífico superior e inferior en base seca de residuos agrícolas realizado en el laboratorio de Termodinámica USM en octubre, 2016.

Con este ensayo de laboratorio se puede concluir que las muestras de residuos agrícolas tienen en promedio un poder calorífico inferior (PCI) cercano a los 13.766 [kJ/Kg] en base seca, lo que representa una cantidad de energía importante comparable con otros tipos de combustibles y biomasa tales como la madera de nogal con un PCI en base seca cercano a los 17.233 [kJ/Kg], además de las cáscaras de almendras con un PCI de 16.301 [kJ/Kg] (base seca) y la cáscara de nuez con un PCI de 16.185 [kJ/Kg] (base recibida). Todos estos datos fueron tomados de análisis anteriores en el laboratorio de termodinámica USM según la norma ASTM D-240.

Además cabe destacar el porcentaje de humedad presente en los residuos agrícolas, los que bordean el 80-90% y del poco valor energético que poseen estas muestras en base recibida, las que se ven reflejadas a través del poder calorífico inferior en base recibida de 3.892 [kJ/kg] en promedio. Por lo que se concluye que existe una fuente potencial de energía en estos residuos agrícolas, por lo que es fundamental considerar algún tipo de tecnología de secado para su posterior aprovechamiento energético.

7 Tecnologías de pre-procesamiento de la biomasa

Luego de la etapa de Caracterización de los residuos agrícolas presentes en la feria La Calera, se procede a investigar sobre los métodos de conversión disponibles, comenzando por los métodos de reducción de humedad de biomasa, tecnologías pre-tratamiento y los métodos principales de conversión de biomasa, los cuales son los termoquímicos, bioquímicos y físico-químicos, los cuales constan de diversos procesos para la conversión de energía.

7.1 Métodos de reducción de humedad

En general, los sistemas de conversión de biomasa en energía requieren que la biomasa de diferente origen se encuentre con un bajo porcentaje de humedad, es por esto que generalmente los residuos agroindustriales son sometidos a pretratamientos, como lo son el secado y la molienda de la biomasa.

La cantidad de humedad aceptada en la biomasa depende del tipo de tecnología de conversión, por ejemplo en el caso de la obtención de pellets, es necesario que el contenido de humedad de los residuos agroindustriales o lignocelulósicos sea reducido a una cantidad de 10 a 15% aproximadamente, en cambio en la gasificación de biomasa depende del tipo de gasificador que se utilice, como por ejemplo en gasificadores de lecho fijo no se toleran contenidos de humedad sobre el 20%, en cambio en lechos fluidizados se puede aceptar hasta un 60% de humedad. [2]

Existen diversos tipos de secado de biomasa, entre los cuales se destacan los siguientes:

7.1.1 Secado térmico de la biomasa

Existen dos tipos principales para clasificar los procesos de secado de biomasa que existen a nivel industrial, los cuales son secado directo e indirecto.

En el **secado directo** o por convección el proceso se realiza con un flujo de aire caliente, vapor o gases calientes en contacto directo con la biomasa húmeda. Este tipo de secado se puede encontrar en los siguientes equipos:

Equipos discontinuos: Secadores de lecho fluidizado, secadores de bandeja con corriente de aire.

Equipos continuos: Secador flash (flujo neumático), secadores rotatorios, ciclónicos, secador de túnel, secadores sprays, secadores de lecho fluidizado.

En el **secado indirecto** o por conducción, los gases calientes no entran en contacto directo con el producto a secar, sino que el proceso de secado se realiza a través de un medio transmisor de calor. En este tipo de secado se puede encontrar secadores de bandejas a vacío, secadores por congelación, secadores de tambor, secadores de paletas, etc.

7.2 Tecnologías de compactación

Estas tecnologías sirven para compactar la biomasa y se encuentran disponibles comercialmente. Para el proceso de fabricación de briquetas se utilizan residuos agrícolas, mientras que para el proceso de producción de pellets, se puede utilizar aserrín o residuos forestales. Además estas tecnologías se pueden utilizar como pre tratamiento de otro tipo de método de conversión de biomasa, como lo son la combustión, a través de calderas y estufas que utilizan pellets como combustible o en la gasificación de biomasa, donde ingresa la biomasa compactada o en forma de pellets para producir gas de síntesis, para luego obtener calor y electricidad.

7.2.1 Briquetas

El briquetado es una tecnología de compactación y que es también conocida como densificación de biomasa. Además, esta tecnología transforma la biomasa en combustible, mejorando las características de manipulación de la materia orgánica, lo que hace más fácil el transporte y su almacenamiento.

Según el nivel de compactación las tecnologías de briquetas pueden dividirse en: compactación de alta presión, de media presión y de baja presión.

Tecnologías de alta compactación

Dentro de las tecnologías de densificación de biomasa se encuentran principalmente dos tipos: prensa extrusora de tornillo y la prensa de pistón (*piston press).*

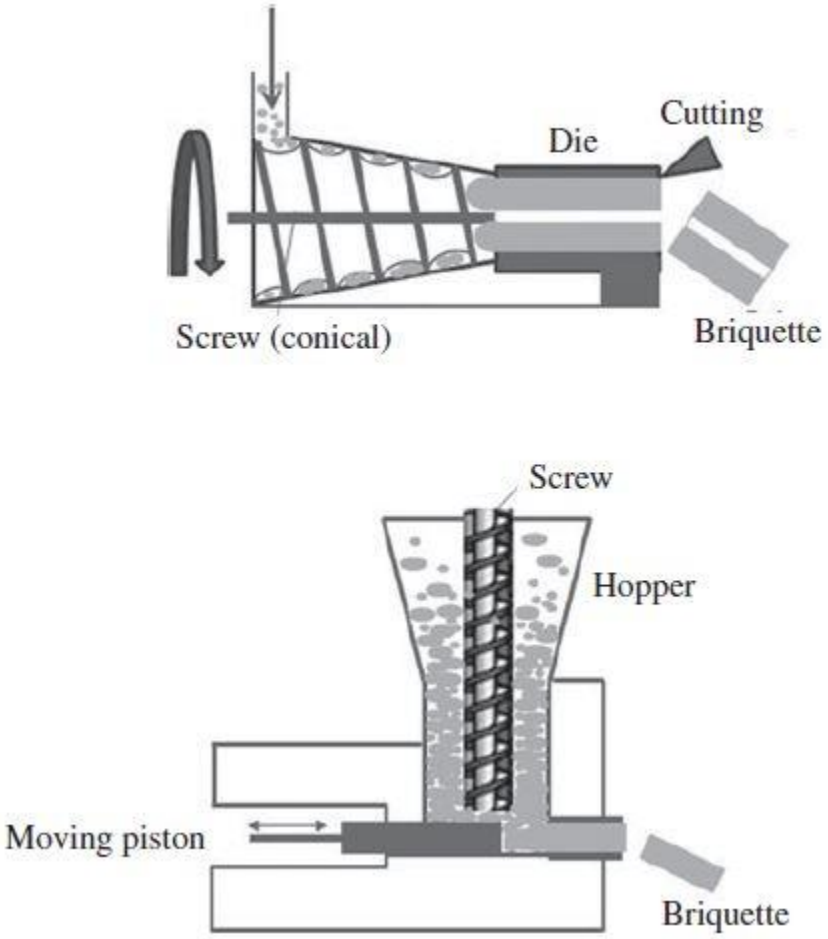

Ilustración 7: Tecnologías para la producción de briquetas. Extrusor de tornillo (arriba) y "Piston press" (abajo).

En la Tabla 5 se puede apreciar una comparación entre tres diferentes tecnologías para la producción de briquetas, en donde es posible notar algunas condiciones de operación tales como el contenido óptimo de humedad que debe tener la biomasa y el rango de potencia de consumo, entre otros parámetros.

Características	**Extrusor de tornillo**	**Prensa de pistón (Piston Press)**	**Prensa de rodillos**
Contenido óptimo de humedad de la materia prima	8-9%	10-15%	10-15%
Estado a la salida de la máquina (output)	continuo	en trazos	Continuo
Potencia de consumo [kWh/ton]	36,8 - 150	37,4 - 77	29,91 - 83,1
Densidad de briquetas [g/cm3]	1 - 1,4	1 - 1,2	0,6 - 0,7
Mantenimiento	Baja	Alta	Baja
Rendimiento de combustión de briquetas	Muy buena	Moderada	Moderada
Carbonización del carbón vegetal	Buen carbón vegetal	No es posible	No es posible

Tabla 5: Comparación de tecnologías para la obtención de briquetas.
(Fuente: Densification Technologies for Energy Application Jaya Shankar Tumuluru Christopher T. Wright Kevin L. Kenny J. Richard Hess, 2010)

7.2.2 *Peletización*

El proceso de peletización ayuda a aumentar la densidad de energía de la biomasa. El proceso completo consta de tres etapas: pretratamiento, donde la biomasa pasa por un proceso de secado y de reducción de tamaño; peletización; post tratamiento, el cual consta del almacenamiento y almacenaje de los pellets.

Existen normas internacionales que determinan la calidad de los pellets dependiendo de la pureza de la materia prima utilizada, como por ejemplo los pellets de alta pureza que son utilizados en sistemas de menor escala como es el caso de calefacción en las viviendas, en donde se mejora la manipulación del material y facilita su almacenamiento. Además los pellets pueden ser utilizados en aplicaciones de gran escala como en el proceso de co-combustión de centrales de generación de energía.

La biomasa comúnmente contiene un porcentaje de humedad cercano al 50%, es por esto que debe ser sometida a un pretratamiento, para ser reducida a un 15% aproximadamente, por lo que al igual que el proceso de obtención de briquetas, la biomasa debe pasar por un proceso de reducción de humedad. Luego de pasar por el proceso de peletización, se obtiene un producto con una humedad cercana al 10%.

Ilustración 8: Peletizadora de madera (small pellet press)
Fuente: biomasspelletplant.com/products/Small-Pellet-Machine.html.

8 Tecnologías para el procesamiento de la biomasa

La biomasa puede ser convertida en diferentes formas de energía utilizando diferentes tipos de procesos. En general la biomasa puede ser convertida en tres productos principales: generación de energía/calor, biocombustibles y como materia prima petroquímica. [1]

Para obtener estos productos de la biomasa, existen diferentes tipos de tecnologías de procesamiento, las que pueden clasificarse en tres categorías: tratamientos termoquímicos, bioquímicos y físico-químicos. (Ilustración 9)

En donde, los **tratamientos termoquímicos** (combustión, gasificación, pirólisis y licuefacción) poseen ventajas sobre los otros tipos, ya que ofrecen tasas de conversión de biomasa más altas, y específicamente en combustión y gasificación, se pueden utilizar las tecnologías existentes usadas en combustibles fósiles.

La combustión de la biomasa es un proceso en donde el carbono y el hidrógeno contenidos en el combustible reaccionan con el oxígeno formando dióxido de carbono, agua y liberando calor.

La gasificación es una de las tecnologías de procesamiento de biomasa más factibles, es por esto que el número de plantas de gasificación de biomasa sigue en aumento.

Durante la gasificación, la biomasa es tratada térmicamente en una atmósfera de vapor sobresaturado o de CO_2 convirtiendo el material a productos combustibles, como metano o hidrógeno, los cuales pueden ser quemados para producir calor para la generación de energía eléctrica. Además con las tecnologías de los ciclos combinados con gasificación integrada, las tasas de eficiencia de conversión de energía han sido cada vez más altas.

La pirólisis es otro de los procesos termoquímicos para la transformación de la biomasa, a través de una oxidación incompleta en ausencia de oxígeno que genera compuestos aprovechables en diversas industrias, como lo es el carbón vegetal u otro tipo de combustible.

Por otro lado la **conversión bioquímica** consta de dos opciones de tratamiento de la biomasa, uno es la digestión anaeróbica (producción de biogás) y fermentación (producción de etanol). [1]

La fermentación es utilizada comercialmente para producir etanol de cultivos de azúcar (caña de azúcar o remolacha) y cultivos de almidón de maíz. En donde la biomasa es molida y el almidón es convertido en azucares por enzimas, las que luego con levaduras permiten que los azúcares sean convertidos a etanol.

Procesos	Tecnologías	Equipos	Productos
Termoquímicos	**Combustión**	Calderas	Gases a alta temperatura
		Hornos	
		Estufas	
		Turbinas de Vapor	
		Turbogeneradores	
		Sistema de co-combustión	
	Pirólisis	Quemador de Gas (Pirolizador)	Biogás
			Carbón vegetal (biochar)
			Bio-aceite
	Gasificación	Gasificador de lecho fijo	Gas de síntesis
		Gasificador de lecho fluidizado	
	Licuefacción		Bio-aceite
Bio-químicos	**Digestión anaeróbica**	Biodigestor	Biogás
			Digestato
	Compostaje aeróbico	Pilas y Túneles de compostaje	Compost
		Rotating Drum	
		Reactores horizontales	
Fisico-químicos	**Transesterificación**	Reactores con agitación	Biodiesel
		Planta de Biodiesel	

Ilustración 9: Diferentes Tecnologías de procesamiento de Biomasa. [2]

8.1 Procesos Termoquímicos de conversión de biomasa

Las tecnologías de conversión de biomasa pueden ser clasificadas en dos grandes grupos: Tecnologías de conversión primaria y secundaria. La tecnología primaria implica la conversión de biomasa directamente en calor o como otra forma de energía, tales como en forma de gases como metano e hidrogeno, combustibles líquidos como metanol y etanol o como sólidos, como lo es el carbón. Entre este tipo de tecnologías se encuentran la combustión, gasificación y pirólisis. En cambio, las tecnologías de conversión secundaria convierten estos productos de la conversión primaria en combustible de transporte o en otras formas de energía como electricidad.

Dentro de los procesos de conversión termoquímicos, la combustión de biomasa, proceso que genera energía y calor, es el método responsable por cerca del 97% de la bioenergía producida en el mundo [3]. Los demás procesos tales como la pirólisis, gasificación o torrefacción implican calentar la biomasa en presencia de oxígeno controlado para producir combustibles líquidos o calor.

Un aspecto importante en los procesos termoquímicos se debe a la composición y propiedades de la biomasa. Por lo que la caracterización físico-química de la biomasa es un paso importante para su conversión en otro tipo de energía. Esto implica la determinación del tamaño de partícula y densidad aparente, análisis generales tales como la determinación del contenido de humedad, material volátil, contenido de carbono fijo y análisis más detallados como lo es la determinación del contenido de carbono, hidrogeno y oxígeno, la temperatura de fusión, poder calorífico, composición de la biomasa, entre otras.

Existen una serie de estudios e investigaciones que han realizado una caracterización sistemática de diferentes variedades de biomasa, obteniendo como resultado bases de datos de características de los combustibles de biomasa. Algunos de las bases de datos son Biobank (desarrollado por Bios Bioenergiesysteme GmbH) [4], BIOBIB (desarrollado por "Institute of Chemical Engineering, Fuel and Environmental Technology" ubicado en Vienna, Austria [5], Phyllis (desarrollado por "Energy research Centre of the Netherlands") [6].

8.1.1 *Combustión de Biomasa*

En el proceso de combustión directa el combustible es quemado en exceso de aire para producir calor, el exceso de aire proporciona oxigeno que inicia la reacción química entre el combustible y el oxígeno, liberando energía. El proceso de combustión puede proporcionar calor o mediante un proceso de conversión secundario puede producir electricidad.

Este proceso es utilizado para convertir la energía química presente en la biomasa en calor, energía mecánica o eléctrica. La combustión de biomasa produce gases a alta temperatura (alrededor de 800 a 1000°C).

Los equipos utilizados en este proceso son múltiples tales como: Estufas, hornos, calderas, turbinas de vapor, turbogeneradores, etc.

El porcentaje de humedad de la biomasa es otro factor importante a tener en consideración en la combustión, ya que el contenido de humedad en el material orgánico debe ser de menos del 50% o debe pasar por un tratamiento de pre-secado para obtener una adecuada combustión.

Los sistemas de combustión pueden ser clasificados en sistemas de pequeña, mediana y gran escala, dependiendo de la potencia generada.

Los equipos y tecnologías que operan con combustión directa, como los pequeños hornos domésticos tienen una eficiencia de 15% aproximadamente, sin embargo, actualmente existen tecnologías de combustión más sofisticados que proporcionan una eficiencia de sobre el 60%. [1]

Otra tecnología de combustión es la "**co-combustión**", proceso en el cual se queman dos combustibles diferentes tales como el carbón y la biomasa en un mismo equipo, produciendo una generación eléctrica de mayor rendimiento que las que producen las centrales de biomasa.

Proceso de Combustión

El proceso de combustión comprende cuatro fases básicas: Calentamiento y secado, Destilación de gases volátiles, Combustión de gases volátiles y la combustión del carbono fijo residual.

Antes del proceso de combustión la biomasa debe ser sometida a un proceso de peletización y briquetas, para disminuir el contenido de humedad y aumentar la densidad de la biomasa. Además, se aumenta el poder calorífico del material y se mejora el manejo de este para el transporte.

Tecnologías de Combustión

En relación a la capacidad, los sistemas de combustión de biomasa pueden ser clasificados en [2]:

Sistemas de pequeña escala

Los dispositivos y sistemas de combustión a pequeña escala se refieren principalmente a estufas y calderas con capacidades de menos de 200 [kW]. Dentro de los sistemas de combustión a pequeña escala se pueden distinguir las estufas a leña, chimeneas, calderas de pellets y astillas de madera, etc.

Sistemas de mediana (200 kW – 20 MW) y gran escala (mayor a 20 MW)

Los sistemas de mediana y gran escala han encontrado sus aplicaciones en una variedad de suministros de electricidad y calor que van desde la calefacción urbana, la producción de cogeneración, mediante la aplicación de variados combustibles como los son las virutas de madera, la paja y los residuos forestales.

8.1.2 *Gasificación*

La gasificación es la conversión de biomasa mediante el calentamiento en un medio de gasificación como el aire, vapor u oxígeno, obteniendo combustible de tipo gaseoso como producto.

La gasificación es un método de conversión de biomasa en una mezcla de gas por oxidación parcial de la biomasa a altas temperaturas (900°C aproximadamente).

Como resultado de esta tecnología se obtiene gas con un bajo poder calorífico que varía ente 4 – 6 [MJ/Nm^3]. Este gas puede ser directamente quemado o usado como combustible para motores y turbinas de gas. Además el gas de síntesis o "syngas" puede ser usado en la producción de químicos.

Entre productos finales que se pueden obtener de la gasificación se encuentran:

- **Calefacción:** en donde se puede obtener calor utilizando una caldera.
- **Electricidad:** utilizando turbinas de gas y vapor, cogeneración, además de la gasificación integrada en ciclo combinado (GICC).
- **Productos químicos**: Con el gas de síntesis (syngas) obtenido del proceso.

La gasificación integrada en un ciclo combinado es una tecnología que permite obtener una mayor eficiencia de conversión de energía, en el cual se combinan los procesos de gasificación y combustión, y la turbina convierte el gas combustible en electricidad. [1]

Procesos de la gasificación

La gasificación consiste en una serie de procesos, tal como se muestra en la Ilustración 10, la biomasa pasa por un pre tratamiento de secado, luego por un proceso de pirólisis y finalmente una oxidación parcial.

