



# **UNIVERSIDAD NACIONAL “PEDRO RUIZ GALLO”**



**Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica**

## **TESIS**

**Para Optar el Título Profesional de**

**INGENIERO MECÁNICO**

**ELECTRICISTA**

**“Evaluación del potencial energético de los residuos agrícolas de cosecha (RAC) de la caña de azúcar para generar energía en la Empresa Agroindustrial Pomalca S.A.A”**

**Presentado Por:**

**Coronel Regalado, Elder Kristian**

**Asesor:**

**Niño Vásquez, Percy Edwar**

**Lambayeque – Perú**

**2020**



# **UNIVERSIDAD NACIONAL “PEDRO RUIZ GALLO”**



**Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica**

## **TESIS**

**Para Optar el Título Profesional de**

**INGENIERO MECÁNICO**

**ELECTRICISTA**

**“Evaluación del potencial energético de los residuos agrícolas de cosecha (RAC) de la caña de azúcar para generar energía en la Empresa Agroindustrial Pomalca S.A.A”**

**Presentado Por:**

**Coronel Regalado, Elder Kristian**

**Aprobado por el Jurado Examinador:**

**PRESIDENTE: Dr. Aníbal Jesús Salazar Mendoza**  
**SECRETARIO: M.Sc.Ing. Jony Villalobos Cabrera**  
**MIEMBRO: Lic. Egberto Serafín Gutiérrez Atoche.**  
**ASESOR: Ing. Percy Edwar Niño Vásquez.**

**Lambayeque – Perú**

**Enero del 2020**



# UNIVERSIDAD NACIONAL “PEDRO RUIZ GALLO”

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica



## TESIS

### TITULO

“Evaluación del potencial energético de los residuos agrícolas de cosecha (RAC) de la caña de azúcar para generar energía en la Empresa Agroindustrial Pomalca S.A.A”

### CONTENIDO

**CAPITULO I:** PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN.

**CAPITULO II:** MARCO TEÓRICO.

**CAPITULO III:** MARCO METODOLÓGICO.

**CAPITULO IV:** DESARROLLO DEL MARCO METODOLOGICO.

**CAPITULO V:** ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS.

**CAPITULO VI:** CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

### AUTOR:

Coronel Regalado, Elder Kristian.

---

**PRESIDENTE**

---

**SECRETARIO**

---

**MIEMBRO**

---

**ASESOR**

**Lambayeque – Perú**

**Enero del 2020**

## **DEDICATORIA**

Este proyecto está dedicado a Dios y a mi familia, A Dios por darme salud y sabiduría, a mis padres Edilberto Coronel y Fany Regalado por todo el apoyo incondicional, por siempre creer en mí, llevarme por el camino del bien y por motivarme a seguir adelante día a día, a mis hermanos Alex Rojas y Kely Coronel por sus consejos, por siempre estar allí para brindarme fortaleza para continuar y lograr todo lo que me propongo. Dándome confianza para superar los retos sin dudar de mi capacidad e inteligencia. Los amo a todos.

## **AGRADECIMIENTO**

A mi prestigiosa Universidad Nacional Pedro Ruíz Gallo, mi alma mater que me acogió durante 5 años de formación profesional y personal el cual nos prepara para un futuro competitivo y lleno de retos.

A mi muy querida facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica que a través de sus docentes me guiaron y ayudaron a formarme en esta maravillosa carrera, gracias por su paciencia y enseñanza.

Deseo expresar mi más sincero agradecimiento al Ing. Percy Niño Vásquez mi asesor de tesis por brindarme de su tiempo para apoyare a realizar este proyecto además de aportar su conocimientos y experiencia para el desarrollo de la misma.

Agradecimiento especial al ingeniero Renee Meléndez por su ayuda y por brindarme de su tiempo para la realización de la tesis.

## **RESUMEN**

En el departamento de Lambayeque existen varias empresas azucareras distribuidas en diferentes lugares como Pomalca, Tumán, Pucalá, etc. Y actualmente ninguna empresa azucarera aprovecha el 100 % de los Residuos Agrícolas de Cosecha (RAC) que en la mayoría son quemado por los productores. La caña de azúcar es uno de los cultivos con mayor capacidad para convertir la energía solar en biomasa. Las empresas Agroindustriales tradicionalmente generan energía eléctrica a través de la fibra de la caña de azúcar y no emplean el RAC como fuente de energía.