Una manera simple de representar el proceso de gasificación es la siguiente:

$$Biomasa \rightarrow H_2 + CO + CO_{2_{(g)}} + HC_{(g)} + alquitrán_{(l)} + residuo\ carbonoso_{(s)}$$

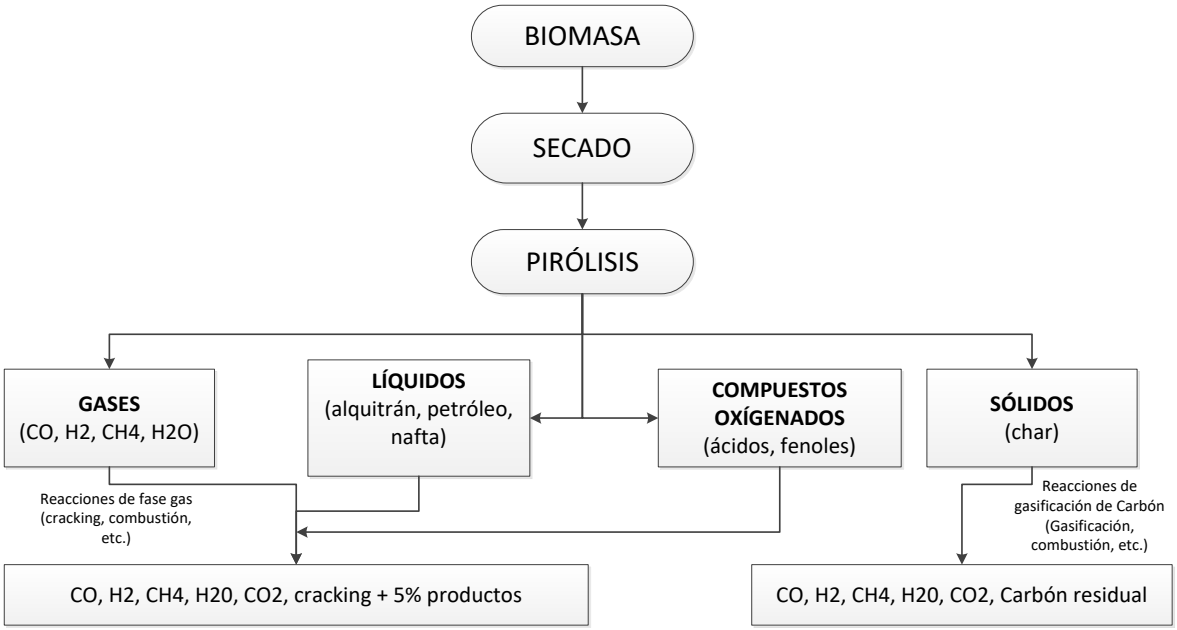

Ilustración 10: Rutas del proceso de gasificación. [9]

[9] An overview of advances in biomass gasification - Vineet Singh Sikarwar, Ming Zhao, Peter Clough, Joseph Yao, Xia Zhong, Mohammad Zaki Memon, Nilay Shah, Edward J. Anthony and Paul S. Fennell, 2016

Tipos de gasificadores [2]

Los gasificadores pueden ser clasificados basados en el tipo de agente gasificante (soplado con aire, con oxígeno, vapor, aire-vapor, etc.), temperatura, presión, proceso de transporte (corriente ascendente, descendente, de lecho fluidizado) y la forma de alimentación de calor (directa o indirectamente). La gasificación directa se lleva a cabo en los casos en que el agente gasificante oxida parcialmente la biomasa y proporciona el calor necesario para la gasificación. En los casos indirectos, pirólisis y la gasificación se realizan en un reactor mientras que la combustión parcial ocurre en otro reactor.

La forma más común de clasificar a los gasificadores es por el proceso de transporte, en donde los tipos principales son: gasificadores de lecho fijo y lecho fluidizado [7].

El **gasificador de lecho fijo** es la tecnología utilizada tradicionalmente, en el cual el proceso ocurre a una temperatura de 1000ºC aproximadamente. Dependiendo de la dirección del flujo de aire, este tipo de gasificadores se subdivide en: gasificadores de flujo ascendente (*updraft*), de flujo descendente (*downdraft*) y de flujo cruzado (*cross*-flow).

En los gasificadores de flujo ascendente el combustible es introducido en la parte de arriba y el agente gasificante (aire) entra por la parte inferior, lo que da inicio a la combustión, produciéndose H_2O y CO_2. La temperatura aumenta a 1000ºC, luego los gases calientes se filtran hacia arriba a través del lecho, en donde se producen reacciones endotérmicas con los elementos carbonizados, produciendo H_2 y CO, por lo que la temperatura llega a 750ºC. Luego se produce la pirolisis de la biomasa seca que va descendiendo por el reactor.

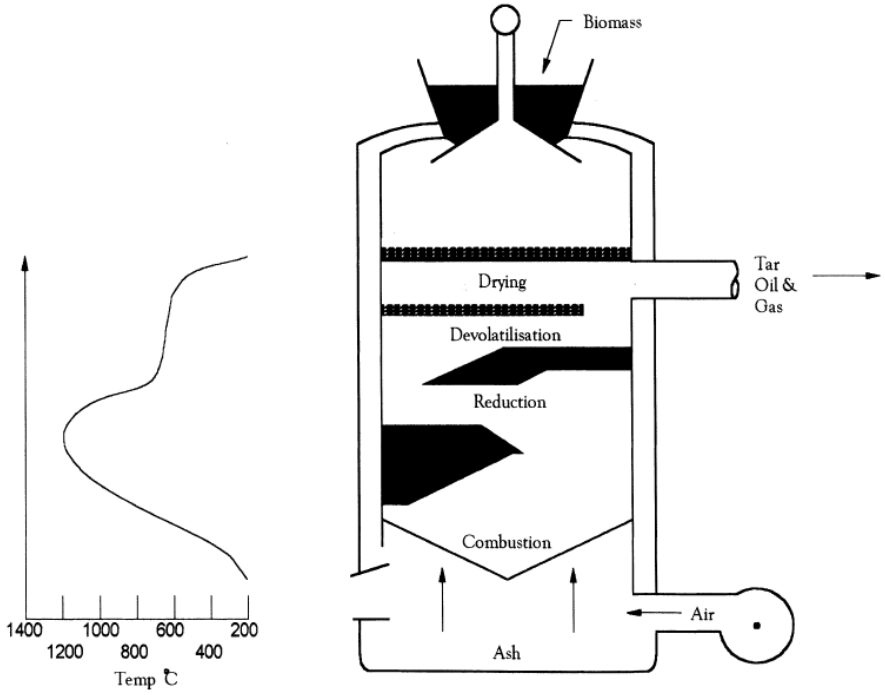

Ilustración 11: Diagrama de gasificador de lecho fijo flujo ascendente "updraft" y gráfico de Temperaturas alcanzadas en cada etapa. [7]

En los gasificadores de flujo descendente la materia orgánica y el aire se mueven en la misma dirección. Esta tecnología generalmente es usada para sistemas de gasificación de pequeña escala. También este sistema presenta ciertas desventajas con respecto a los gasificadores de flujo ascendente, ya que presenta dificultades en operar con biomasa que tenga una humedad mayor al 25% y presenta un mayor contenido de material particulado en el gas producido.

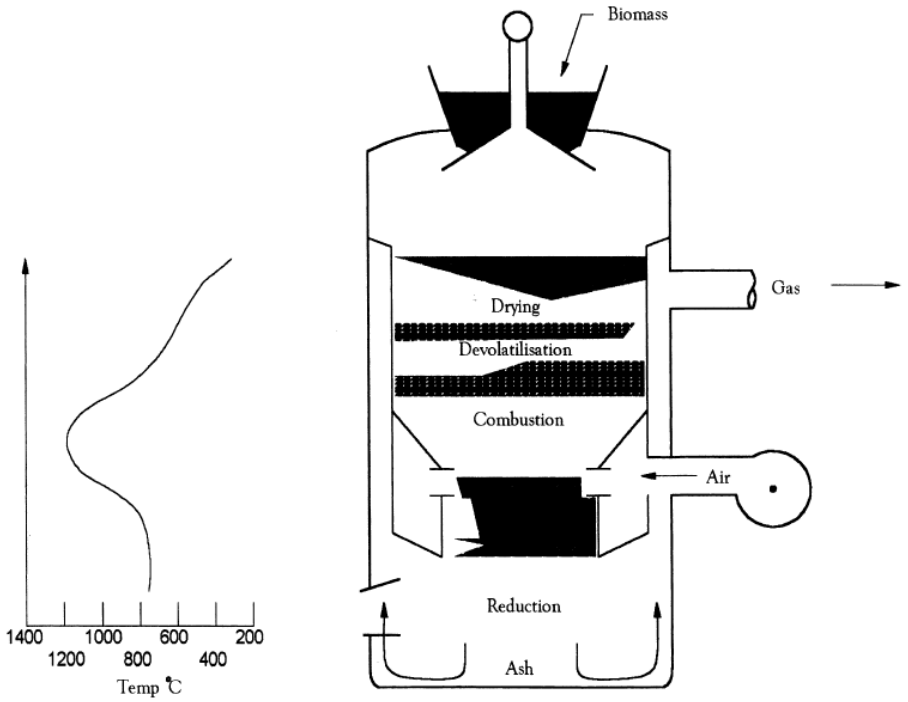

Ilustración 12: Diagrama de gasificador de lecho fijo "downdraft" y gráfico de temperaturas alcanzadas en cada etapa. [7]

La fluidización de la biomasa es un proceso en el cual una corriente ascendente de un agente gasificante, como el aire, oxígeno u otro fluido es utilizado para suspender partículas sólidas. Al conjunto de partículas sólidas suspendidas se les conoce como lecho fluidizado.

Dentro de los **gasificadores de lecho fluidizado** se pueden distinguir dos tipos: lecho fluidizado burbujeante (BFB) y lecho fluidizado circulante (CFB).

En el gasificador de lecho fluidizado burbujeante el proceso se lleva a cabo en dos unidades principales: un reactor y en un separador ciclónico. En el reactor, la biomasa finamente triturada se mezcla con el agente gasificante introducido por la parte inferior del reactor. Por lo que posteriormente las partículas del material se ponen en contacto con el lecho, en donde se calientan y pasan por las etapas de secado, pirólisis, combustión de residuo carbono, y es en el separador ciclónico donde finalmente se separan las cenizas y el sólido carbonoso de la generación del gas producto.

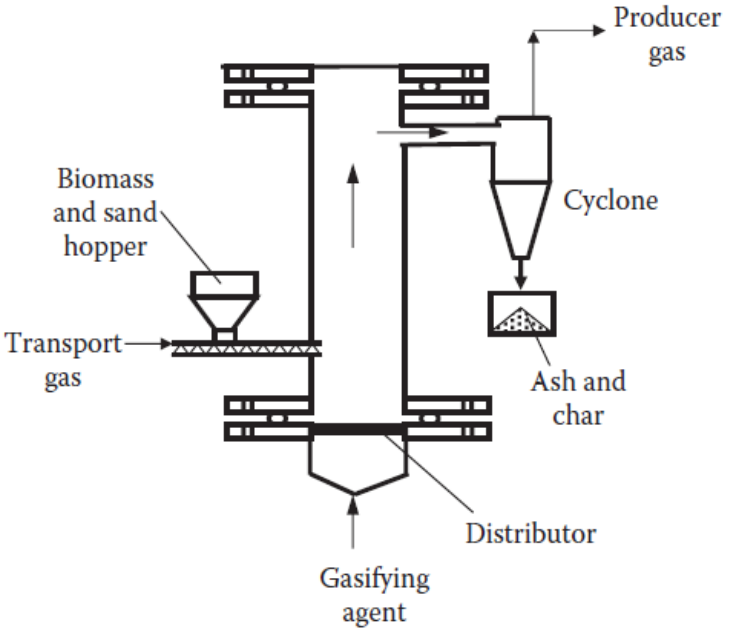

Ilustración 13: Esquema de un gasificador de lecho fluidizado burbujeante. [2]

En el caso del gasificador de lecho fluidizado circulante (Ilustración 14) el material orgánico se pone en contacto con el agente gasificante en el reactor, pero con una velocidad mayor que en el sistema de BFB, posteriormente pasa al separador de ciclón donde se obtiene el gas producto y se separa del material residuo carbonoso, el cual vuelve a recircular en la columna ascendente.

En este sistema el tiempo de residencia total del material es mayor que en el BFB, sin embargo se obtiene un producto con menor cantidad de residuo carbono o alquitrán.

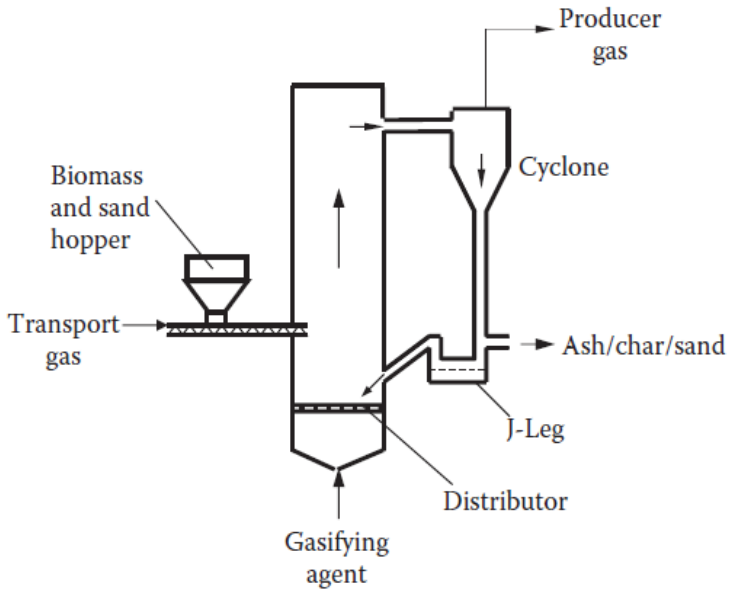

Ilustración 14: Esquema de gasificador de lecho fluidizado circulante. [2]

8.1.3 *Pirólisis*

La pirólisis es la descomposición termoquímica de la materia orgánica a altas temperaturas (500ºC aproximadamente) en ausencia de oxígeno, produciendo gas de síntesis, productos líquidos hidrocarbonados y residuos sólidos carbonosos. Los productos líquidos obtenidos en la pirólisis (bio-aceite o bio-crudo) están constituidos por una fracción acuosa y otra de alquitrán, que pueden tener múltiples usos tales como calefacción, generación de energía o ser convertido en productos químicos de interés industrial.

Los productos sólidos se pueden utilizar como combustible sólido para calefacción, etc. Mientras que el gas producido puede ser utilizado para calentar el reactor de pirólisis o en calderas y turbinas de gas para producir electricidad.

La Tabla 6 muestra las diferentes formas de energía que se pueden obtener a través del proceso de pirólisis.

Además, cabe destacar que diferentes tipos de procesos de pirólisis conllevan a diversos productos, dependiendo de la temperatura y el calor suministrado. También la naturaleza de la biomasa es un factor que afecta en gran medida al proceso de pirólisis. Ya que típicamente los materiales lignocelulósicos, como la madera, tallos, paja, residuos forestales, etc. son pobres conductores de calor. Por lo que este tipo de materiales requieren un pretratamiento como la reducción de tamaño antes de ser utilizados en el proceso de pirólisis y así obtener resultados aceptables.

La pirolisis flash o pirolisis rápida de biomasa se utiliza para producir principalmente productos líquidos (bio-aceite), permitiendo la conversión de biomasa con una eficiencia de sobre el 80%. [1]

Producto de Pirólisis	Tipo de pirólisis	Rendimiento
Carbón vegetal (Charcoal)	Carbonización, pirólisis lenta	Hasta un 35%
Bio-aceite	Pirólisis flash, bajas temperaturas	Hasta un 80%
Gas	Pirólisis flash, bajas temperaturas	Hasta un 80%

Tabla 6: Principales productos del proceso de pirólisis. [1]

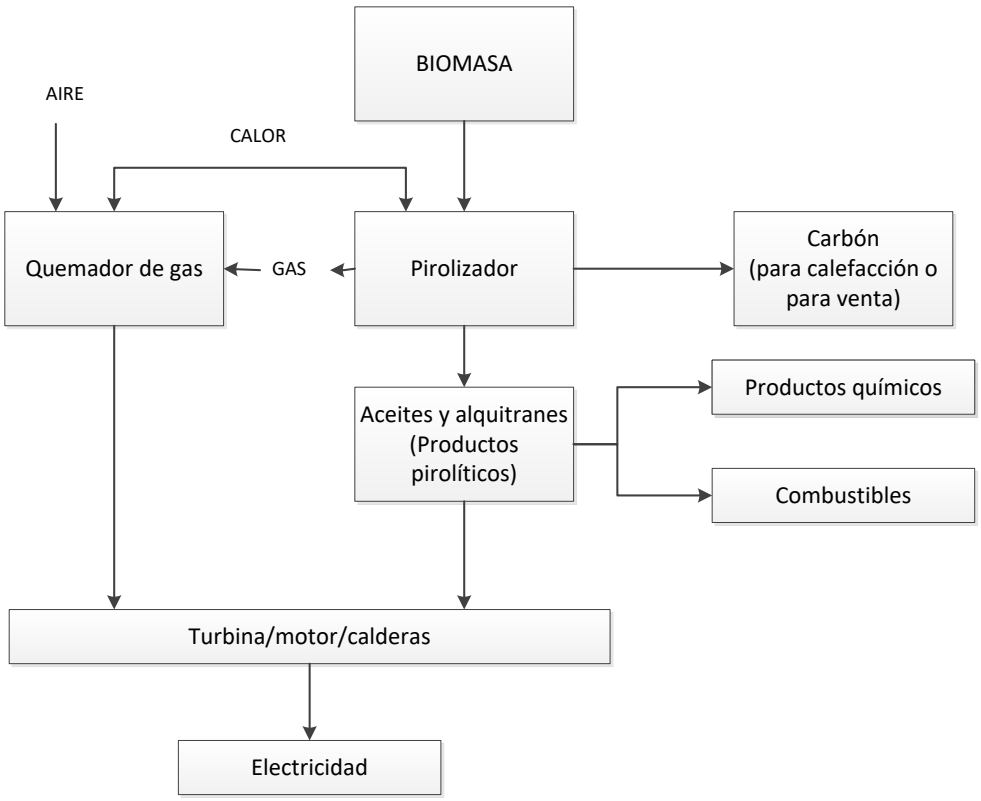

Ilustración 15: Diagrama de alternativas de conversión de energía en Pirólisis. [8]

8.1.4 *Licuefacción*

La licuefacción es el proceso de conversión de biomasa en líquidos hidrocarbonados estables usando temperaturas moderadas y altas presiones.

En este proceso la materia orgánica se calienta con vapor o hidrógeno y monóxido de carbono a temperaturas de alrededor de 200°C a 450°C y presiones de 25 [MPa] aproximadamente en presencia de catalizadores esto tiene una duración de entre 5 a 15 [min], obteniéndose un producto líquido.

El principal objetivo es obtener un producto combustible líquido con un alto poder calorífico y bajo contenido de oxígeno, esto hace que el combustible sea más estable y tenga mejores propiedades.

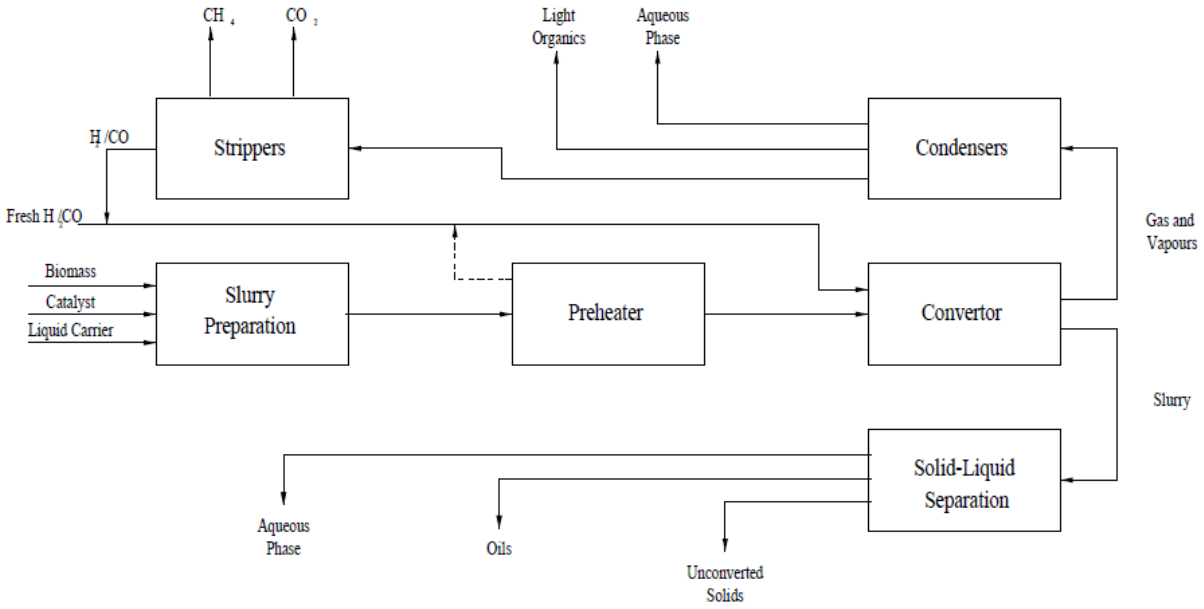

Ilustración 16: Diagrama de flujo del proceso de Licuefacción. [1]

Comparación entre Pirólisis y Licuefacción

Los procesos de pirólisis y licuefacción son ambos procesos termoquímicos de conversión de la materia orgánica en productos de fase líquida. La diferencia radica en que en el proceso de licuefacción se utiliza un catalizador para convertir las macromoléculas de la biomasa en fragmentos más pequeños. Además, la biomasa pasa por procesos de bajas temperaturas y altas presiones.