La empresa Agroindustrial Pomalca tiene 12 494,89 hectáreas de sembríos de caña de azúcar los cuales generan una gran cantidad de Residuos Agrícolas de Cosecha (RAC). Y en la presente tesis “Evaluación del potencial energético de los residuos agrícolas de cosecha (RAC) de la caña de azúcar para generar energía en la Empresa Agroindustrial Pomalca S.A.A.” lo que se quiere es evaluar qué cantidad ENERGIA ELECTRICA puede ser generada mediante la utilización del RAC a través de la combustión. Esa energía generada puede ser utilizada por la misma empresa como una alternativa renovable diversificando así la matriz energética en el distrito.

**PALABRAS CLAVES:** Caña de azúcar, Biomasa, Combustión, RAC.

## **ABSTRACT**

In the department of Lambayeque there are several sugar companies distributed in different places such as Pomalca, Tumán, Pucalá, etc. And at the moment no sugar company uses 100% of the Harvest Agricultural Residues (RAC) that in the majority are burned by the producers. Sugarcane is one of the crops with the greatest capacity to convert solar energy into biomass. Agroindustrial companies traditionally generate electricity through the fiber of sugarcane and do not use the RAC as a source of energy.

The Pomalca Agroindustrial company has 12 494,89 hectares of sugarcane crops that have a large amount of Agricultural Harvest Residues (RAC). And in the present thesis "Evaluation of the energy potential of agricultural harvest residues (RAC) of sugarcane to generate energy in the Agribusiness Company Pomalca SAA" what is wanted is the evaluation of how much ELECTRICAL ENERGY can be generated by using the RAC through combustion. That generated energy can be used by the same company as a renewable alternative thus diversifying the energy matrix in the district.

**KEY WORDS:** Sugarcane, Biomass, Combustion, RAC.

## INDICE

|  |           |
|--|-----------|
| <b>INDICE DE TABLAS.....</b>   | <b>1</b>  |
| <b>INDICE DE FIGURAS.....</b>  | <b>2</b>  |
| <b>CAPITULO I: PROBLEMA DE LA INVESTIGACION .....</b>                          | <b>3</b>  |
| <b>1.1. Realidad problemática.....</b>   | <b>3</b>  |
| 1.1.1. A nivel internacional.....  | 4         |
| 1.1.2. A nivel nacional. ....  | 4         |
| 1.1.3. A nivel local. ....   | 5         |
| <b>1.2. Formulación del problema .....</b>                                     | <b>6</b>  |
| <b>1.3. Delimitaciones de la investigación .....</b>                           | <b>6</b>  |
| 1.3.1. Delimitación espacial. ....   | 7         |
| 1.3.2. Delimitación temporal. ....   | 8         |
| <b>1.4. Justificación e importancia de la investigación .....</b>              | <b>9</b>  |
| 1.4.1. Justificación ambiental.....  | 9         |
| 1.4.2. Justificación social. ....  | 9         |
| 1.4.3. Justificación científica. ....  | 9         |
| <b>1.5. Limitaciones de la investigación .....</b>                             | <b>9</b>  |
| 1.5.1. Limitaciones de la tesis. ....  | 9         |
| <b>1.6. Objetivos de la investigación.....</b>                                 | <b>10</b> |
| 1.6.1. Objetivos generales. ....   | 10        |
| 1.6.2. Objetivos específicos. ....   | 10        |
| <b>CAPITULO II: MARCO TEORICO.....</b>   | <b>11</b> |
| <b>2.1 Antecedentes de estudio.....</b>  | <b>11</b> |
| 2.1.1 Antecedentes Internacionales. ....                                       | 11        |
| 2.1.2 Antecedentes Nacionales. ....  | 12        |
| <b>2.2 Desarrollo de la temática correspondiente al tema investigado .....</b> | <b>13</b> |
| 2.2.1 Energías renovables.....   | 13        |
| 2.2.2 Biomasa.....   | 15        |