En el proceso de pirólisis generalmente no es necesario utilizar un catalizador, y los fragmentos de biomasa son convertidos en compuestos aceitosos a través de reacciones homogéneas en la fase de gas.

En la Tabla 7 se muestran las diferentes condiciones de operación de ambos procesos.

Proceso	Temperatura [K]	Presión [Mpa]	Proceso de secado
Pirólisis	650 - 800	0.1 - 0.5	Necesario
Licuefacción	525 - 600	5 - 20	Innecesario

Tabla 7: Comparación entre los procesos de Pirólisis y Licuefacción. Fuente: Demirbas, 2001a.

[10] Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, Mechanisms of Thermochemical Biomass Conversion Processes. Part 3: Reactions of Liquefaction, M. Balat

8.2 Proceso de Conversión Bioquímica

Los procesos de conversión bioquímicos son más amigables con el medio ambiente que los procesos termoquímicos, aunque poseen la desventaja de ser procesos lentos, ya que algunas tecnologías requieren grandes períodos de tiempo para convertir la biomasa en recursos.

Además, los procesos bioquímicos son principalmente usados para la conversión de residuos orgánicos, tanto desechos agrícolas como sólidos municipales, que son difíciles de procesar debido a la baja densidad de energía que poseen.

Entre los productos del proceso de conversión bioquímico se encuentra el biogás, biocombustibles líquidos como biodiesel, bioetanol, biometanol e hidrógeno.

Además, los procesos bioquímicos se pueden clasificar en tres categorías:

Fermentación aeróbica: produce compost, dióxido de carbono y agua.

Digestión anaeróbica: el que produce gas fertilizante y biogás.

Fermentación alcohólica: produce etanol, dióxido de carbono y residuos.

8.2.1 *Compostaje Industrial*

El compostaje es la transformación biológica controlada de los residuos orgánicos bajo condiciones aeróbicas, es decir en presencia de oxígeno, por microorganismos tales como diferentes tipos de bacterias, levaduras y hongos.

La degradación de la materia orgánica conduce a la liberación de CO_2, H_2O y calor, y a la producción de minerales, biomasa y humus, tal como se muestra en la Ilustración 17.

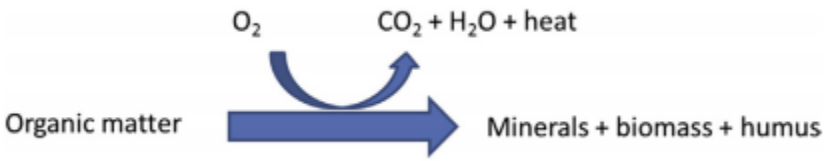

Ilustración 17: Esquema de la Transformación de la materia orgánica [11]

En promedio, el 65% de la materia orgánica es transformada durante las 12 semanas de compostaje activo en condiciones industriales, lo que resulta en una disminución de volumen del 50% aproximadamente. La materia orgánica restante se degrada a un ritmo mucho más lento, con lo que lentamente se van liberando los nutrientes para la vida de las plantas, y el humus presente en el compost mejora la estructura del suelo, proporcionando una estructura estable y buena retención de agua en el suelo.

El compost se puede considerar como un biofertilizante a largo plazo, por un lado, y además como acondicionador de suelos. Las altas temperaturas que se alcanzan durante el proceso de compostaje industrial, garantizan la eliminación de los patógenos y semillas de malas hierbas. Por lo tanto, los riesgos ambientales en la aplicación de compost quedan eliminados.

Parámetros importantes de la biomasa en el compostaje

Las fracciones orgánicas, caracterizados por una buena biodegradabilidad, se pueden utilizar como material de entrada para un proceso de compostaje industrial. Algunos ejemplos de materiales de entrada adecuados son vegetales y frutas, restos de poda, recortes, madera triturada, digestato, etc.

La calidad del material de entrada está determinada principalmente por tres parámetros:

- Relación de carbono / nitrógeno (C/N)
- el contenido de humedad
- estructura.

a) Relación Carbono/Nitrógeno (C/N)

Durante el compostaje, los microorganismos requieren Carbono para su crecimiento y energía y Nitrógeno para la síntesis de proteínas. Las condiciones óptimas de compostaje se obtienen a relaciones C/N de 20-30. A mayores relaciones C/N, ciertamente por encima de 40, la población microbiana carecerá de nitrógeno, y el proceso de compostaje se ralentizará. En menores proporciones C/N, el exceso de nitrógeno se dará a conocer en forma de amoníaco, que causa problemas de mal olor.

b) Contenido de Humedad

El contenido de humedad en los residuos orgánicos es muy importante en los procesos de compostaje, ya que debiesen estar entre un rango óptimo de 45% a 55% de humedad. Si el contenido de humedad es menor a 30% toda la actividad microbiana se detiene, y por otro lado si la humedad es muy alta (sobre el 70%) la aireación de los residuos orgánicos se torna muy difícil, por lo que las condiciones anaeróbicas comienzan a prevalecer.

c) Tamaño de partícula

Otro de los factores a tener en consideración en el compostaje es el tamaño de partícula, en donde se prefiere un tamaño de partícula menor ya que así se proporciona una mayor área de superficie en el cual se pueden alimentar los microorganismos.

Proceso de Compostaje

Existen dos enfoques principales para realizar el proceso de compost: compostaje activo y pasivo (Haug 1993).

En el compostaje activo existen condiciones para que se desarrollen bacterias aeróbicas, las que cuales descomponen el material orgánico de forma más rápida y con menos olor que las bacterias de un ambiente anaeróbico.

Operaciones de compostaje industrial manejan y controlan las condiciones de compostaje mediante el parámetro de C/N.

En este proceso de compostaje se debe alcanzar altas temperaturas, debiéndose lograr en un ambiente controlado donde exista una adecuada aireación y porcentaje de humedad.

En el compostaje con aireación forzada el aire es introducido en el compost con diversas tecnologías, las que permiten a las bacterias actuar sobre el material y a medida que se eleva la temperatura va permitiendo que el proceso de conversión bioquímico se desarrolle más rápido.

El compost aireado es una buena fuente de nutrientes y es una materia orgánica estable que permite el crecimiento adecuado de las plantas.

En el compostaje pasivo la temperatura generalmente no supera los 30°C, además es el tipo de compostaje más lento y los sistemas pueden ser cerrados, como en los reactores de compostaje o abiertos, como en las pilas estáticas o dinámicas.

Fases en el compostaje

El proceso de compostaje se puede dividir en tres fases [12], en la primera fase algunos componentes son degradados debido al calentamiento inicial. En la segunda etapa la temperatura alcanza valores sobre los 45°C por lo que se degrada la celulosa y se libera agua, dióxido de carbono, amoniaco y calor. En la tercera fase, se produce la fase de curado o maduración de compostaje, en donde disminuye la temperatura y aumenta la humedad del material, produciendo una recolonización de microorganismos, como se aprecia en la Ilustración 18.

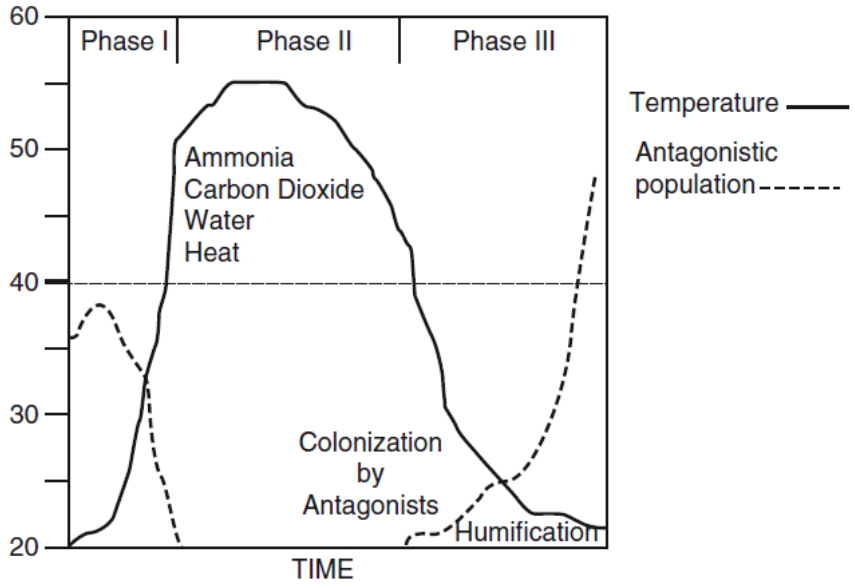

Ilustración 18: Diagrama de Temperatura en las fases del proceso de compostaje. Smith 1992 [12]

Clasificación General de los sistemas de Compostaje [13]

Existen múltiples sistemas y tecnologías para el proceso de compostaje, en general estas dependen de diversos factores tales como el tiempo de retención del material, el gasto de energía, el espacio que utilizan, la seguridad, etc.

Debido a que el compostaje es un proceso bioquímico, depende de múltiples parámetros y factores que no se pueden controlar sin embargo, existen ciertos parámetros como lo es la aireación y la humedad que son claves para obtener un compostaje adecuado.

En relación a estos parámetros los sistemas de compostaje se pueden clasificar en Sistemas Abiertos y Cerrados.

<u>Sistemas Abiertos:</u>

- Pila Móvil
- Pila Estática

<u>Sistemas Cerrados (en Reactores):</u>

- Reactores Verticales
- Reactores Horizontales e Inclinados
- Túneles de compostaje

Sistemas Abiertos

Los sistemas abiertos o de pilas pueden ser subdivididos en base al método de aireación en Sistemas de pila móvil (de volteo) y Sistemas de pila estática (de aire forzado).

Sistema de pila estático con aireación forzada

En este sistema el material orgánico es apilado en pilas de compostaje, las que permanecen fijas durante todo el proceso de compostaje, esto implica que la temperatura aumente. La aireación en estas pilas es suministrada mediante aire a presión. El sistema de aireación forzada consiste principalmente en un primer período en donde pasa aire hacia dentro de la pila, luego el aire es forzado hacia arriba de la pila, donde posteriormente ocurre una etapa de succión en el que el aire sale del sistema directamente al ambiente o es forzado a pasar por otra pila de compostaje.

En la Ilustración 19 se muestra el proceso de compostaje en pilas con aireación forzada.

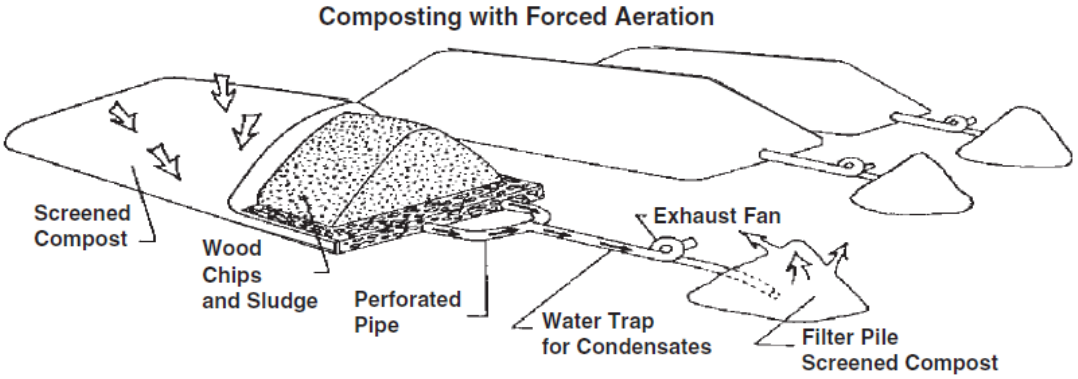

Ilustración 19: Esquema del sistema de compostaje en pilas estáticas. [14].

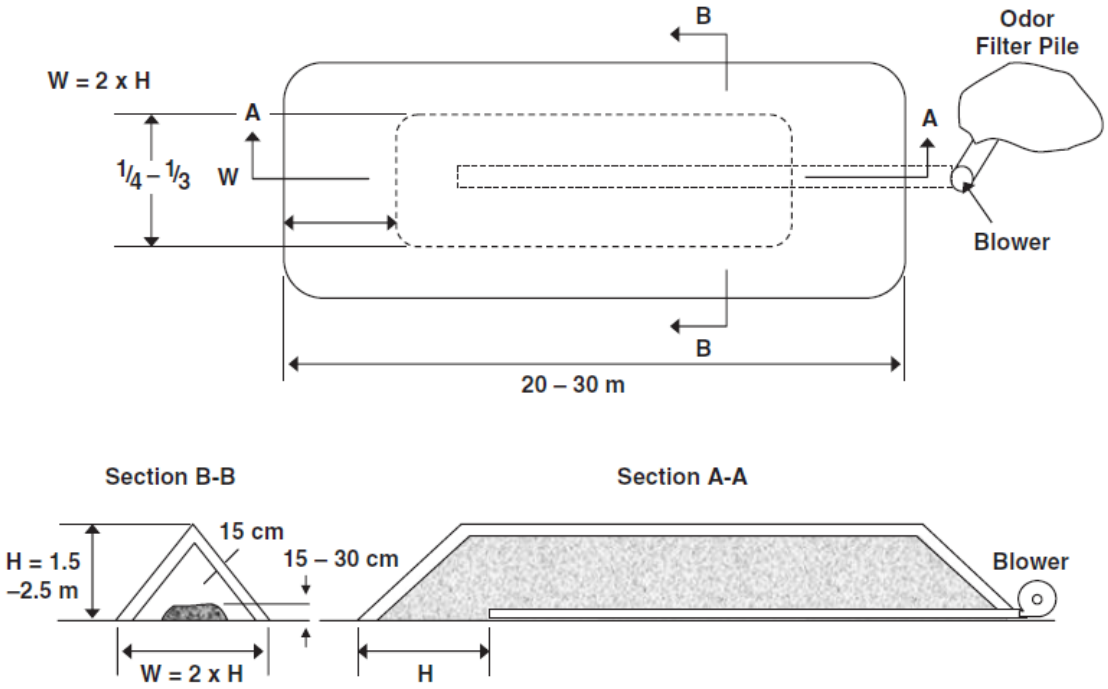

Ilustración 20: Dimensiones aproximadas de una pila estática de compostaje. [14].

Sistema de pila móvil o por volteo

El sistema de pila móvil es el método que tradicionalmente ha sido asociado con el compostaje. El sistema por volteo hace referencia a derribar la materia orgánica que se encuentra en las pilas para luego reconstruirlas, esto permite la aireación del proceso y también asegura la uniformidad de descomposición de todo el material de compostaje, además de reducir el tamaño de partículas de la biomasa.

Los tiempos de fermentación son de aproximadamente de dos a cuatro semanas, luego el material debe pasar por la etapa de maduración para completar el proceso de compostaje.

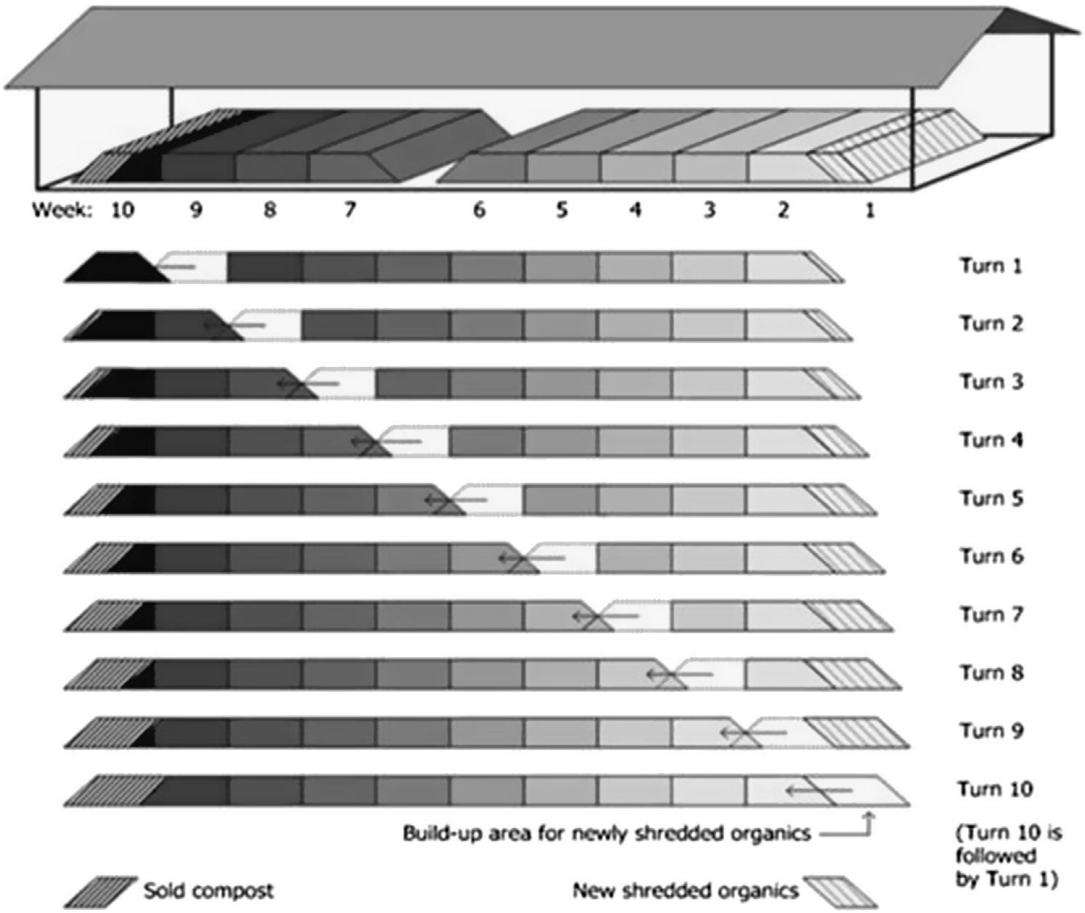

Ilustración 21: Esquema de sistema de pilas por volteo. [11]

[11] Chapter 4 Organic Recycling of Agricultural Waste Today: Composting and Anaerobic Digestion - N. Mortier, F. Velghe, S. Verstichel.

Ilustración 22: Máquina volteadora de compost, Sistema de pila móvil. [13]

[13] Industrial Composting: Environmental Engineering and Facilities Management - Eliot Epstein

Sistemas Cerrados (In-Vessel)

Los sistemas in-vessel se refieren a la unidad o conjunto de unidades en que se lleva a cabo la etapa activa del compostaje.

Debido a que en el proceso de compostaje se pueden observar dos fases, la primera es una fase de alta tasa de descomposición o fase preliminar, que puede durar varias semanas y que se caracteriza por una elevación de la temperatura debido a la descomposición del material degradable como el azúcar o almidón y la segunda es la tasa de descomposición lenta o fase de maduración. Estas tecnologías están enfocadas principalmente a la primera fase, por lo que después deben pasar a la etapa de maduración.

Desde que el compostaje es un proceso esencialmente biológico, estas unidades son llamadas "bioreactores". En la actualidad, existen numerosos diseños y tipos de bioreactores, ya que se han desarrollado nuevas tecnologías a lo largo de los años. Los bioreactores pueden ser de dos tipos: horizontales o verticales.

Otro tipo de reactores son los reactores inclinados o los tambores rotatorios (*rotating drum* en inglés), este tipo de reactor es normalmente usado en la fase de compostaje activa y funciona mezclando la biomasa a medida que el cilindro va girando, y con la ayuda de aletas internas se va reduciendo el tamaño del material y acelerando el proceso de compostaje.