|   |   |           |
|---|---|-----------|
| 2.2.3   | Proceso de conversión de biomasa a energía.....                                 | 16        |
| 2.2.3.1                                       | Procesos termoquímicos.....   | 17        |
| 2.2.3.2                                       | Procesos bioquímicos.....   | 19        |
| 2.2.4   | Caña de azúcar.....   | 22        |
| 2.2.4.1                                       | Subproductos de la caña de azúcar.....  | 23        |
| 2.2.4.2                                       | Acceso a la energía.....  | 24        |
| 2.2.5   | Caña de azúcar en el Perú.....  | 31        |
| 2.2.5.1                                       | Producción y consumo de azúcar de caña.....                                     | 33        |
| 2.2.6   | Caña de azúcar como cultivo energético.....                                     | 34        |
| 2.2.7   | Residuos agrícolas de cosecha (RAC) de la caña de azúcar.....                   | 36        |
| 2.2.7.1                                       | Recolección y obtención de los residuos agrícolas de cosecha (RAC).....         | 37        |
| 2.2.7.2                                       | Transporte del RAC.....   | 38        |
| 2.2.7.3                                       | Energía a partir del RAC.....   | 38        |
| 2.2.7.4                                       | Características del RAC.....  | 39        |
| 2.2.7.5                                       | Caracterización de la biomasa como combustible.....                             | 40        |
| 2.2.8   | Características energéticas y ambientales del uso de la biomasa cañera.....     | 41        |
| 2.2.9   | Proporción de los compuestos de los residuos de la caña en el cañaveral.....    | 41        |
| 2.2.9.1                                       | Características de los RAC: Datos físicos.....                                  | 42        |
| 2.2.9.2                                       | Características deseables del material para ser utilizado como combustible..... | 43        |
| <b>CAPITULO III: MARCO METODOLOGICO .....</b> |   | <b>44</b> |
| 3.1   | Tipo y Diseño de investigación.....   | 44        |
| 3.2   | Población y muestra.....  | 44        |
| 3.2.1   | Población.....  | 44        |
| 3.2.2   | Muestra.....  | 44        |
| 3.3   | Hipótesis.....  | 45        |
| 3.4   | Variables – Operacionalización.....   | 45        |
| 3.5   | Métodos y técnicas de investigación.....  | 46        |
| 3.5.1   | Fuentes primarias.....  | 46        |

|   |  |           |
|---|--|-----------|
| 3.5.2   | Fuentes secundarias.....   | 46        |
| 3.6   | Análisis estadístico e interpretación de datos.....  | 46        |
| 3.6.1   | Determinación del potencial energético de la biomasa residual.....                                       | 46        |
| 3.6.2   | Evaluación del poder calorífico inferior.....  | 47        |
| 3.6.3   | Generación total del RAC.....  | 48        |
| <b>CAPITULO IV: DESARROLLO DEL MARCO METODOLOGICO .....</b> |  | <b>50</b> |
| 4.1   | Evaluación del potencial energético de los residuos agrícolas de cosecha (RAC) de la caña de azúcar..... | 50        |
| 4.1.1   | Calculo del peso de la biomasa.....  | 50        |
| 4.1.2   | Determinación del PCI.....   | 52        |
| 4.1.3   | Calculo de energía biomasa.....  | 52        |
| 4.1.4   | Ubicación de la reserva del RAC.....   | 53        |
| <b>CAPITULO V: ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO.....</b>        |  | <b>54</b> |
| 5.1   | Potencial energético de la biomasa RAC de la caña de azúcar.....   | 54        |
| 5.2   | Potencia instalada.....  | 57        |
| 5.3   | Evaluación económica del Proyecto.....   | 57        |
| 5.3.1   | Inversión.....   | 57        |
| 5.3.2   | Valor Actual Neto (VAN).....   | 57        |
| 5.3.3   | Tasa Interna de Retorno (TIR).....   | 58        |
| 5.3.4   | Período de Recuperación (PR).....  | 58        |
| 5.3.5   | Costo nivelado por energía (LCOE).....   | 59        |
| 5.4   | Huella de carbono.....   | 62        |
| <b>CAPITULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>     |  | <b>64</b> |
| <b>BIBLIOGRAFIA.....</b>                                    |  | <b>66</b> |
| <b>ANEXOS.....</b>  |  | <b>68</b> |

## INDICE DE TABLAS

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Tabla 1 Principales Productores de Caña de Azúcar .....</b>  | <b>23</b> |
| <b>Tabla 2 Energía a partir de Bagazo .....</b>   | <b>25</b> |
| <b>Tabla 3 Perú Producción de Caña de Azúcar .....</b>  | <b>32</b> |
| <b>Tabla 4 Composición de la Caña de Azúcar en la Plantación .....</b>  | <b>35</b> |
| <b>Tabla 5 Composición Química de la Paja en Estado Natural.....</b>  | <b>35</b> |
| <b>Tabla 6 Características del RAC .....</b>  | <b>40</b> |
| <b>Tabla 7 Compuestos de los Residuos de la Caña .....</b>  | <b>41</b> |
| <b>Tabla 8 Características del RAC .....</b>  | <b>42</b> |
| <b>Tabla 9 Operacionalización de las Variables .....</b>  | <b>45</b> |
| <b>Tabla 10 Poder Calorífico Inferior para Biomasa residual en Colombia.....</b>  | <b>48</b> |
| <b>Tabla 11 Producción potencial del RAC.....</b>   | <b>49</b> |
| <b>Tabla 12 Cantidad de Caña Procesada al año .....</b>   | <b>50</b> |
| <b>Tabla 13 Cantidad de Hectáreas Cosechadas al año .....</b>   | <b>50</b> |
| <b>Tabla 14 Indicador (Relación entre Toneladas Caña Procesadas y hectáreas cosechadas) 51</b>                                      |           |
| <b>Tabla 15 Hectáreas Cosechadas al Día .....</b>   | <b>51</b> |
| <b>Tabla 16 Cantidad de RAC al Día.....</b>   | <b>51</b> |
| <b>Tabla 17 Poder calorífico del RAC.....</b>   | <b>52</b> |
| <b>Tabla 18 Energía Calorífica de la Biomasa(RAC).....</b>  | <b>52</b> |
| <b>Tabla 19 Reporte de Energía de la Empresa Agroindustrial Pomalca.....</b>  | <b>54</b> |
| <b>Tabla 20 Indicadores Energéticos de la Empresa Agroindustrial Pomalca.....</b>   | <b>55</b> |
| <b>Tabla 21 Cantidad de Energía Eléctrica y vapor al día (Producido por bagazo).....</b>  | <b>56</b> |
| <b>Tabla 22 Relación (Energía Eléctrica/Vapor) y (Energía Calorífica/Vapor).....</b>  | <b>56</b> |
| <b>Tabla 23 Datos para Evaluar la Rentabilidad.....</b>   | <b>60</b> |
| <b>Tabla 24 Flujo de Caja .....</b>   | <b>60</b> |
| <b>Tabla 25 Emisiones de kg CO<sub>2</sub> eq /kWh Generados por cada uno de los Tipos de Generación Eléctrica en el Perú .....</b> | <b>63</b> |

## INDICE DE FIGURAS

|                  |  |           |
|------------------|--|-----------|
| <b>FIGURA 1</b>  | <b>Ubicación del proyecto.....</b>   | <b>8</b>  |
| <b>FIGURA 2</b>  | <b>Diagrama de flujo del proceso de producción de azúcar estándar en el ingenio caso de estudio.....</b> | <b>11</b> |
| <b>FIGURA 3</b>  | <b>Energía proveniente de la biomasa.....</b>  | <b>16</b> |
| <b>FIGURA 4</b>  | <b>Procesos termoquímicos de conversión de biomasa en energía.....</b>                                   | <b>17</b> |
| <b>FIGURA 5</b>  | <b>Morfología botánica de la caña de azúcar.....</b>   | <b>22</b> |
| <b>FIGURA 6</b>  | <b>Generación de energía.....</b>  | <b>25</b> |
| <b>FIGURA 7</b>  | <b>Caldera.....</b>  | <b>27</b> |
| <b>FIGURA 8</b>  | <b>Caldera Pirotubular.....</b>  | <b>28</b> |
| <b>FIGURA 9</b>  | <b>Calderos Pirotubulares.....</b>   | <b>28</b> |
| <b>FIGURA 10</b> | <b>Caldera Acuotubulares.....</b>  | <b>29</b> |
| <b>FIGURA 11</b> | <b>Típico proceso de generación de energía en un ingenio.....</b>  | <b>29</b> |
| <b>FIGURA 12</b> | <b>Turbina a vapor.....</b>  | <b>30</b> |
| <b>FIGURA 13</b> | <b>Perú, comportamiento de la demanda interna aparente de azúcar de caña ..</b>                          | <b>33</b> |