Reactores verticales (descontinuada)

Este tipo de tecnología fue desarrollada en la década de 1980 y principios de 1990, la cual fue muy popular en países como Estados Unidos, sin embargo en la actualidad esta tecnología se encuentra descontinuada debido a una serie de problemas tales como la excesiva compactación del material, la pobre aireación y las dificultades para extraer el material.

Un reactor vertical consiste básicamente en un recipiente cilíndrico o tanque. Estos reactores están fabricados de acero y generalmente son aislados térmicamente. El proceso de compostaje en estos reactores consiste en introducir la biomasa en la parte superior y el material resultante es retirado desde la parte inferior de la unidad, generalmente utilizando un transportador de tornillo. Los reactores verticales están diseñados para operar en forma continua Ilustración 23.

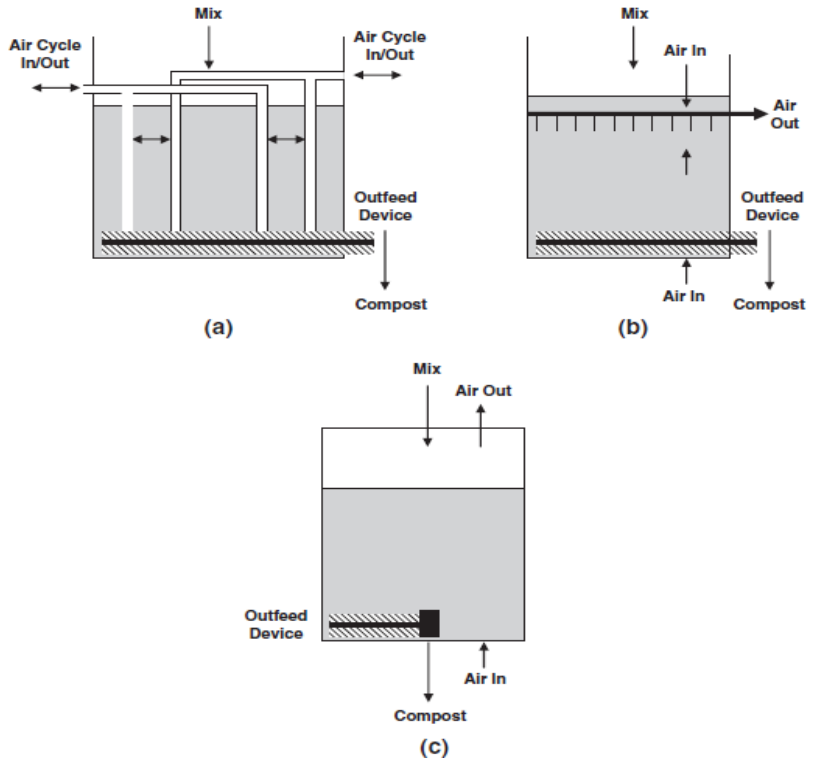

Ilustración 23: Diagrama esquemático de los reactores verticales. [13]

Reactores horizontales

Existen diversos tipos de reactores horizontales, algunos de los más importantes se presentarán a continuación:

Canales

Los canales es una tecnología similar a las Hileras de compostaje, sin embargo se diferencian en que en los canales de compostaje el material a tratar (biomasa) es colocado entre paredes, estas paredes tienen una altura de entre 1 a 3 [m] y son de 50 [m] de largo aproximadamente.

Esta tecnología se basa en el compostaje a través de ventilación forzada.

Ilustración 24: Muestras de Canales de compostaje. [14]

Túneles de compostaje

Los túneles o "bio-túneles" generalmente son usados principalmente en pequeñas instalaciones y son efectivos en el control de olores y emisiones propias del proceso de compostaje. En los túneles la materia orgánica es introducida en un extremo y la biomasa se va moviendo hacia el otro extremo con la fuerza de un pistón hidráulico. El aire es suministrado generalmente por compresores o por ventiladores centrífugos, para evitar el exceso de ruido provocado por el compresor. Además se instalan tubos en el techo para eliminar el aire de descarga a través de presión negativa.

La descomposición preliminar en túneles tiene una duración de 7 a 21 días y tiene como resultado final la producción de compost fresco, el cual puede ser trasformado a compost maduro en 4 a 8 semanas.

Ilustración 25: Túneles de compostaje con membrana semipermeable. [15]. (http://www.leblan.com/residuo_urbano.php)

Tambores rotatorios de Compostaje (Rotating Drum)

Este sistema consta de un cilindro rotatorio, el cual posee una ligera inclinación para que el material (biomasa) que será parte del proceso de compostaje fluya desde la parte superior hasta la parte del fondo de la unidad. Durante este proceso se mezclan residuos sólidos de distinta naturaleza, los cuales son agitados en el interior del cilindro.

Este es uno de los métodos dinámicos de descomposición, y en donde los residuos siguen un curso helicoidal desde la entrada a la salida y los desechos se van continuamente girando y mezclando dentro de estos tambores, lo que implica un compostaje de materias primas más diversificada.

Existen diversas tecnologías de tambores giratorios, y las medidas varían de acuerdo a diversos factores, sin embargo, pueden llegar a medir 45 [m] de largo y tener de 2 a 4 [m] de diámetro. Además, la velocidad de rotación del tambor varía entre 0,2 a 2 [rpm]. En la Ilustración 26 se puede apreciar un tambor giratorio de compostaje estándar.

Algunos de los tambores incorporan aletas internas, las que son útiles para reducir el tamaño del material, además de mezclarlo de mejor manera y conducirlo hacia la salida de una forma más rápida.

Este tipo de tecnología es usado normalmente para la fase activa de compostaje. En donde el tiempo de retención de estos tambores varía desde las 24 horas hasta los 7 días dependiendo de la tecnología y de las especificaciones del fabricante. También cabe destacar, que este proceso se puede acelerar controlando algunos factores como el contenido de oxígeno y humedad, además de la naturaleza de la biomasa de entrada, en el cual materiales que son fácilmente biodegradables pueden ser procesados en un par de días. Sin embargo, estos tambores de compostaje no proporcionan el proceso de compostaje completo, ya que luego del tratamiento en estos cilindros, el material es llevado a la próxima fase llamada maduración o curado del compost, el cual dura un par de semanas y se lleva a cabo en hileras de compostaje.

Una de las ventajas de esta tecnología es que los tambores se pueden diseñar a la medida, según el tamaño del terreno, la cantidad de material a tratar, etc.

Ilustración 26: Vista de un sistema de Tambor rotativo de compostaje estándar. [14]

Ilustración 27: Reactor giratorio de Compostaje "Drum" (DTEnvironmental). [11]

Tiempo de duración de los procesos de compostaje

Sistema de Compostaje	Duración en fase preliminar de compostaje	Duración fase estabilización
Pilas de compostaje	3 - 9 semanas (dependiendo de la frecuencia de volteo de pilas)	
Pila estática de compostaje con aireación forzada	8 semanas aproximadamente	
Túneles de compostaje	7 - 21 días	Algunas semanas adicionales*
Reactores horizontales	1 - 7 días	Algunas semanas adicionales*
entre 4 a 8 semanas utilizando compostaje en pilas		

Tabla 8: Duración de algunos procesos industriales de compostaje. [11]

8.2.2 *Digestión anaeróbica*

La digestión anaerobia es un proceso que involucra la degradación y estabilización de materiales orgánicos bajo condiciones anaeróbicas debido a una serie de microorganismos (bacterias fermentativas, bacterias acetogénicas, arqueas metanógenas, etc.) generando biogás.

El biogás es un biocombustible compuesto principalmente por metano CH_4 (55-75%) y dióxido de carbono CO_2 (25-45%), además de vapor de agua y pequeñas cantidades de H_2S, NH_3 y H_2. [16]

El proceso de descomposición de la materia se produce en biodigestores, los cuales están diseñados para tener un control adecuado de diversos factores tales como la temperatura, pH y aeración para que los microorganismos puedan llevar a cabo el proceso de forma adecuada.

La digestión anaerobia presenta una serie de ventajas frente a otros procesos biológicos tales como biodiesel, bioetanol y bio-hidrógeno. Esto se debe a que la digestión anaerobia es capaz de procesar una amplia gama de materiales orgánicos, como residuos agrícolas, municipales, abonos, cultivos energéticos, entre otros.

Los biodigestores pueden ser clasificados según diversos criterios, como por ejemplo según la frecuencia de carga de la materia orgánica (discontinuo, semi-continuo, continuo), según el número de etapas (una o dos etapas), según la temperatura del proceso, la naturaleza del material orgánicos, etc.

El biogás puede ser valorizado como biocombustible o puede ser convertido en calor y energía eléctrica a través de un sistema de cogeneración, siendo esta última opción la más utilizada en las plantas de producción de biogás de Europa, las cuales utilizan el calor para el consumo del propio biodigestor y la electricidad generalmente se utiliza para alimentar la red eléctrica local.

En el proceso de digestión anaerobia además de biogás se produce digestato, que es una mezcla de biomasa y materiales no degradados, el cual es separado a través de mecanismos mecánicos en líquido y fracciones sólidas. Este material se puede utilizar como fertilizante en los suelos ya que contiene elementos como nitrógeno y potasio.

Sin embargo, también se puede tratar este digestato para obtener energía siguiendo algún método de conversión como lo son los procesos termoquímicos, biológicos, etc.

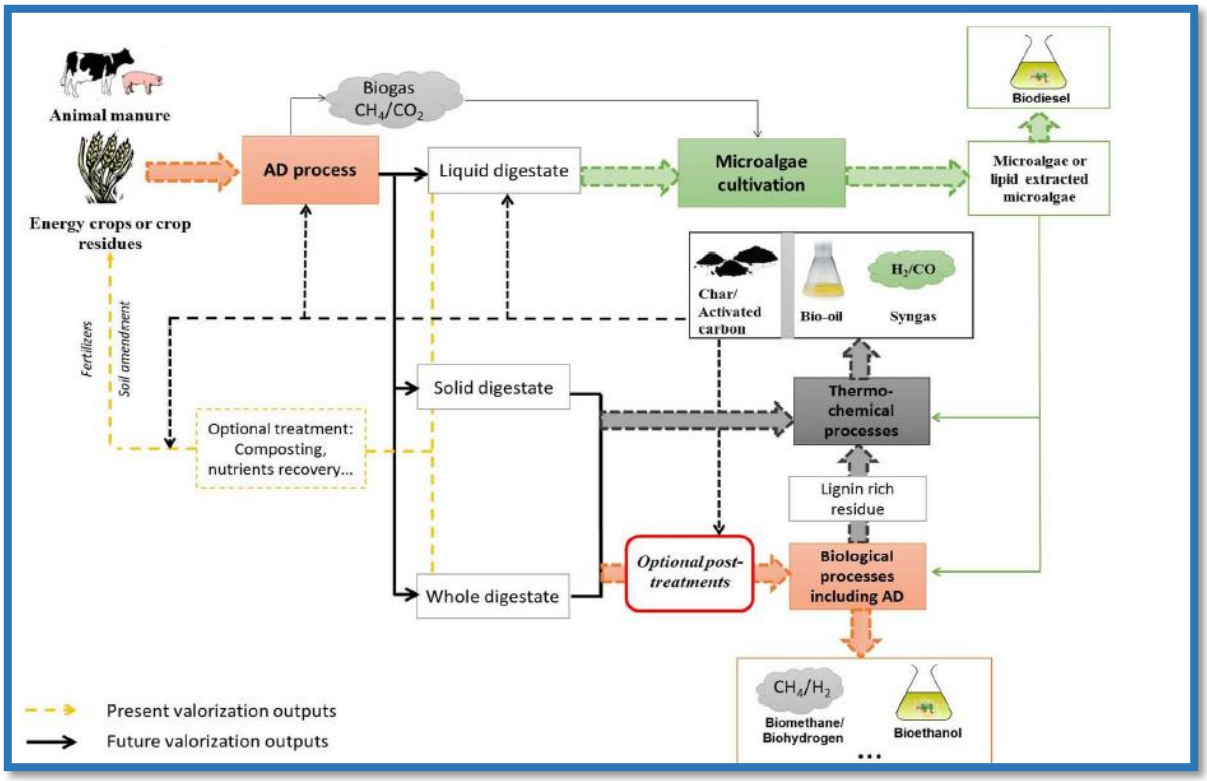

Ilustración 28: Proceso de valorización alternativa de digestato proveniente de la digestión anaerobia. [16]

8.3 Proceso físico-químico

Biocombustibles

Los biocombustibles son combustibles líquidos o gaseosos que son obtenidos desde materia orgánica o diferentes residuos tales como: agrícolas, municipales, etc. Estos pueden ser clasificados en cuatro categorías dependiendo de la naturaleza de biomasa utilizada y presentan distintos grados de desarrollo.

Los biocombustibles de **primera generación** son combustibles obtenidos a partir de cultivos energéticos tales como el azúcar, el almidón y cereales utilizando tecnologías convencionales. La principal desventaja de este tipo de combustible es que el principal material de alimentación es recurso que puede ser ocupado como alimento, por lo que existe esa controversia de utilizar los recursos de una mejor forma. Debido a este problema, es que aparecen los biocombustibles de segunda generación, los cuales necesitan otro tipo de materiales que no pueden ser utilizados como alimentos directamente, tales como residuos agrícolas, forestales, industriales y residuos domésticos. Algunos ejemplos son el biodiesel, bioetanol, biobutanol, entre otros.

Los biocombustibles de **segunda generación** son producidos principalmente por métodos termoquímicos y bioquímicos. Algunos ejemplos son el biogás o los bio-alcoholes.

Los biocombustibles de **tercera generación** son aquellos combustibles producidos de algas marinas, por lo que requieren biomasa de algas provenientes de diversos tipos de suelo, como en zonas pantanosas, agua de mar y suelos que son completamente improductivos desde el punto de vista del cultivo.

Los biocombustibles de **cuarta generación** están todavía en una fase conceptual por lo que aún no se convierten en realidad. Estos combustibles están producidos por tecnologías que pueden convertir con éxito la biomasa en combustibles, de tal manera que el CO_2 consumido en su generación, es mucho más que el producido como resultado de su combustión, generando una importante reducción de los gases del efecto invernadero.

9 Selección de tecnologías y equipos

Luego de analizar las diferentes posibilidades de conversión de residuos agrícolas en productos, se tienen dos métodos principales, siendo el primer método el proceso de compostaje. Se analizaron los tipos de compostaje y se describieron las características de cada uno de estos tipos. La segunda alternativa de conversión está presente en los métodos de pre procesamiento de biomasa o tecnologías de densificación, como lo son el peletizado y el briquetado, capaces de convertir la biomasa en recursos combustibles que se pueden tratar posteriormente a través de la combustión o gasificación.

Para la evaluación económica de la planta de tratamiento de residuos agrícolas se descarta el proceso de compostaje, principalmente debido a la alta duración de estos procesos, los cuales pueden demorar varias semanas y en segundo lugar, debido al bajo precio de venta de compost. Por lo que se opta por la tecnología de densificación de biomasa como lo es el peletizado, en donde se obtienen pellets como productos aumentando el poder calorífico de estos residuos agrícolas y obteniendo un potencial energético considerable.

Para el aprovechamiento energético de este tipo de biomasa, se debe tener un proceso de secado eficiente, por lo que se opta por la utilización de la tecnología de Techo Solar Activo, en donde se aprovecha la energía solar para aumentar la temperatura del aire de secado y así, poder secar estos residuos agrícolas vegetales y disminuir la humedad desde un 85% hasta un 15%, que es lo ideal para el proceso de peletizado.

9.1 Radiación solar en la zona

9.1.1 *Conceptos previos*

Colectores solares aplicados al secado [20]

El colector solar es un equipo diseñado para convertir la energía solar en energía térmica. Este dispositivo es utilizado para el calentamiento de un fluido, que puede ser agua, para obtener calefacción y agua caliente sanitaria, o el uso de aire, en donde se puede aplicar a los procesos de secado.

La radiación solar es absorbida en una superficie absorbente, usualmente de color negro, el cual posee una cubierta transparente usualmente de vidrio o plástico que permite el paso de la radiación. El fondo y los costados del colector son aislados térmicamente.

Eficiencia de un colector solar

El colector solar es capaz de entregar un calor útil por unidad de tiempo Q_u, en forma de aire caliente, que es la diferencia entre la energía solar absorbida por la superficie captora en ese tiempo y la energía pérdida por el colector al ambiente. Por lo que la eficiencia del colector solar se puede definir como:

(1) $$\eta = \frac{Q\ \acute{u}til}{I * A_c} \qquad [-]$$

Por lo que la eficiencia del colector depende del calor útil $Q_{útil}$, y el producto de la radiación incidente I por el área bruta del colector.

También es posible calcular la eficiencia del colector para un cierto instante, el cual es función de los parámetros operativos del sistema, como la radiación incidente I, la temperatura ambiente T_a y la temperatura del aire a la entrada del colector T_e. Esta relación se muestra en la siguiente fórmula:

(2) $$\eta_i = \dot{m} * C_p * \frac{(T_{in} - T_{out})}{I_t * A_i} \qquad [-]$$

Definiciones

Irradiancia: Tasa de transferencia de energía radiante sobre una superficie, medida en [W/m^2].

Irradiación: Cantidad de energía incidente en una superficie en un cierto período de tiempo, medido en [J/m^2] o [MJ/m^2].

9.1.2 *Fuente de información climática NCh 20.365 [21]*

Con la norma técnica N°20.365, se obtiene la Radiación solar global sobre superficie Horizontal en [kWh/m^2], además del Factor modificador de la radiación Incidente a una superficie inclinada, lo que permite obtener la cantidad de radiación para el techo solar activo con la finalidad de secar los residuos agrícolas para lograr una humedad cercana al 15%.

La feria Femacal se encuentra en la comuna La Calera, provincia de Quillota, el cual se encuentra a una latitud media de 33° sur, zona climática C, Id 22.

Localidad: La Calera, Quillota; Latitud media: 33° sur.

	Media Mensual (R_{Gm})													**Media Anual**
	Isst	**ene**	**feb**	**mar**	**abr**	**may**	**jun**	**jul**	**ago**	**sep**	**oct**	**nov**	**dic**	
Temperatura ambiente [°C]	-	23,0	20,0	20,0	16,0	12,0	10,0	10,0	12,0	13,0	16,0	19,0	22,5	16,1
Radiación solar superf horizontal [kWh/m^2]	0	205	158	142	94	66	51	61	86	117	154	186	205	1525
Factor (F_{d_i})	20	0,98	1,04	1,13	1,24	1,35	1,42	1,38	1,28	1,16	1,06	0,99	0,96	-
Radiación solar [kWh/mes m^2]	20	**200,9**	**164,3**	**160,5**	**116,5**	**89,1**	**72,4**	**84,1**	**110**	**135,7**	**163,2**	**184,1**	**196,8**	1678

Calor útil mensual para una superficie de 100 [m^2] y 200 [m^2]

	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic
Energía media mensual [MJ/mes]@100	28.554	23.354	22.806	16.566	12.664	10.293	11.964	15.645	19.290	23.201	26.171	27.971
Energía media mensual [MJ/mes]@200	57.107	46.709	45.612	33.133	25.327	20.586	23.929	31.291	38.579	46.402	52.343	55.942
Energía media diaria [MJ/día]@100m^2	921	834	736	552	409	343	386	505	643	748	872	902
Energía media diaria [MJ/día]@200m^2	**1.842**	**1.668**	**1.471**	**1.104**	**817**	**686**	**772**	**1.009**	**1.286**	**1.497**	**1.745**	**1.805**

Calor útil diario promedio@100 m^2: 654 [MJ/día]

Calor útil diario promedio@200 m^2: 1309 [MJ/día]

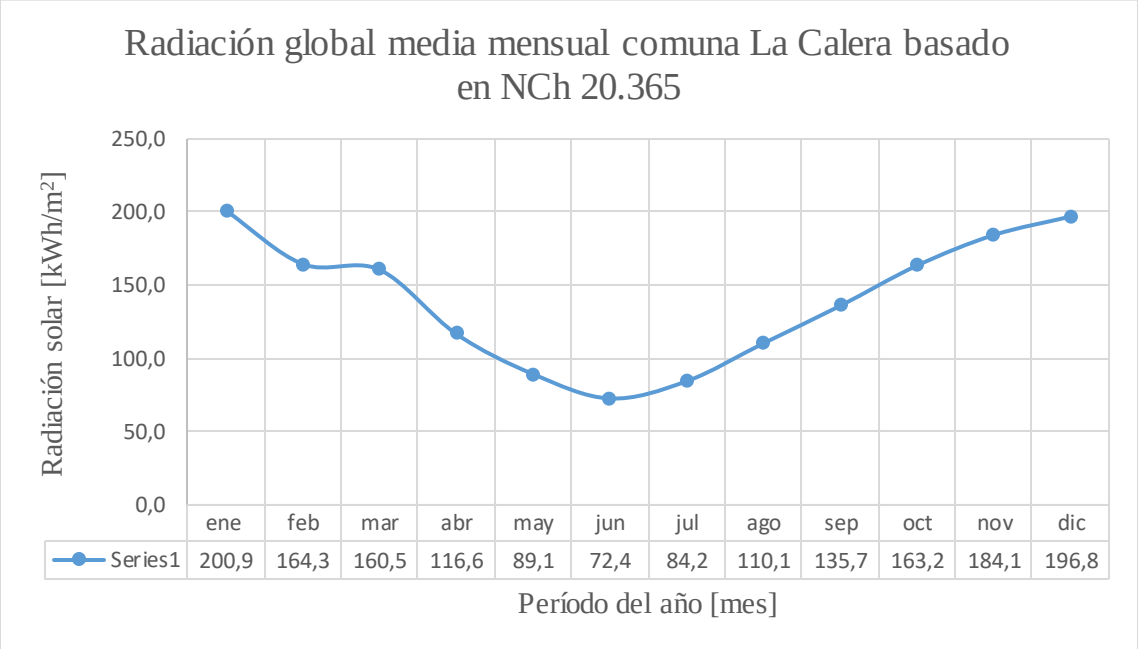

Gráfico 1: Radiación global media mensual corregido por factor de inclinación de 20° en la comuna de La Calera según NCh 20.365

9.1.3 *Cantidad de residuos agrícolas a secar en función de la superficie de techo solar*

La Fuente de información climática se utiliza para obtener la radiación solar media mensual (G_t) de la comuna de La Calera, que junto con los datos de nuestro sistema es posible calcular el calor útil que va a aportar el techo solar activo en la feria Femacal.

(1) $$Q\ \acute{u}til = \eta_{global} * G_t * A_c\ [-]$$

Donde la eficiencia global viene dada por:

$$\eta_{global} = \eta_{colector} * \eta_{secador} * \eta_{ducto}$$

Eficiencia colector [%]	60	**Eficiencia ducto [%]**	94
Eficiencia secador [%]	70	**Área de colector base [m^2]**	100

Con estos valores se puede obtener el gráfico del calor útil disponible en función de la superficie de techo solar:

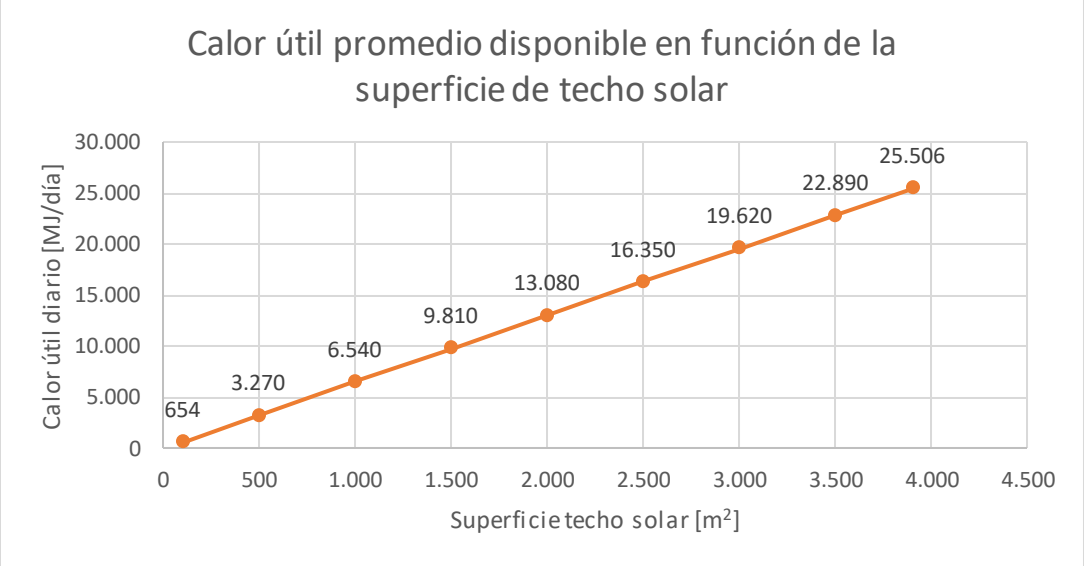

Gráfico 2: Calor útil promedio disponible en función de la superficie de techo solar.

Una vez obtenidos los datos de la cantidad de energía que se puede obtener en la feria Femacal (La Calera) y sabiendo el consumo energético específico necesario para el proceso de secado de los residuos agrícolas [25], el cual se ha proyectado en torno a los 3 [MJ/kg] para residuos de humedad inicial de 85%, se puede obtener la cantidad de residuos agrícolas que pueden ser secados en un día utilizando solo la energía solar disponible.

Los resultados se pueden apreciar en el siguiente gráfico:

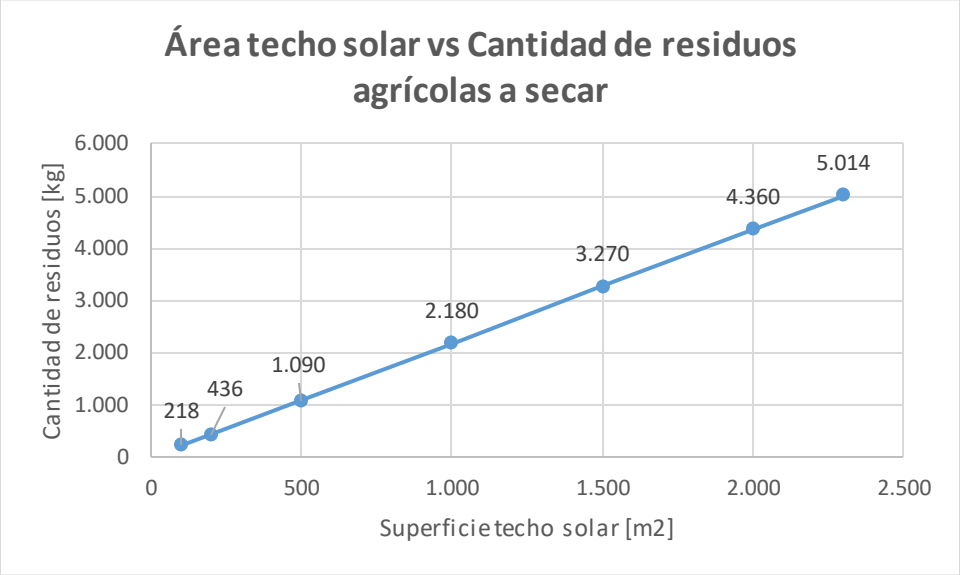

Gráfico 3: Área de techo solar activo vs cantidad de residuos agrícolas a secar en un período de 14 horas. (Los residuos agrícolas poseen una humedad inicial de 85% y tienen un consumo energético específico de 3 [MJ/kg]).

En el Gráfico 3 se puede apreciar que la cantidad de residuos agrícolas a secar tiene un comportamiento proporcional al área de techo solar activo disponible, ya que el calor útil disponible es proporcional al área del techo solar. Además si se tiene como base 100 [m^2] de superficie se concluye que se puede secar hasta una cantidad de 218 [kg] de residuos agrícolas utilizando solo la energía solar.

Por lo tanto, en el caso de querer secar una cantidad de 5.000 [kg] de biomasa en una tanda, se necesitará de 2.300 [m^2] de techo solar activo con recirculación de aire, tal como se aprecia en la siguiente tabla.

Área de techo solar [m2]	Residuos a secar [Kg]
100	218
200	436
500	1.090
1.000	2.180
1.500	3.270
2.000	4.360
2.300	5.014

Tabla 9: Área de techo solar activo vs cantidad de residuos agrícolas a secar. (Los residuos agrícolas poseen una humedad inicial de 85% y tienen un consumo energético específico de 3 [MJ/kg])

En modo de resumen, se utiliza un método de estimación de radiación en la zona de La Calera, a través de la Fuente de información climática NCh 20.365, se calcula el Calor útil disponible diario [MJ/día] y junto con el consumo energético específico de este material orgánico, se obtiene la cantidad de residuos a secar en función de la superficie de Techo Solar Activo. En donde, se tiene como resultado que son necesarios al menos 2.300 [m^2] de superficie para el secado de 5 [ton] de residuos agrícolas, bajando la humedad de estos hasta un 15%, utilizando solo la energía solar.

9.2 Procesos de acondicionamiento del aire [3]

En el secador solar, el aire es el medio con el cual se remueve la humedad del producto a secar y además sirve como el medio para transportar la energía para evaporar el agua del producto. Por lo que la forma en que circule el aire es un factor importante a tener en cuenta, el cual puede ser a través de convección natural o forzada.

En este caso, se utilizará ventiladores para mover el aire, por lo tanto serán secadores con convección forzada, para poder disminuir en forma más rápida el contenido de humedad de los residuos agrícolas.

Además la capacidad deshidratante del aire depende fundamentalmente de su humedad relativa, la cual es función de su temperatura.

En este caso, se utiliza un proceso de secado de techo activo, lo que permite elevar la temperatura del aire con la energía de la radiación solar, aumentando la capacidad desecante del aire y disminuyendo la humedad relativa.

Propiedades

Presión de vapor (P_v):

$$P_v = \emptyset * P_{saturación\ a\ T°} \quad [Pa]$$

Humedad absoluta o específica (ω):

$$\omega = \frac{m_{vapor}}{m_{aire\ seco}} \quad [\text{Kg } H_2O/\text{kg aire seco}]$$

Humedad relativa (∅):

$$\emptyset = \frac{m_{vapor}}{m_g} \qquad [\%]$$

Donde:

m_{vapor}: masa de vapor de agua.
$m_{aire\ seco}$: masa de aire seco.
m_g: cantidad máxima de humedad que el aire puede contener a una temperatura determinada.

9.3 Carta psicométrica [3]

Las cartas psicométricas del aire son gráficas que se utilizan en aplicaciones de acondicionamiento de aire, estas cartas permiten determinar el estado del aire atmosférico a una presión determinada mediante dos propiedades intensivas independientes. En este caso, se utiliza la carta psicométrica a 1 [atm] de presión.

Las evoluciones en el proceso de secado solar son:

1) Calentamiento (Estado 1 a Estado 2): proceso en el cual aumenta la temperatura y la humedad específica del aire (ω) se mantiene constante ($\omega_1 = \omega_2$). Se aumentara la temperatura del bulbo seco siguiendo una línea de humedad específica constante en la carta psicométrica.

2) Enfriamiento y humidificación (Estado 2 a Estado 3): En este proceso disminuye la temperatura del aire y la entalpía se mantiene constante ($h_2 = h_3$).

Los supuestos son:

Análisis de flujo estacionario, por lo que el caudal másico de aire se mantiene constante.

Vapor de agua y aire seco se tratan como gases ideales.

Estado 1: Temperatura: 20°C, Humedad relativa: 60%

Propiedad (T°=20°C, φ=60%)	**Valor**
Presión de saturación agua ($P_{sat\ @20°C}$)	2339 [Pa]
Presión de vapor (P_v)	935 [Pa]
humedad relativa (φ_1)	60 [%]
humedad específica (ω_1)	0,0088 [kg H_2O/kg aire seco]
Entalpía del aire húmedo (h_1)	42,5 [kJ/kg aire seco]
volumen específico (v_1)	0,842 [m^3/kg aire seco]

Estado 2: Temperatura: 40°C, Humedad específica (ω): 0,0088 [kg/kg]

Propiedad (T°=40°C, ω =0,0088 [kg/kg])	**Valor**
Presión de saturación agua ($P_{sat\ @40°C}$)	7385 [Pa]
Presión de vapor (P_v)	886 [Pa]
humedad relativa (φ_2)	19 [%]
humedad específica (ω_2)	0,0088 [kg H_2O/kg aire seco]
Entalpía del aire (h_2)	63,5 [kJ/kg aire seco]
volumen específico (v_2)	0,899 [m^3/kg aire seco]

Estado 3 real: Temperatura: 25°C, entalpía: 63,5 [kJ/kg]

Propiedad (T°=25°C, h: 63,5 [kJ/kg]	**Valor**
Presión de saturación agua ($P_{sat\ @25°C}$)	3169 [Pa]
Presión de vapor (P_v)	1901 [Pa]
humedad relativa (φ_3)	75 [%]
humedad específica (ω_3)	0,015 [kg H_2O/kg aire seco]
Entalpía del aire (h_3)	63,5 [kJ/kg aire seco]
volumen específico (v_3)	0,865 [m^3/kg aire seco]

Estado 3 teórico: entalpía: 63,5 [kJ/kg], Humedad relativa: 100% (no acontece en la realidad)

Propiedad (φ=100%, h: 63,5 [kJ/kg]	**Valor**
Temperatura	22 [°C]
Presión de saturación agua ($P_{sat\ @25°C}$)	2645 [Pa]
Presión de vapor (P_v)	2645 [Pa]
humedad relativa (φ_3)	100 % (ideal)
humedad específica (ω_3)	0,0164 [kg H_2O/kg aire seco]
Entalpía del aire (h_3)	63,5 [kJ/kg aire seco]
volumen específico (v_3)	0,858 [m^3/kg aire seco]

9.3.1 *Consumo energético en el secado*

Para determinar la cantidad de agua a eliminar en un tiempo t en un proceso de secado para pasar de una cantidad de humedad M_1 a M_2 (en base húmeda) se tiene la siguiente fórmula:

(2) $$W_a = \frac{W_o}{t} * (\frac{M_1 - M_2}{1 - M_2}) \qquad [kg/día]$$

A partir de esta fórmula se puede obtener la cantidad de agua a eliminar y los residuos secos que se pueden obtener a partir de un determinado número de residuos agrícolas a procesar, para disminuir la humedad de éstos desde un 85% de humedad hasta un 15% en el período de un día.

Cantidad residuos agrícolas (W_o) [kg/d]	**masa agua a eliminar (W_a) [kg/d]**	**residuos secos final $(W_o - W_a)$ [kg/d]**
5.000	4.118	882
4.000	3.294	706
3.000	2.471	529
2.000	1.647	353
1.500	1.235	265
1.000	824	176
500	412	88

Para obtener el consumo de aire [kg de aire seco] se utiliza la siguiente fórmula:

(3) $$m_a = \frac{W_a}{\omega_3 - \omega_1} \qquad [kg\ aire\ seco]$$

Para obtener el volumen de aire:

<u>Volumen de aire:</u>

(4) $$volumen\ de\ aire = m_a * \rho_a \qquad [m^3]$$

En el caso de estudio, se quiere tratar una cantidad de 5.000 [kg] de residuos agrícolas al día (en un período de 14 horas), los que contienen una humedad inicial promedio de 85%, considerando las muestras analizadas en el ensayo de humedad (Anexo N°1). Además para transformar estos residuos en recursos combustibles como pellets o briquetas se requiere que tengan un porcentaje de humedad no mayor a 15%.

Cantidad	Valor [Kg]
Cantidad inicial de residuos agrícolas húmedos (W_O)	5.000
Masa de agua a eliminar (W_a)	4.118
Residuos agrícolas secos (W_O-W_a)	882

Parámetros	Valor
Humedad inicial [%]	85
tiempo de secado [h]	14
temperatura de secado [°C]	65
masa de aire [kg]	664.137
flujo másico m_a [kg/s]	13,2
caudal aire [m3/h]	39.943
caudal aire [m3/s]	11,1
altura techo [m]	0,12
área transversal [m^2]	5,5
velocidad recomendada [m/s]	2,0

Tabla 10: Parámetros necesarios para secar una cantidad de 5.000 Kg de residuos agrícolas con un 85% de humedad.

9.4 Evaluación Planta de Peletizado en feria La Calera

9.4.1 *Área de techo solar activo requerida*

En el caso de estudio de la feria Femacal, se tiene una cantidad promedio de residuos agrícolas de 25 [ton/semana]. Por lo que el primer caso consistirá en evaluar la posibilidad de secar una cantidad de 5 [ton/día], en una jornada laboral de 5 días a la semana.

Se realizará la evaluación del caso base con la tecnología de techo solar activo utilizando una superficie de techo solar de 2.300 [m^2], realizando un análisis de sensibilidad respecto a los parámetros más importantes que puedan afectar al proyecto.

Se realizará la evaluación con una superficie de 2.300 [m^2], ya que es lo necesario para poder secar más de 5 [ton/d] utilizando solo la energía solar, de acuerdo a la Tabla 9: Área de techo solar activo vs cantidad de residuos agrícolas a secar. (Los residuos agrícolas poseen una humedad inicial de 85% y tienen un consumo energético específico de 3 [MJ/kg])

Finalmente se expondrá el análisis de otros casos, como la posibilidad de implementar una planta de deshidratado a escala en la feria Femacal para el aprovechamiento de la energía solar en la zona.

9.4.2 *Selección de ventilador*

Del análisis anterior, se concluye que para secar una cantidad de 5.000 [kg/d] de residuos agrícolas se requiere un ventilador de una capacidad de 39.943 [m^3/h].

Por lo tanto, se selecciona del catálogo de Sodeca se busca un ventilador equipado con motor eléctrico, conjunto de poleas y correas. Donde se selecciona un ventilador modelo CMR-2590-X-25 con las siguientes características:

Ventilador CMR-2590-X-25	
Caudal máximo [m^3/h]	51.250
Velocidad [rpm]	1.200
Potencia instalada [kW]	18,5
Presión máxima [mm c.a.]	190
Peso [kg]	720
Eficiencia [%]	66,9
Precio referencial [euros]	11.020 €
Precio [CLP diciembre 2016] (1€ = 704 CLP)	$7.758.080

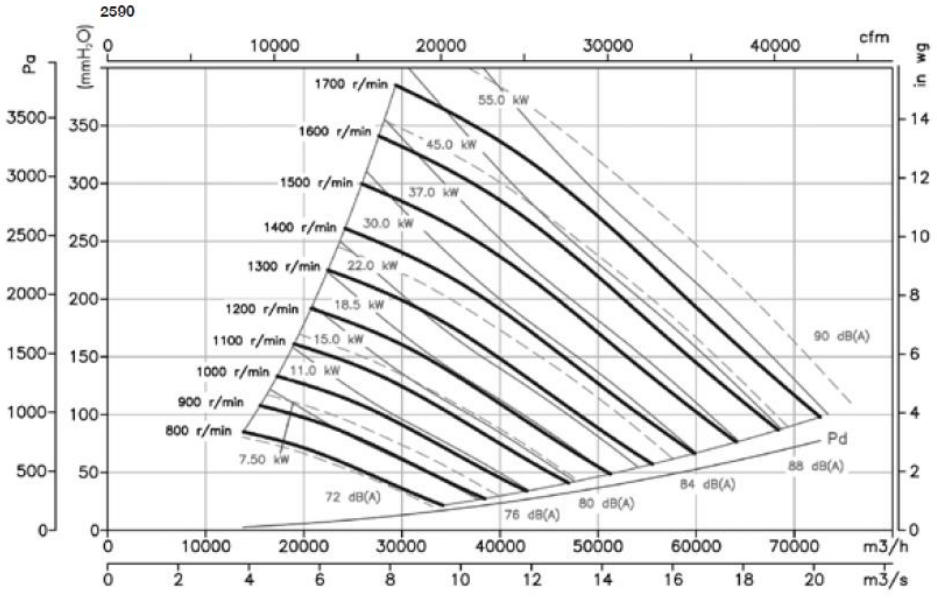

Ilustración 29: Curvas características ventilador Sodeca, modelo CMR-2590.