## CAPITULO I: PROBLEMA DE LA INVESTIGACION

### 1.1. Realidad problemática

La caña de azúcar es uno de los cultivos con mayor capacidad para convertir la energía solar en biomasa. Si se toman en cuenta solo el bagazo y la paja, en los cañaverales se almacenan alrededor del equivalente a una tonelada de petróleo por cada tonelada de azúcar que puede producirse. La agro industria cubana de la caña de azúcar es la fuente más importante de biomasa con que cuenta Cuba para el desarrollo de energía renovable, y es actualmente la única a partir de la cual se está generando electricidad. Durante los últimos veinte años se han desarrollado tecnologías que hacen posible dar saltos importantes en la eficiencia, basados en combustibles renovables como el bagazo y la paja de caña. (Reyes , 2003)

El crecimiento de la mecanización de la cosecha de caña en verde, tiene como una consecuencia la disponibilidad de una considerable cantidad de residuos en el campo (RAC), estos residuos pueden ser aprovechados para transformarse en biocombustibles rentables y sostenibles que pueden utilizarse en los ingenios para generación de energía eléctrica (Muñoz, 2017)

Hoy existen instalaciones capaces de elevar la eficiencia 10 a 15 % más; al mismo tiempo se desarrollan otras tecnologías más avanzadas aún, como las turbinas de gas integradas con gasificadores de biomasa, que podrían entonces elevar los valores en 20 ó 30 veces. Esos avances tecnológicos hacen competitiva la generación de electricidad a partir de biomasa, si se compara con la obtenida a partir de combustibles fósiles. La combustión de la biomasa tiene además una ventaja ambiental, ya que no incrementa la concentración atmosférica de carbono, porque solo devuelve a la atmósfera el carbono que fijó la planta durante su crecimiento. (Reyes , 2003)

### **1.1.1. A nivel internacional.**

Según el estudio del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de Argentina (MAGyP, s.f) concluyó que, a nivel internacional, numerosos países (Brasil, Cuba, Australia, entre otros) ya vienen empleando el RAC como fuente de energía alternativa. En el país de Argentina el caso de mayor difusión del uso energético del RAC es el del Ingenio Ledesma y de algunos ingenios de la provincia de Tucumán.

En Cuba, la biomasa obtenida como subproducto de la industria azucarera, constituye el mayor recurso desde todos los puntos de vista, ya que, en una tonelada de caña fresca, aproximadamente, el 32 % es de bagazo integral y el 28 % de paja y cogollo de caña (Residuo Agrícola Cañero, RAC), los cuales son la biomasa más importante que se procesa y puede ser utilizada con fines energéticos, como alimento animal o para producir otros productos derivados de la caña de azúcar. (León, Dopico, Triana, & Medina, 2013)

### **1.1.2. A nivel nacional.**

Assureira y Assureira (2013) mencionan que “En el Perú, los residuos agrícolas y forestales son recursos que actualmente no son explotados comercialmente y pese a que presentan un gran potencial no se contabilizan como fuente de energía primaria comercial en el Balance Nacional de Energía. Las acciones a nivel público y privado orientados a promover el desarrollo de la bioenergía requieren mejorar la capacidad del país en el conocimiento de aspectos relacionados con la oferta, composición y las tecnologías de aprovechamiento que actualmente existe sobre la biomasa con fines energéticos”

Actualmente las empresas azucareras del Perú no utilizan el 100% de los residuos agrícolas de cosecha (RAC) y en su mayoría de los casos son quemados por los productores y

generan una serie de efectos negativos e inconvenientes como el aumento de plagas y la contaminación, lo cual se quiere evitar.

Según el informe de la Bolsa de valores de Lima S.A.A. (BVL, 2016) menciona que el caso de Agroindustria Paramonga es uno de los ingenios del Perú que genera energía eléctrica, disponiendo del bagazo de caña del proceso de molienda y de hojas, cogollo y broza, los cuales constituyen una biomasa que se aprovecha para la producción de energía térmica y electricidad a través de la cogeneración de energía en la Central Paramonga, en cantidades que cubren las necesidades energéticas de las instalaciones. En el año 2016 obtuvieron una producción de energía térmica (vapor) igual a 1 988 030 GJ y en electricidad igual a 309 622 GJ.

### **1.1.3. A nivel local.**

Según el informe de la Bolsa de valores de Lima S.A.A. (BVL, 2014) alude que, en la Industria Azucarera del Perú, el Ingenio Azucarero Pomalca actualmente tiene una capacidad máxima estimada es de 3 400 toneladas de caña por día. Actualmente el ingenio azucarero Pomalca genera su propia energía, uno de sus proyectos más ambiciosos fue puesta en marcha por el turbo generador Brown Boverly 4 con los objetivos de no sólo disminuir el costo en facturación de energía por parte de ENSA, sino abastecer con nuestra propia energía la producción fabril, agrícola y abastecer de energía a las diferentes áreas administrativas.

Actualmente las empresas azucareras del departamento de Lambayeque utilizan el bagazo para la generación de energía eléctrica y no utilizan los residuos de cosecha (RAC) que al igual que en otras fábricas azucareras son quemados por los mismos productores generando

así contaminación, lo cual se quiere evitar, desperdician así una gran cantidad de biomasa que puede convertirse en energía y mejorar así la eficiencia energética de la fábrica azucarera.

## **1.2. Formulación del problema**

Gastañaduy & Lozano (2003) en el informe expresan que “La Empresa Agroindustrial Pomalca tiene 12 494.89 hectáreas de sembríos de caña de azúcar” (pág. 129) en la cual se genera una gran cantidad de residuos Agrícolas de cosecha (RAC) que no son utilizados y aprovechados al máximo. Esos residuos después son quemados y contaminan el medio ambiente esto debido a que no existe un programa adecuado para su correcto uso. La empresa Agroindustrial tradicionalmente genera energía eléctrica a través de la fibra de la caña de azúcar y no emplean el RAC como fuente de energía. Es por eso que hay que preguntarse:

¿Podemos utilizar el RAC como fuente energía, cuanta energía eléctrica podemos generar y como eso ayudara a mejorar la eficiencia energética en la empresa Agroindustrial Pomalca?

## **1.3. Delimitaciones de la investigación**

La energía es muy importante en la industria, es por eso que siempre estamos en busca de nuevas fuentes, adema de tecnología para su generación, para tener siempre una mejor eficiencia energética.

Gastañaduy & Lozano (2003) en el informe mencionan que “El ingenio azucarero Pomalca cuenta con una batería de 7 molinos de 3 mazas accionadas con un motor de corriente continua de velocidad variable. La zona de calderos, cuenta con 8 unidades con una capacidad total de 233,6 t/h. La planta de fuerza tiene 5 turbo-generadores con una capacidad total de 14 790 kW. Funciona con el bagazo y genera su propia energía” (p.128). Pero actualmente solo funcionan solo dos turbogeneradores

Según el estudio realizado por la Bolsa de valores de Lima S.A.A. (BVL, 2014) señala que “Hoy en día, el ingenio Pomalca ahorra casi los 270 mil soles mensuales de costo de energía que períodos anteriores nos facturaba ENSA y ahora no sólo abastecemos a la fábrica, sino también a las oficinas administrativas y campo, mismas palabras que fueron dichas por la gerencia general”

### **1.3.1. Delimitación espacial.**

La Empresa Agroindustrial Pomalca están ubicados en el valle de Chancay, extendiéndose en los distritos de Picsi, Chongoyape, Chiclayo, Zaña, Lambayeque y Pomalca; su sede central se encuentra en Pomalca, a 7 Km. de la capital de la Región Lambayeque. Tiene como actividad económica es producir azúcar a partir del cultivo de caña de azúcar y cuenta con 12 494.89 hectáreas de sembríos de caña de azúcar, así como sus derivados (melaza, chancaca y bagazo), al cultivo de remolacha azucarera en fase de experimentación, y a la agro exportación en menor escala con cultivos de pimientos dulces y picantes como páprika, guajillo, jalapeños habaneros y eventualmente alcachofas, basados en normas ambientales y responsabilidad social; estando a la vanguardia en la aplicación de tecnologías de última generación