9.4.3 *Techo solar activo*

El techo solar activo es una tecnología incorporada por el Centro de Innovación Energética (CIE) de la Universidad Santa María y su funcionamiento radica en aprovechar la energía solar para precalentar aire que puede ser utilizado en procesos industriales. El techo está compuesto principalmente por dos partes:

- Una superficie traslúcida (policarbonato alveolar transparente)
- Placa absorbente de radiación color negro (panel aislante Instapanel).

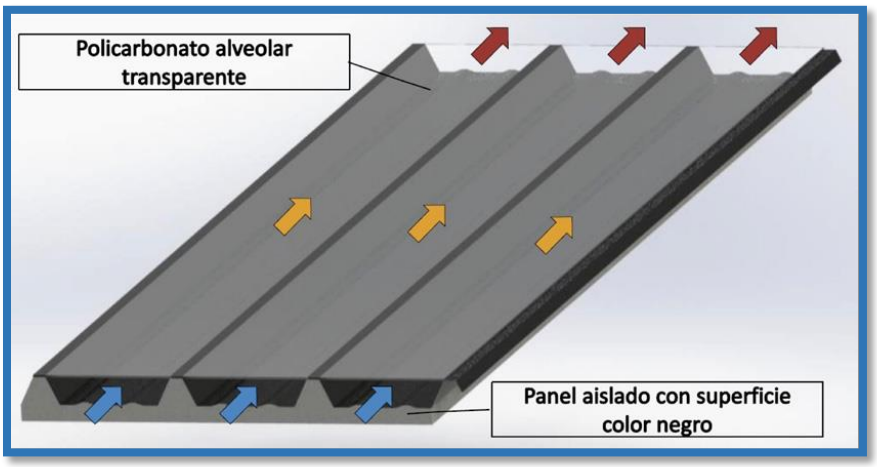

Ilustración 30: Diseño de techo solar activo.
Fuente: Innovación en el deshidratado solar, Jaime Espinoza S., 2016 [1]

1) Instapanel:

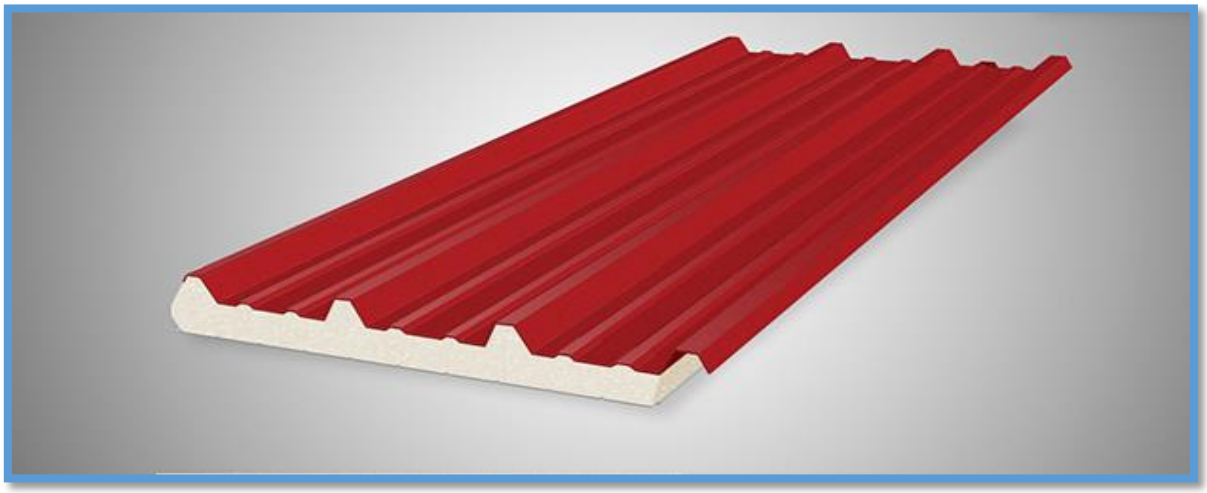

Ilustración 31: Panel aislado de poliuretano Purpanel-4 (http://polchile.cl/producto/purpanel-4)

2) Policarbonato alveolar transparente

Ilustración 32: Policarbonato alveolar transparente (http://dvp.cl/producto/publicidad/policarbonato-alveolar-publicidad-2/policarbonato-alveolar-2100x11600x8mm-transparente-2/)

3) Secador de tambor rotatorio (Rotary Drum)

Ilustración 33: Esquema de instalación de ventilador, ductos, ciclón y secador rotatorio.

9.5 Diagrama de flujo del Proceso productivo

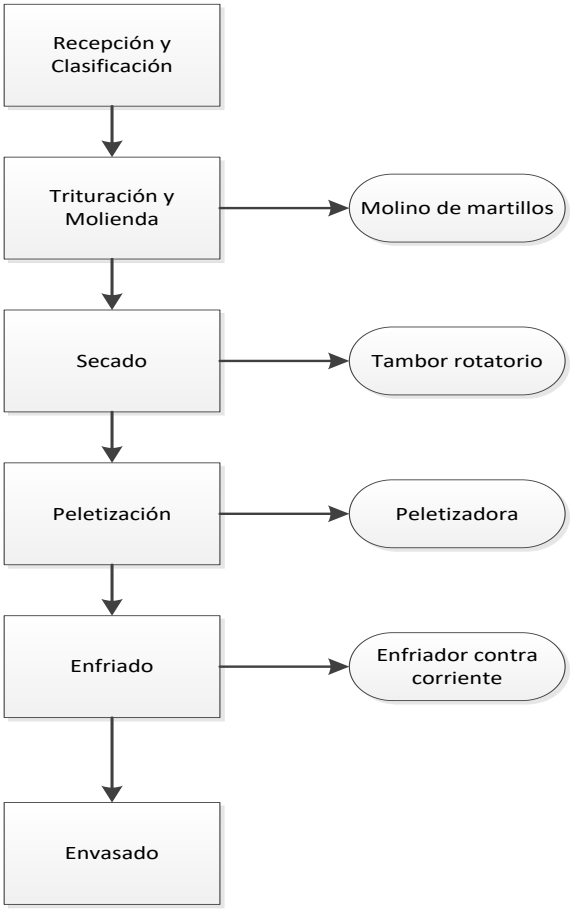

Tabla 11: Diagrama de flujo del proceso.

10 Evaluación económica

Se realizará la evaluación económica para una planta procesadora de residuos agrícolas obteniendo pellets como producto principal, utilizando la tecnología de techo solar activo.

Se procesará una cantidad de 5.000 [kg/d] de residuos agrícolas, los cuales principalmente son productos vegetales que contienen una humedad de 85% en promedio. Los cuales se tratarán primero al reducir el contenido de agua de estos a un 15% y posteriormente tratarlos a través del proceso de peletización para obtener pellets combustibles para poder ser comercializados o utilizados en la misma empresa Femacal.

Se evaluará una jornada de 2 turnos al día de 8 horas, 5 días a la semana, durante 12 meses.

La evaluación económica se realizará en UF. Los valores de monedas fueron revisados el 27 de diciembre 2016. Estos valores se muestran a continuación.

Moneda	Valor [CLP]
1 euro	$700
1 UF	$26.327
1 USD	$673

Materia Prima

Se tiene una cantidad de 5.000 [kg/d] de residuos agrícolas de tipo vegetal, es decir 25 [ton/semana], los cuales a través de los procesos de recolección y molienda, se pondrán a disposición para ser secados en tambores rotatorios y luego, ser usados en el proceso de peletización.

10.1 Ingresos

En la evaluación económica se tendrán dos tipos de ingresos:

1) Por concepto de venta de pellets: se evaluará con respecto al precio actual de pellets de madera.

Cantidad a secar por tanda [kg]	**5.000**
tandas semanales (2 tambores)	5
Cantidad a secar por semana [kg]	20.000
Producto seco [kg/tanda]	882
Producto seco [kg/semana]	4.410
Venta [CLP/kg]	$250
Venta total máx. [CLP/semana]	$1.102.500
TOTAL Ingreso Pellets [CLP/Año]	**$52.920.000**

2) Ingreso debido al arriendo de galpón a construir: estructura que se arrendará a cada trabajador de la feria Femacal. Este ingreso está sujeto a la cantidad de superficie [m^2] de galpón a construir. Se arrendará a un valor de 2,4 [UF/m^2] al año.

3) Ahorro por recolección: Se considera el ahorro en la disminución de residuos orgánicos de la empresa. Disminuyendo los costos por recolección de residuos que la feria Femacal paga anualmente a la empresa Santa Teresita. Este costo está estimado en 380 [UF/año].

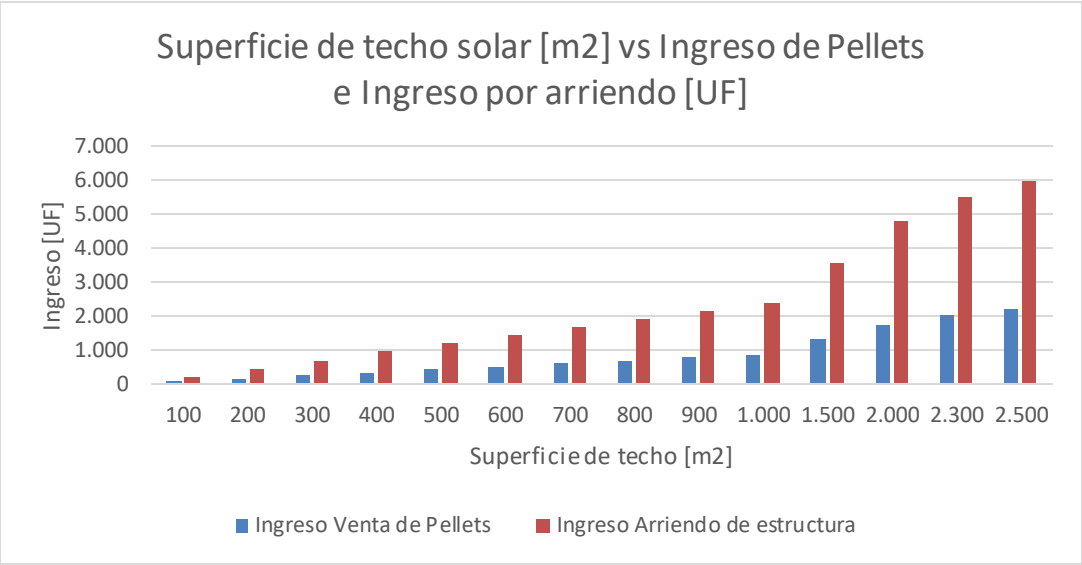

Gráfico 4: Relación entre el Ingreso por venta de pellets e Ingreso por concepto de arriendo.

Como se puede apreciar en el Gráfico 4, el Ingreso por Arriendo es más significativo en el proyecto, representando el 63,5% de los ingresos totales del proyecto versus el 36,5% que representan los ingresos por venta de pellets.

10.2 Terreno e Infraestructura

El galpón a construir y la planta de peletizado se ubicarán dentro de la feria Femacal, localizada en la comuna La Calera, y que cuenta con una superficie total aproximada de 6.000 [m^2].

Para la infraestructura del galpón y el techo solar activo, se realizaron las cotizaciones correspondientes y se calculó el costo unitario por [m^2] de las inversiones.

Infraestructura	Empresa	Precio [CLP/m2]
Galpón c/ M.O		$157.962
Instapanel (panel aislado)	polchile	$14.050
Policarbonato alveolar transparente	sodimac - dvp	$5.276
Tornillo autorroscante (30 unid)	dvp	$737
Mano de Obra (Instapanel)	dvp	$5.000
Pintura Galpón	garbar	$4.000
Ducto de entrada (60-80 m/s)	isover	$2.127
Ducto de salida (2-3 m/s)	isover	NA

Tabla 12: Costo de Infraestructura por [m2]. (Galpón y techo solar activo).

10.3 Costo de los equipos

Dadas las características de los equipos que se necesitan para el funcionamiento de la planta, se realizaron las cotizaciones correspondientes las cuales arrojaron los resultados que se muestran en la Tabla 13.

Equipos	Precio [CLP]	Empresa	Cantidad	Total
Ventilador (18,5 kW)	$7.758.080	Sodeca	1	$7.758.080
Quemador (E solar no disponible)	$3.400.000	Riello (18 kW)	1	$3.400.000
Secador rotatorio	$9.422.000	KMEC Company	2	$18.844.000
Trituradora (molino de martillos)	$6.500.000	Maquinaria para biomasa	1	$6.500.000
Peletizadora (80-100 kg/h)	$7.702.420	Plantas de Pellets	1	$7.702.420
Enfriador a contra-corriente	$1.500.000	Pellet production online	1	$1.500.000
Ciclón	$1.346.000	Plantas de Pellets	1	$1.346.000
Envasadora vertical	$4.200.000	Equipos de Envasado S.L.	1	$4.200.000
Grúa Horquilla (2,5 ton)	$16.660.000	Maximal	1	$16.660.000
Total equipos				$67.910.500

Tabla 13: Costo de los equipos más relevantes del proyecto.

Evaluación superficie de 2300 [m^2]

Galpón 2300 m2	Cantidad [año]	Valor [CLP/año]	Valor [UF/año]
Ingresos Venta de Pellets	211.680 [Kg pellet/año]	$52.920.000	2.010
Ingresos Arriendo Galpón	2,4 [UF/m2*año]	$145.325.040	5.520
TOTAL Ahorro Recolección	380 [UF/año]	$10.000.000	380
TOTAL Ingresos		$198.245.040	7.530

Infraestructura Galpón	Precio [$/m2]	Empresa	Sub Total (2300 m2)
Galpón c/ M.O	$157.962		$363.312.600
Instapanel (panel aislado)	$14.050	polchile	$32.315.000
Policarbonato alveolar transparente	$5.276	sodimac - dvp	$12.134.800
Tornillo autorroscante (30 unid)	$737	dvp	$1.695.560
Mano de Obra (Instapanel)	$5.000	dvp	$11.500.000
Pintura Galpón	$4.000		$9.200.000
Ducto de entrada (60-80 m/s)	$2.127	isover	$4.665.766
Ducto de salida (2-3 m/s)	NA	isover	$834.638
Total Infraestructura			$435.658.364

10.4 Costo de las inversiones (CAPEX)

Se detallan los costos de los activos más importantes, tales como el terreno e Infraestructura, Obras civiles y Equipos. Se aprecian los costos en CLP y en valor UF.

Detalle de inversión			
Activo	Descripción	Valor CLP	Valor UF
Terreno	Feria Femacal 2300 [m^2]		
Infraestructura	Materiales y construcción de galpón	$435.658.364	16.548
Obras civiles	Instalación red sanitaria y otros	$13.070.000	496
Equipos	Principales equipos para realizar secado y peletizado	$67.910.500	2.580
Total		$516.638.864	19.624

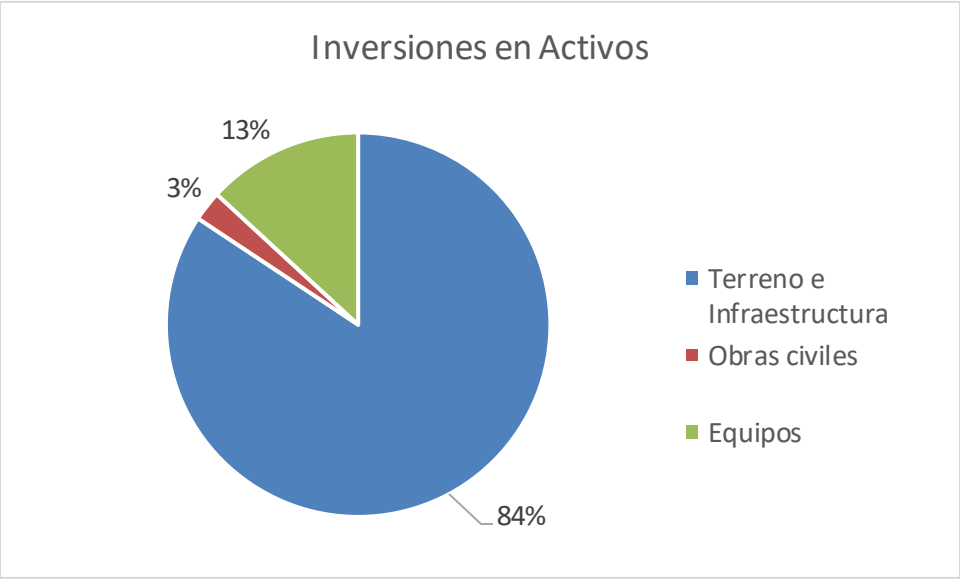

Gráfico 5: Inversiones en activos en porcentaje.

.

En el Gráfico 5 se puede apreciar que la principal inversión en activo será la Infraestructura, es decir aspectos relacionados a la construcción del galpón, la mano de obra. Además de los elementos para la instalación del techo solar activo, tales como el Instapanel, Policarbonato alveolar transparente, mano de obra y los ductos de aire.

10.5 Costos de operación (OPEX)

Los costos de operación de la empresa son los costos asociados a la mantención de equipos, los sueldos del personal que trabaja en la planta, los servicios externos, como el servicio de alimentación, etc. Además se incluyen los gastos asociados al consumo energético, como el costo de la electricidad, agua y gas en la planta, incorporando el consumo de combustible por los vehículos que transportan los productos.

Costos de Operación			
Categoría	Costo anual		Costo [UF/año]
Materias Primas e Insumos	$	-	0,00
Sueldos del Personal	$	50.000.000	1.899,19
Energía	$	14.095.485	535,40
Otros*	$	2.340.000	88,88
Total	$	66.435.485	2.523,47

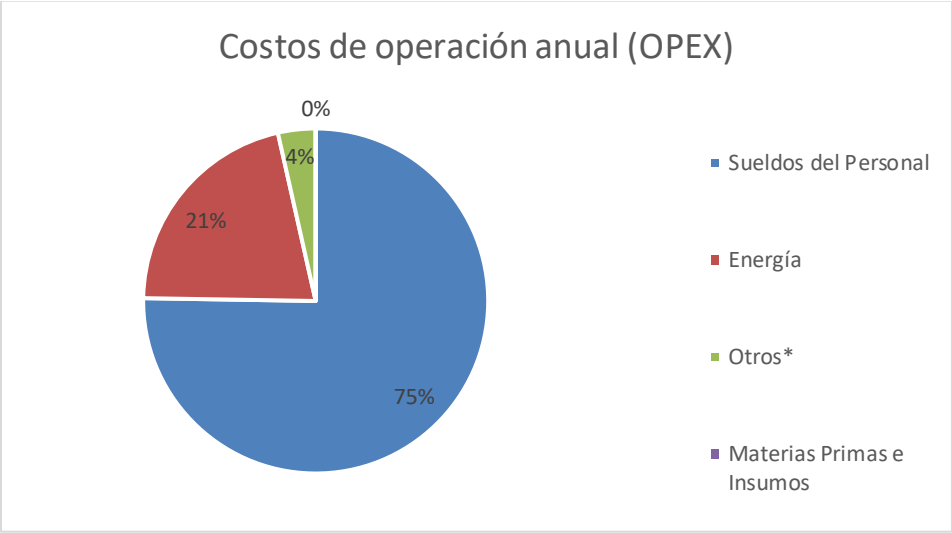

Gráfico 6: Costos de operación al año en porcentaje.

En el Gráfico 6 de Costos de operación de la empresa es posible apreciar que la mayor parte de los costos está en los sueldos del personal y la energía, debido principalmente al consumo eléctrico de los equipos. Además se aprecia que la materia prima no tendrá costo, ya que se recolectará desde la misma feria y en Otros se aprecia los costos de diferentes servicios, tales como servicios de recolección y traslado de material.

Costos de Electricidad

Se evaluarán los costos de electricidad, basado en el consumo eléctrico de los equipos. Se utiliza el precio medio de mercado en el SIC en el mes de diciembre de 2016, con un valor igual a 62,822 [$/kWh].