### **Datos generales**

1. Denominación: Empresa Agroindustrial Pomalca SAA
2. Dirección: Av. Túpac Amaru N° 216 Pomalca
3. RUC: 20163898200
4. Página Web: [www.pomalca.com.pe](http://www.pomalca.com.pe)
5. Antigüedad: Más de 50 años de existencia

6. Industria: Sector Agroindustrial Azucarera
7. Actividad: Producción y Comercialización de Azúcar
8. Cliente: Mercado Mayorista y Minorista
9. Proveedores: Proveedores relacionados en su mayoría en El Rubro Agrícola
10. Valor Nominal Acciones: S/. 1.00 (un nuevo sol)

### Coordenadas

Latitud: 6°44'47.34" S

Longitud: 79°43'6.65 O



*FIGURA 1* Ubicación del proyecto  
Fuente: Google Earth

### **1.3.2. Delimitación temporal.**

La presente investigación se desarrollará entre los meses de mayo a diciembre del 2019.

## **1.4. Justificación e importancia de la investigación**

### **1.4.1. Justificación ambiental.**

La gran cantidad de residuos que se genera después de la cosecha es un problema ya que además por su quema contamina el medio ambiente por la emisión de gases como CO, NO<sub>x</sub>, N<sub>2</sub>O además dificulta el sembrío mecánico y trae plagas consigo. Es así que esta biomasa podría ser aprovechada para la generación de energía como una alternativa renovable de producción de energía, diversificando así la matriz energética de la empresa Agroindustrial y así disminuir los problemas antes mencionados.

### **1.4.2. Justificación social.**

La realización de este proyecto es muy importante para la empresa Agroindustrial Pomalca ya que podemos utilizar esta biomasa (RAC) para la generación de energía eléctrica y así poder abastecer la demanda de la misma, al final de concluir este proyecto será una gran propuesta de desarrollo y mejora en base a la eficiencia energética de la empresa.

### **1.4.3. Justificación científica.**

Promover el uso de las energías no convencionales en este caso la biomasa.

## **1.5. Limitaciones de la investigación**

Las principales limitaciones para el desarrollo de este proyecto son:

### **1.5.1. Limitaciones de la tesis.**

Se ha considerado datos brindados por el jefe de mantenimiento de la Empresa Agroindustrial Pomalca, datos como índices energéticos, cantidades de caña procesadas, consumo de energía eléctrica entre otros datos, la cual nos ayudara al desarrollo de la tesis.

## **1.6. Objetivos de la investigación**

### **1.6.1. Objetivos generales.**

- El objetivo general de esta investigación es evaluar y desarrollar un proceso que utilice los residuos agrícolas de cosecha que mediante la combustión genere energía eléctrica.

### **1.6.2. Objetivos específicos.**

- Determinar la cantidad de residuos agrícolas de cosecha (RAC) que se puede obtener en la Empresa Agroindustrial Pomalca.
- Calcular el potencial energético de los residuos de cosecha (RAC).
- Evaluar la cantidad de energía eléctrica que se puede generar por combustión de los residuos agrícolas de cosecha (RAC) y cuanto será utilizada por la empresa.
- Estimar el valor actual neto (VAN), la tasa interna de retorno (TIR) y el periodo de recuperación del capital del proyecto.

## CAPITULO II: MARCO TEORICO

### 2.1 Antecedentes de estudio

#### 2.1.1 Antecedentes Internacionales.

Según el estudio del (MAGyP, s.f) detalla que el “INGENIO LEDESMA” Empresa Argentina dedicada a producir azúcar. En 2012 reemplazó 15 millones de metros cúbicos de gas natural, lo que representa un 10% del gas que es consumido anualmente por la empresa, que apunta además a seguir creciendo en esta sustitución por biomasa. Por otra parte, gracias al aprovechamiento de la fibra, hidroelectricidad de usinas hidroeléctricas y este proyecto de biomasa, hoy el 40% de la energía que usa Ledesma es renovable.