Equipos	**Cantidad**	**Potencia [kW]**	**Consumo [kWh]**
Ventilador	1	18,5	148
Quemador	1	18,0	144
Molino de martillos	1	11,0	88
Secador rotatorio	2	5,5	44
Maquina Peletizadora	1	16,0	128
Enfriador	1	2,2	17,6
Grúa Horquilla	1	3,8	30
Total Equipos [kWh]			**600**
Consumo de Energía eléctrica instalaciones [kWh]			89,94
Total Consumo diario Energía Eléctrica [kWh]			689,54
Gasto diario [CLP/d]			$ 43.318
Gasto mensual [CLP/mes]			$ 1.299.548
Gasto anual ELECTRICIDAD [CLP/año]			$ 12.995.485
Costo Fijo [CLP]			$ 200.000
Costo de Empalme [CLP]			$ 900.000
TOTAL [CLP/año]			**$ 14.095.485**

Tabla 14: Costos de electricidad.

Mantención de Equipos

Para evaluar los costos de mantención se considerará la mantención correctiva y preventiva. Para efectos prácticos, se calculó como el 5% del valor de la inversión en equipo. Desde el tercer año, el gasto irá creciendo en un 5% anual.

Equipos [CLP]	$	67.910.500
Mantención [CLP/año]	$	3.395.525

Gasto anual en mantención	Gasto Mantención [CLP]	Gasto Mantención [UF]	TOTAL OPEX [UF/año]
Año 1	$3.395.525	138,24	2661,72
Año 2	$3.395.525	138,24	2661,72
Año 3	$3.565.301	145,16	2668,63
Año 4	$3.743.566	152,41	2675,89
Año 5	$3.930.745	160,03	2683,51
Año 6	$4.127.282	168,04	2691,51
Año 7	$4.333.646	176,44	2699,91
Año 8	$4.550.328	185,26	2708,73
Año 9	$4.777.845	194,52	2718,00
Año 10	$5.016.737	204,25	2727,72

Tabla 15: Costo de mantención de equipos durante los primeros 10 años.

Depreciación de Activos

A continuación se detallan los montos anuales de depreciación de cada equipo como también su vida útil y su valor residual al décimo año. Para esto se utilizó el método de depreciación acelerada lo que ayuda como barrera tributaria de mejor manera durante los primeros años. Tales datos de las vidas útiles tributarias de los equipos fueron obtenidos de la página del Servicio de Impuestos Internos (SII).

Ítem	Valor Inversión ($)	Depreciación (años)	Depreciación anual ($)
Grúa Horquilla (2,5 ton)	$16.660.000	2	$8.330.000
Ventilador (18,5 kW)	$7.758.080	5	$1.551.616
Quemador (18 kW)	$3.400.000	5	$680.000
Secador rotatorio	$9.422.000	5	$1.884.400
Trituradora (molino de martillos)	$6.500.000	5	$1.300.000
Peletizadora (80-100 kg/h)	$7.702.420	5	$1.540.484
Enfriador a contra-corriente	$1.500.000	5	$300.000
Ciclón	$1.346.000	5	$269.200
Envasadora vertical	$4.200.000	5	$840.000
Infraestructura	$435.658.364	13	$33.512.182

Tabla 16: Depreciación anual por equipo.

Depreciación		
Año	Valor CLP	Valor UF
1	$ 50.207.882	1907,09
2	$ 50.207.882	1907,09
3	$ 41.877.882	1590,68
4	$ 41.877.882	1590,68
5	$ 41.877.882	1590,68
6	$ 33.512.182	1272,92
7	$ 33.512.182	1272,92
8	$ 33.512.182	1272,92
9	$ 33.512.182	1272,92
10	$ 33.512.182	1272,92

Tabla 17: Depreciación total por año.

Tasa de descuento

La tasa de descuento utilizada será de un 15% la cual es relativamente alta, debido a que se trata de un producto que depende de muchas variables, como condiciones climáticas, que puede disminuir la radiación solar que llega al techo solar activo, lo que afectaría al flujo de aire de secado, entre otras variables.

Además se evaluará con un horizonte de 10 años y se analizarán los indicadores de Valor actual neto (VAN) y la Tasa interna de retorno (TIR). Los cuales ayudarán a determinar si el proyecto es rentable en ese período de tiempo.

10.7 Flujo de caja

A continuación se muestra el flujo de caja del caso base, en donde se tiene un galpón de 2.300 [m^2]. Se trataría una cantidad de 5.000 residuos vegetales al día, quedando 882 [kg] de residuos secos. Por lo que se tiene una producción final de 211.680 [Kg de pellets/año]. Se tienen ingresos por concepto de venta de pellets y arriendo de galpón a locatarios.

Planta Peletizadora (2300)	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
Ingresos totales		7.530,10	7.530,10	7.530,10	7.530,10	7.530,10	7.530,10	7.530,10	7.530,10	7.530,10	7.530,10
Ahorro Sta Teresita		380,00	380,00	380,00	380,00	380,00	380,00	380,00	380,00	380,00	380,00
Costos Operacionales		-2.661,72	-2.661,72	-2.668,63	-2.675,89	-2.683,51	-2.691,51	-2.699,91	-2.708,73	-2.718,00	-2.727,72
Margen Operacional		5.248,39	5.248,39	5.241,47	5.234,22	5.226,60	5.218,59	5.210,19	5.201,37	5.192,11	5.182,38
Depreciación		-1.907,09	-1.907,09	-1.590,68	-1.590,68	-1.590,68	-1.272,92	-1.272,92	-1.272,92	-1.272,92	-1.272,92
Utilidad Antes de Impuestos		3.341,30	3.341,30	3.650,79	3.643,53	3.635,91	3.945,67	3.937,27	3.928,45	3.919,19	3.909,46
Impuesto (20%)		-668,26	-668,26	-730,16	-728,71	-727,18	-789,13	-787,45	-785,69	-783,84	-781,89
Utilidad Después de Impuestos		2.673,04	2.673,04	2.920,63	2.914,83	2.908,73	3.156,54	3.149,82	3.142,76	3.135,35	3.127,57
Depreciación		1.907,09	1.907,09	1.590,68	1.590,68	1.590,68	1.272,92	1.272,92	1.272,92	1.272,92	1.272,92
Infraestructura	-16.547,97										
Activos Depreciables	-3.075,95										
Activos No Depreciables	0,00										
Capital de Trabajo	0,00										
Recuperación Capital de Trabajo											0,00
Valor Residual											0,00
Flujo de Caja	-19.623,92	4.580,13	4.580,13	4.511,32	4.505,51	4.499,41	4.429,46	4.422,74	4.415,68	4.408,27	4.400,49

Tabla 18: Flujo de caja de caso base.

Indicadores económicos de planta de peletizado

Indicador	Valor
VAN (15%) en UF	2.963,32
VAN (15%) en CLP	$ 78.015.402
VAN (15%) en USD	$ 115.921,85
IVAN	0,15
TIR	18,89%

Tabla 19: Indicadores económicos del caso base, superficie de 2300 [m2].

Los indicadores muestran que el proyecto es rentable desde el punto de vista de que se tienen ganancias ya en el año 10. La tasa interna de retorno es mayor que la tasa de descuento, lo que demuestra ser un buen indicador. El IVAN muestra la proporción del valor actual neto en relación a la inversión inicial y este está cerca del 15% de la inversión.

10.8 Análisis de sensibilidad

Selección de variables

Al hacer cualquier análisis económico proyectado al futuro, siempre hay un elemento de incertidumbre asociado a las alternativas que se estudian y es precisamente esa falta de certeza lo que hace que la toma de decisiones sea bastante difícil.

Con el objeto de indicar las variables que más afectan el resultado económico del proyecto y las variables que tienen poca incidencia en el resultado final. Se desarrollará el siguiente análisis de sensibilidad.

Las Variables estudiadas serán: la variación del precio arriendo del galpón, partiendo del caso base de 0,2 [UF/m2] mensual, y la cantidad de superficie de galpón dispuesta para arriendo, teniendo el caso base de 2300 [m^2]. Ambas variables afectan directamente en los Ingresos por concepto de arriendo, lo que afecta de manera importante a los indicadores económicos.

Variación de precio de Arriendo mensual de Galpón

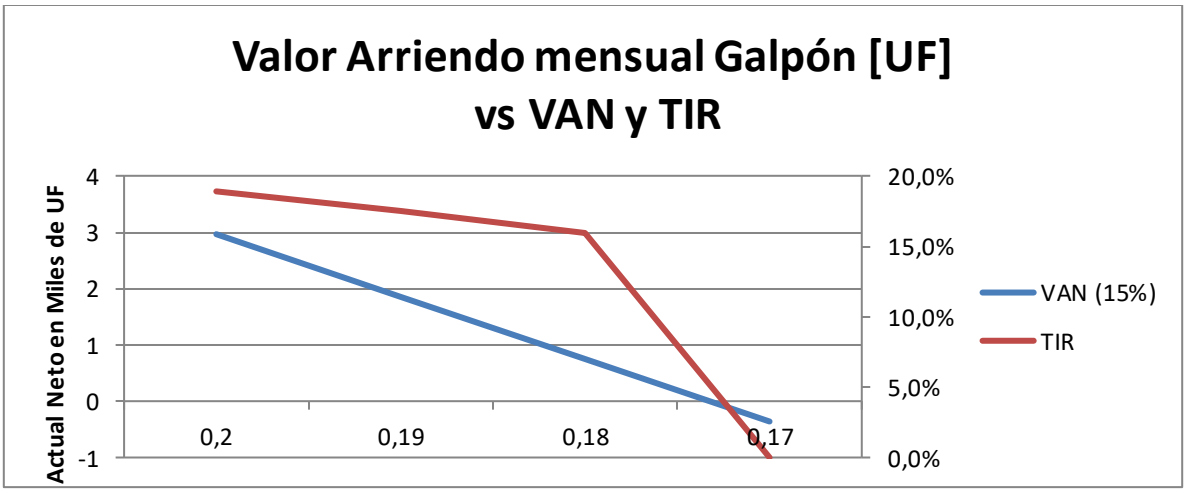

Gráfico 7: Análisis de sensibilidad del valor de arriendo mensual de galpón.

mensual [UF/m^2 mes]	Valor Arriendo Galpón [UF/m2 año]	Ingreso Arriendo [UF]	VAN (15%)	TIR
0,2	2,40	5.520	2.963	18,9%
0,19	2,28	5.244	1.855	17,5%
0,18	2,16	4.968	747	16,0%
0,17	2,04	4.692	-361	-

En el Gráfico 7 de sensibilidad se puede ver que el valor del arriendo mensual del galpón puede afectar la rentabilidad del proyecto. Esto se debe a que uno de los parámetros importantes en el proyecto es el Ingreso debido al arriendo del galpón, que representa cerca del 65% del total de ingresos, es por esto, que se debe tener en cuenta cual es el mínimo precio al que se puede arrendar la estructura a construir. Según el gráfico, el proyecto es rentable cuando el valor de arriendo mensual es mayor a 0,17 [UF/m^2]. Esto está dentro de lo esperado, ya que en el caso base se evalúa el precio de arriendo mensual de 0,2 [UF/m^2].

Cantidad de superficie de galpón dispuesta para Arriendo

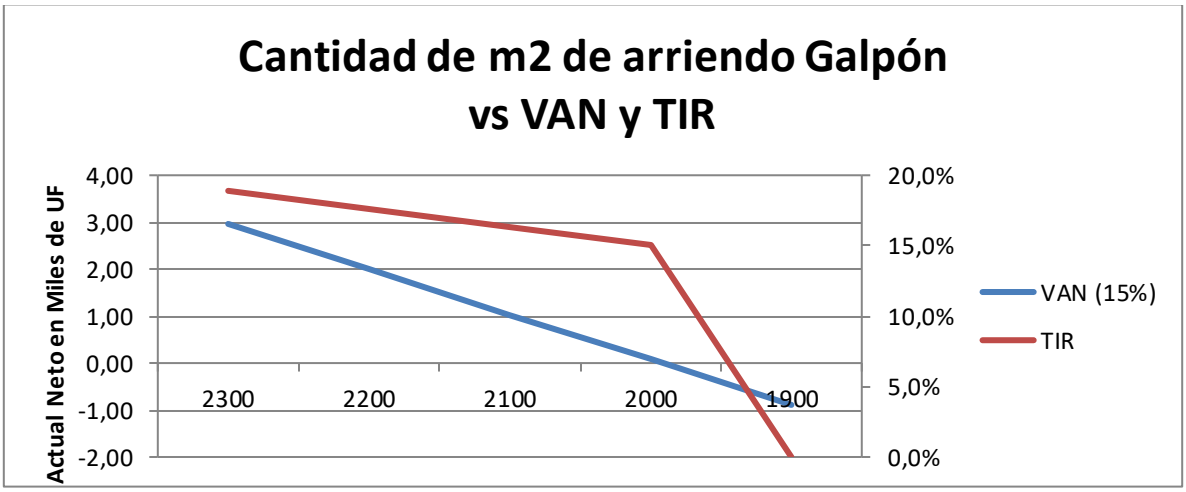

Gráfico 8: Análisis de sensibilidad de cantidad de m2 a arrendar.

Superficie de Arriendo [m^2]	Valor Arriendo Galpón [UF/m2 año]	Ingreso Arriendo [UF]	VAN (15%)	TIR
2.300	2,40	5.520	2.963,32	18,9%
2.200	2,40	5.280	1.999,72	17,7%
2.100	2,40	5.040	1.036,12	16,4%
2.000	2,40	4.800	72,51	15,1%
1.992	2,40	4.781	0,00	-
1.900	2,40	4.560	-891,09	-
1.800	2,40	4.320	-1.854,69	-

En este análisis de sensibilidad se puede concluir que el proyecto es rentable sólo si la estructura a construir presenta al menos una superficie de 2.000 [m^2]. Siendo el VAN=0 cuando la superficie de arriendo es de 1.992 [m^2]. Esto significa, que para que el proyecto de peletización utilizando la tecnología de secado debido a la energía solar sea rentable, es necesario una superficie de al menos 2.000 [m^2]. Lo que en el caso de evaluación de la feria Femacal, es factible debido a la gran terreno que posee actualmente.

Además si se desea tener una planta con una menor superficie, se debe incorporar otras tecnologías, como un quemador industrial de mayor capacidad, que cumpla la función de subir la temperatura del aire de secado y poder disminuir la humedad de este material desde un 85% a un 15% en promedio.

Variación en Precio de Venta de Pellets

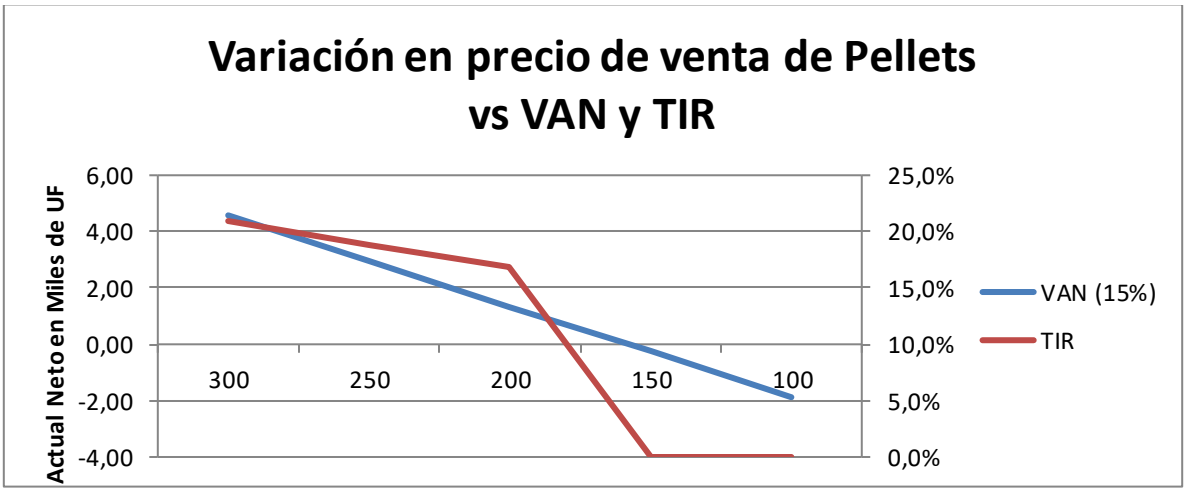

Gráfico 9: Análisis de sensibilidad en precio de venta de Pellets.

Precio venta [CLP/kg]	Ingreso Pellets [UF]	VAN (15%)	TIR
300	2412,1	4.577,44	20,9%
250	2010,1	2.963,32	18,9%
200	1608,1	1.349,20	16,8%
150	1206,1	-264,92	-
100	804,0	-1.879,03	-

En el análisis de sensibilidad del precio de venta de pellets, se puede concluir que el proyecto es rentable si es que el precio de venta es mayor o igual a 200 [$/kg]. Esto representa un riesgo para el proyecto ya que actualmente se tienen precios de venta promedio de $250 en el mercado y existen diferentes tipos de material con el que se pueden obtener pellets de calidad.

Sin embargo, cabe señalar que el ingreso por venta de pellets representa un 36,5% del total de ingresos del proyecto, siendo el ingreso por concepto de arriendo del galpón el factor más relevante.

11 Análisis de otras opciones disponibles

11.1 Caso 2: Evaluación de planta deshidratadora a escala de 200 [m^2]

Otra alternativa a implementar en la feria Femacal, aprovechando la materia prima tales como manzanas, ciruelas, damascos, duraznos, tomates, entre otras frutas y verduras. Es la opción de evaluar una planta de deshidratado a escala, utilizando la tecnología de techo solar activo en una superficie de 200 [m^2]. Lo que implicaría tratar una menor cantidad de material que la planta de peletizado, pero implicaría un menor espacio.

Cantidad de Frutas a deshidratar e Ingresos disponibles

Max cantidad frutas húmedas [kg/d]	**436**
Max fruta deshidratada [kg/d]	80
Cantidad semanal [kg/semana]	400
Cantidad mensual [kg/mes]	1.600
Cantidad año [kg/año]	19.200
Precio promedio [$/kg]	$6.279
INGRESOS [$/año]	$120.549.875
INGRESOS [UF/año]	4.579

Costos de Operación (OPEX)

Costos de Operación		
Categoría	**Costo anual**	**Costo [UF/año]**
Materias Primas e Insumos	$ -	0,00
Sueldos del Personal	$ 50.000.000	1899,19
Energía	$ 9.681.120	367,73
Mantención	$ 6.162.436	234,07
Total	$ 65.843.556	2500,99

Costos de Inversión (CAPEX)

Detalle de inversión			
Activo	**Descripción**	**Valor CLP**	**Valor UF**
Terreno (Feria FEMACAL)	Superficie: 200 [m^2]	$0	0
Infraestructura	Materiales y construcción de galpón	$39.800.929	1.512
Obras civiles	Instalación red sanitaria y otros	$10.070.000	382
Equipos	Principales equipos para proceso deshidratado	$123.248.723	4.681
Total		$173.119.652	6.576

Evaluación económica

Planta de deshidratados		
m2	VAN (15%) [UF]	TIR
100	-522,35	0,0%
200	2417,80	24,4%
300	9897,54	46,7%

Análisis

La opción de usar una planta de deshidratado en la feria Femacal utilizando la energía solar es factible en el caso de que exista un área de techo solar de al menos 200 [m^2]. Implicando secar una cantidad de 436 [kg] de fruta diaria y obteniendo una cantidad de 80 [kg] de fruta al día.

Además, cabe destacar que sería una opción válida al tener un bajo costo de infraestructura y la fruta tendría un valor agregado importante. Lo cual, permite ser una opción complementaria a la planta de peletizado.

12 Conclusiones

En el trabajo se analizan las alternativas de conversión de residuos agrícolas en recursos combustibles y se evalúa la factibilidad técnica-económica de una planta de tratamiento de este tipo de biomasa en la región de Valparaíso, Chile.

Se estudian los métodos de conversión de biomasa para ser implementados en el recinto de la feria La Calera, en donde se descarta el proceso de compostaje, debido principalmente a la alta duración de estos procesos y en segundo lugar, al bajo precio de venta de compost. Por lo que se opta por la tecnología de densificación de biomasa como lo es el peletizado, obteniendo pellets como producto, aumentando el poder calorífico de estos residuos agrícolas y obteniendo un potencial energético considerable.

Se realiza una evaluación de la planta de procesamiento de biomasa, realizando el secado de una cantidad inicial de 5.000 [kg/d] de residuos agrícolas húmedos, obteniendo como resultado cerca de 900 [kg] de material seco dispuestos para el proceso de peletización y utilizando una superficie total de 2.300 [m^2] de Techo Solar Activo.

Se evalúan los diferentes tipos de ingresos que tendrá la planta, compuesto por el concepto de venta de pellets e ingreso por arriendo del galpón, estimados en 7.530 [UF/año] y el ahorro por concepto de recolección estimado en 380 [UF/año]. Los principales costos de la planta de peletizado radican en los costos de Inversión, compuesto principalmente por el costo de la infraestructura (construcción de galpón e instalación de Techo solar activo), costo de obras civiles y equipos, los que suman un costo total de 19.624 [UF]. Por otro lado, los costos de operación de la planta (Opex) se estiman en 2.524 [UF] al año.

A modo de conclusión de la evaluación, se obtienen indicadores económicos positivos en la evaluación de la planta, obteniendo como resultados el VAN = 2.963,32 [UF], equivalente a $ 78.015.402 pesos chilenos, y TIR=18,89%. En el análisis de sensibilidad se muestra que el proyecto solo es rentable si se construye una planta de al menos 2.000 [m^2], esto se debe principalmente a la evaluación de ingreso por concepto de arriendo de la estructura. Además se tiene que el proyecto es factible solo si el precio de venta de pellets es de más de 200 [CLP/kg].

Finalmente se evalúan otras opciones a ser consideradas para incorporar en la feria Femacal como potencial recurso adicional, las que incluyen la posibilidad de la construcción de una planta de fruta deshidratada de 200 [m^2], en donde con una menor superficie de Techo Solar Activo, se pueden aprovechar las frutas presentes en el recinto y darle un valor agregado para su venta. Alternativa que también se evalúa económicamente en un horizonte de 10 años. Se tiene el secado de 436 [kg/día] de frutas, obteniendo 80 [kg/día] de fruta deshidratada. A un precio de venta promedio de 6.280 [CLP], se obtienen unos ingresos de 4.579 [UF/año].

Los principales costos de la planta estarán dados por los costos de Inversión, principalmente por la Infraestructura (Galpón y Techo Solar) y los equipos para el proceso de deshidratado, estimados en 6.576 [UF]. Los costos de operación serán de 2.500 [UF] (mano de obra, energía y mantención de equipos). Finalmente se obtienen indicadores positivos representados en VAN=2417,80 [UF] y TIR=24,4%. Lo que demuestra que el proyecto de procesamiento de frutas y verduras es factible para el caso de la Feria La Calera.

13 Referencias

1. **McKendry, Peter.** *Energy production from biomass (part 2): conversion technologies.* 2002.

2. **Vladimir Strezov, Tim J. Evans.** *Biomass Processing Technologies.* s.l. : CRC Press., 2014.

3. **A, Demirbas.** *Combustion characteristics of different biomass fuels. Progress in energy and combustion science.* 2004.

4. **Bioenergy, IEA.** Base de datos de biomasa, IEA Bioenergy. [En línea] IEA Bioenergy. http://www.ieabcc.nl/database/biomass.php.

5. **Wien, Technische Universität.** Base de datos de biocombustibles. [En línea] http://www.vt.tuwien.ac.at/biobib/.

6. **database, Phyllis.** Base de datos de biomasa. [En línea] https://www.ecn.nl/phyllis2/Home/Help.

7. **McKendry, Peter.** *Energy production from biomass (part 3): gasification technologies* . 2002.

8. **Bhaskarwar, Maneesha Pande and Ashok N.** Chapter 1 Biomass Conversion to Energy.

9. **An overvi Vineet Singh Sikarwar, Ming Zhao, Peter Clough, Joseph Yao, Xia Zhong, Mohammad Zaki Memon, Nilay Shah, Edward J. Anthony and Paul S. Fennell.** An overview of advances in biomass gasification . 2016.

10. **Balat, M.** Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, Mechanisms of Thermochemical Biomass Conversion Processes.

11. **Chapter 4 Organic Recycling of Agricultural Waste TodayN. Mortier, F. Velghe, S. Verstichel.** Chapter 4 Organic Recycling of Agricultural Waste Today: Composting and Anaerobic Digestion.

12. **Benedek, György Füleky and Szilveszter.** Composting to Recycle Biowaste.

13. **Epstein, Eliot.** *Industrial Composting" Environmental Engineering and Facilities Management*. 2011.

14. **Compost Science and Technology – L. F Díaz, M. de Bertoldi, W. Bidlingmaier, E. StL.F. Diaz, G.M. Savage, L.L. Eggerth, and A. Chiumenti.** [aut. libro] M. de Bertoldi, W. Bidlingmaier, E. Stentiford, L. F Díaz. *Compost Science and Technology.*

15. **Leblan.** Leblan. [En línea] http://www.leblan.com/residuo_urbano.php.

16. **F. Monlau, C. Sambusiti, E. Ficara, A. Aboulkas, A. Barakat and H. CARRERE.** *Energy Environ. Sci.* 2015.

17. **Wiebren de Jong, J. Ruud van Ommen.** *Biomass as a Sustainable Energy Source for the Future: Fundamentals of Conversion Processes.* s.l. : Wiley, 2014.

18. **Rafael Luque, Lorenzo Herrero-Davila, Juan M. Campelo, James H. Clark, Jose M. Hidalgo, Diego Luna, Jose M. Marinas, Antonio A. Romero.** *Biofuels: a technological perspective* .

19. **Rolando Chamy, Elba Vivanco.** *Potencial de Biogás. Identificación y clasificación de los distintos tipos de biomasa disponibles en Chile para la generación de biogás* . Santiago : Proyecto Energías Renovables No Convencionales en Chile (CNE/GTZ) , 2007.

20. **CNE/PNUD/UTFSM.** *Registro Solarimétrico: Irradiancia solar en territorios de la República de Chile.* Valparaíso, Chile : s.n., 2008.

21.**Norma Chilena N° 20.365**
http://www.programasolar.cl/images/pdfs/rex%20502%20norma%20tcnica%20actualizada.pdf. [En línea]

22. **R. Corvalán, M. Horn, R. Román, L. Saravia.** *Ingeniería del secado solar Subprograma VI: Nuevas fuentes y conservación de la energía.* Valparaíso, Chile : UTFSM, 1992.

23. **Yunus A. Cengel, Michael A. Boles.** *Termodinámica, séptima edición.* 2012.

24. **Walter J. D, Marinelli Humberto E.** *Desecación de productos agrarios, Antecedentes teóricos y bibliográficos.*

25. **Astudillo Farías, Jose Luis.** *La ingeniería de proyectos industriales de deshidratado solar, capítulo 2.* 2016.

14 Anexos

14.1 Anexo N°1: Ensayo de humedad y poder calorífico a residuos agrícolas

Apoyo académico: Jacqueline Souza, Rodrigo Morales.

Lugar: Laboratorio de Termodinámica, Depto. de Mecánica, UTFSM.

Objetivos

- Obtener 4 muestras de 50 [g] aprox. de residuos agrícolas producidas en la Feria mayorista FEMACAL.
- Realizar una caracterización de los residuos.
- Obtener la cantidad de humedad y el poder calorífico superior e inferior de cada muestra.

Instrumentos utilizados

Instrumento	Balanza analítica
Marca	RADWAG
Modelo	AS 220.R2
Capacidad Máx.	220 [g]
Capacidad min.	10 [mg]

Ilustración 34: Balanza analítica.

Instrumento	Estufa de secado
Marca	VIMARONI
Modelo	JK-DO-9050A
Requisitos eléctricos	50 [Hz], 220 [V]
Exactitud de T°	0,1 [°C]
Resolución pantalla	1,0 [°C]

Ilustración 35: Estufa de secado.

Instrumento	Calorímetro
Marca	Janke & Kunkel

Instrumento	Termómetro
Marca	LUTRON
Modelo	TM-917
Precisión	0,01 [°C]

Instrumento	Cronómetro
Procedencia	Laboratorio Termodinámica

Ilustración 36: Calorímetro, utilizado en ensayo de poder calorífico inferior.

Calorímetro isoperibólico

Instrumento	**Bomb Calorimeter**
Marca	PARR Instrument Company
Modelo	PARR 1261

Ilustración 37: Calorímetro isoperibólico, utilizado en ensayo de poder calorífico superior.

Procedimiento

Porcentaje de humedad

El día lunes 17 de octubre, se llevaron 4 muestras de residuos agrícolas al laboratorio de Termodinámica del departamento de mecánica, las cuales se cortaron en trozos pequeños para posteriormente colocarlos en tres recipientes cada muestra, para así obtener una representación más fiable de los resultados con tres puntos de comparación.

Luego de colocar las muestras en los recipientes, se medía la cantidad de masa de las muestras húmedas en la balanza analítica "Radwag".

Una vez obtenidos los datos de las masas, se procede a dejar las muestras en la estufa de secado a 105ºC por cerca de 12 [h].

El día martes 18 de octubre, se procede a medir la masa de las muestras secas en la balanza. Y se procede a calcular el porcentaje de humedad de las muestras correspondientes en base a la siguiente ecuación (1).

(1) $$humedad\ [\%] = \frac{muestra\ húmeda - muestra\ seca}{muestra\ húmeda} * 100$$

14.2 Resultados Ensayo determinación de humedad

Muestra 1	muestra húmeda [g]	muestra seca [g]	Humedad [%]
1.1	3,6268	0,1936	**94,7**
1.2	4,6190	0,2709	**94,1**
1.3	4,6545	0,2834	**93,9**

Muestra 2	muestra húmeda [g]	muestra seca [g]	Humedad [%]
2.1	8,7960	0,5957	**93,2**
2.2	7,4452	0,4985	**93,3**
2.3	9,1898	0,6284	**93,2**

Muestra 3	muestra húmeda [g]	muestra seca [g]	Humedad [%]
3.1	0,3100	0,2558	**17,5**
3.2	0,2447	0,2016	**17,6**
3.3	0,2234	0,1867	**16,4**

Muestra 4	muestra húmeda [g]	muestra seca [g]	Humedad [%]
4.1	4,1241	0,6750	**83,6**
4.2	5,5161	0,8991	**83,7**
4.3	3,8497	0,6484	**83,2**

Tabla Resumen

Muestra	**Residuo agrícola**	**Humedad promedio [%]**
1	Hojas de lechuga	**94**
2	Tallo de acelga	**93**
3	Cáscara de cebolla	**17**
4	Hojas de brócoli	**83**

Poder calorífico en base seca

El poder calorífico es la propiedad fundamental de los combustibles, la cual permite expresar la cantidad de energía en unidades equivalentes de combustibles, y se define como la cantidad de calor que puede desprenderse por la combustión de la unidad de combustible (1 Kg, 1 m^3, etc.).

El poder calorífico depende de la fase del H_2O en los productos de la combustión. Siendo el poder calorífico superior (PCS), el poder calorífico cuando el H_2O en los productos está en forma líquida. El poder calorífico inferior (PCI) es aquel cuando el H_2O en los productos está en forma de vapor.

Ambos poderes caloríficos se relacionan a través de la fórmula N°2:

(2) $$PCI = PCS - \left(mh_{fg}\right)_{H20} \quad [kJ/Kg]$$

En el laboratorio se determina la cantidad de energía calórica que se libera al quemar completamente las cuatro muestras de residuos agrícolas. Para esto, se realiza primeramente el ensayo de **poder calorífico superior** en el cual se utiliza un calorímetro isoperibólico, el cual entrega un reporte y se calcula el poder calorífico superior a través de la fórmula N°3. Además en el ensayo se realiza un duplicado de cada muestra para obtener mejores resultados.

(3) $$PCS = \frac{K * \Delta T - Q}{masa\ muestra} \quad [cal/g]$$

K: constante que incluye la capacidad calorífica del calorímetro, masa del agua del vaso calorimétrico y calor especifico del agua del vaso calorimétrico [J/°C]
ΔT: aumento de la temperatura del agua del vaso calorimétrico por efecto de la combustión [°C]
Q: Calor generado por el alambre de niquelina quemado y la formación de ácidos [J]

Luego, se le realiza otro ensayo a cada muestra con el objetivo de determinar el **poder calorífico inferior**, el cual se calcula mediante la fórmula N°4. Este valor es importante debido a que uno de los productos de los procesos de la combustión es el H_2O, el cual contiene una parte considerable de la energía producida. Por lo que el poder calorífico representa la energía real de la muestra al restarle esa energía producto del agua evaporada.

Esto se consigue determinando la masa total de agua producida por la combustión de cada muestra mediante la medición de la masa de las trampas de cloruro de calcio que se utilizaron, y que sirven para absorber la humedad. Una vez teniendo el valor del H_2O total, se utiliza la fórmula N°5 para determinar el porcentaje de hidrógeno producido en la combustión.

(4) $$PCI = PCS - (215{,}55 * H_2) \quad [kJ/Kg]$$

(5) $$H_2 = \frac{11{,}19 * (H_2O\ total)}{masa\ muestra} \quad [\%]$$

<u>Poder calorífico en base recibida</u>

Finalmente, una vez obtenidos los resultados del poder calorífico superior e inferior de las muestras de residuos agrícolas secas (en base seca), se procede a calcular el poder calorífico en base recibida, es decir considerando la humedad inicial de cada muestra, a través de la fórmula N°6.

(6) $$PCS\ (base\ recibida) = PCS * \frac{(100 - humedad)}{100}$$

Esquema de ensayo de poder calorífico inferior

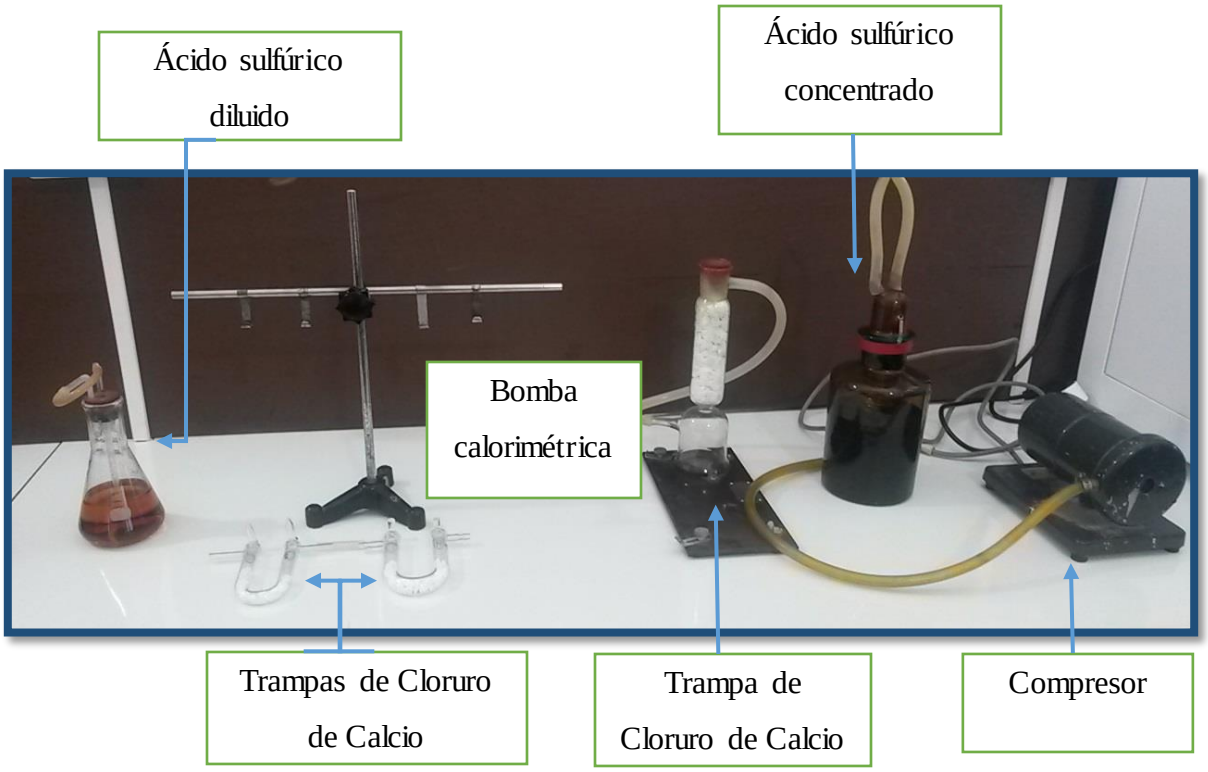

Ilustración 38: Esquema de instalación de ensayo para determinar agua total producida en la combustión y posteriormente el poder calorífico inferior.

Poder Calorífico Superior (Fecha: 27 y 28 oct 2016)

Muestra 1 reporte N°1	
masa muestra [g]	0,4406
K	2415,04
delta T	0,70471
Q ácido	10
Q niquelina	15
Hs [cal/g]	3805,95

Muestra 1 duplicado	
masa muestra [g]	0,6102
K	2415,04
delta T	0,97088
Q ácido	14
Q niquelina	12
Hs [cal/g]	3799,92

Muestra 2 reporte N°1	
masa muestra [g]	0,7538
K	2415,04
delta T	0,90643
Q ácido	0
Q niquelina	11,9
Hs [cal/g]	2888,25

Muestra 2 duplicado	
masa muestra [g]	0,7352
K	2415,04
delta T	0,87867
Q ácido	0
Q niquelina	11,7
Hs [cal/g]	2870,41

Muestra 3 reporte N°1	
masa muestra [g]	0,1629
K	2415,04
delta T	0,25909
Q ácido	0
Q niquelina	12,2
Hs [cal/g]	3766,19

Muestra 3 duplicado	
masa muestra [g]	0,2961
K	2415,04
delta T	0,45629
Q ácido	0
Q niquelina	12,2
Hs [cal/g]	3680,37

Muestra 4 reporte N°1	
masa muestra [g]	0,5009
K	2415,04
delta T	0,89549
Q ácido	5,4
Q niquelina	12
Hs [cal/g]	4282,78

Muestra 4 duplicado	
masa muestra [g]	0,5372
K	2415,04
delta T	0,96655
Q ácido	5,75
Q niquelina	12,7
Hs [cal/g]	4310,88

Poder Calorífico Inferior

Muestra 1: Lechuga	
fecha	26-oct-16
masa muestra [g]	0,9168
trampa N°1 [g]	0,4545
trampa N°2 [g]	0,1343
Agua Total [g]	0,5888
H2 [%]	7,1866
PCS [kJ/Kg]	**15922,90**
PCI [kJ/Kg]	**14373,83**

Muestra 2: Tallo de acelga	
Fecha	27-oct-16
masa muestra [g]	0,9798
trampa N°1 [g]	0,4313
trampa N°2 [g]	0,1091
Agua Total [g]	0,5404
H2 [%]	6,1717
PCS [kJ/Kg]	**12055,75**
PCI [kJ/Kg]	**10725,43**

Muestra 3: Cáscaras de cebolla	
fecha	28-oct-16
masa muestra [g]	0,5150
trampa N°1 [g]	0,4149
trampa N°2 [g]	0,0460
Agua Total [g]	0,4609
H2 [%]	10,0145
PCS [kJ/Kg]	**15589,39**
PCI [kJ/Kg]	**13430,76**

Muestra 4: Hojas de brócoli	
Fecha	02-nov-16
masa muestra [g]	1,2409
trampa N°1 [g]	0,6520
trampa N°2 [g]	0,0969
Agua Total [g]	0,7489
H2 [%]	6,7533
PCS [kJ/Kg]	**17990,83**
PCI [kJ/Kg]	**16535,16**

Tabla resumen de resultados

Tabla Resumen (base seca)

Muestra	**Residuo agrícola**	**Humedad promedio [%]**	**PCS [cal/g]**	**PCS [kJ/Kg]**	**PCI [cal/g]**	**PCI [kJ/Kg]**
1	Hojas de lechuga	94	3802,9	15922,9	3432,9	14373,8
2	Tallo acelga	93	2879,3	12055,7	2561,6	10725,4
3	Cáscaras de cebolla	17	3723,2	15589,3	3207,7	13430,7
4	Hojas de brócoli	83	4296,8	17990,8	3949,1	16535,1