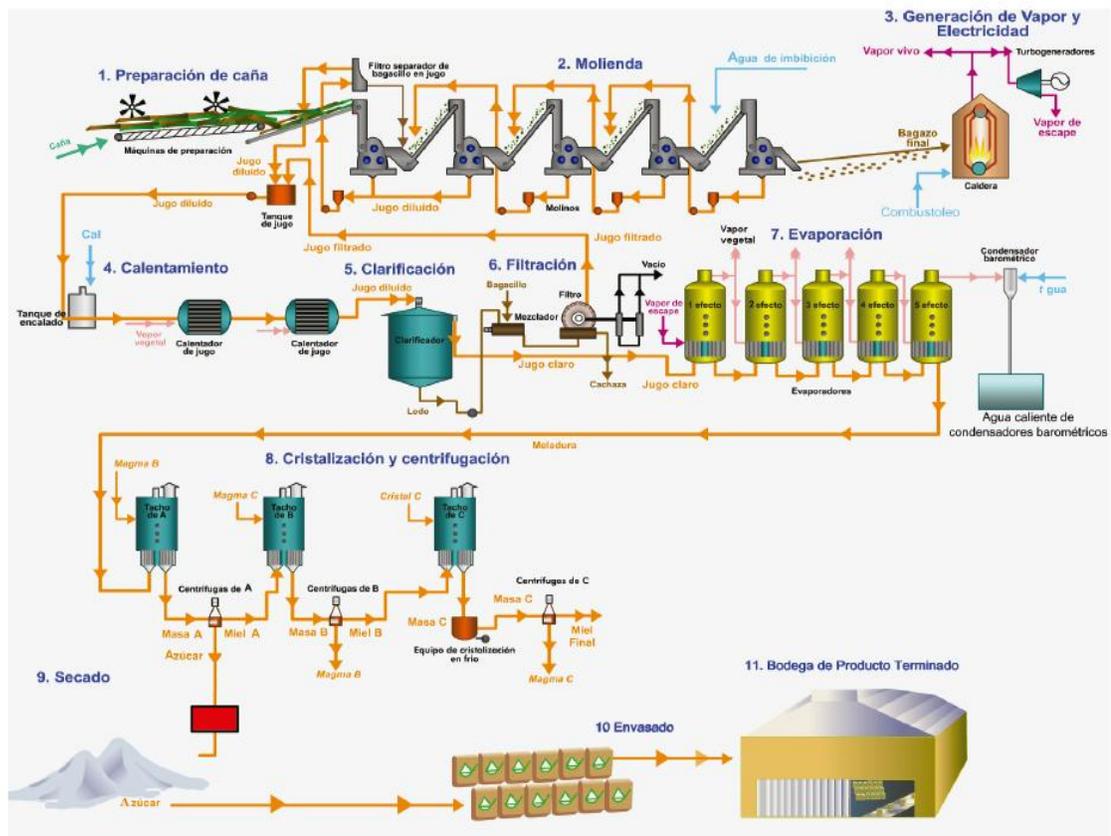


FIGURA 2 Diagrama de flujo del proceso de producción de azúcar estándar en el ingenio caso de estudio  
Fuente: (Dominguez, Bravo, & Sosa, 2014)

### **2.1.2 Antecedentes Nacionales.**

-El estudio de caso corresponde al Ingenio Agroindustrial Paramonga- AIPSAA, donde la baja cantidad de bagazo disponible, así como la inexistencia de experiencias en el uso de residuos de cosecha de caña propia del lugar (variedad, clima, estacionalidad, etc.), afectan tanto a la eficiencia energética como al cumplimiento del contrato subasta RER (Recursos Energéticos Renovables). Como antecedentes se tiene la utilización de residuos de cosecha de caña de azúcar experimentados en la industria azucarera de Colombia y Brasil. El procedimiento inicia con la cuantificación de los residuos de cosecha, su preparación, caracterización energética y su combustión en mezcla con bagazo en una caldera bagacera de 42 kg/cm<sup>2</sup> y 410°C. (Castillo & Solis , 2017)

El análisis consiste en: cuantificar la relación vapor/ bagazo según el escenario actual, la relación vapor/mezcla (bagazo y residuos de cosecha) a diferentes niveles de humedad manteniendo una proporción constante en base seca de la mezcla y, determinar la cantidad de vapor y electricidad a generar con la adición de los residuos de cosecha. La utilización de residuos de cosecha mecanizada en verde de caña de azúcar es una alternativa altamente conveniente que incrementa la disponibilidad de tales residuos, así AIPSAA planea en el 2017 alcanzar el 51% de campos cosechados. (Castillo & Solis , 2017)

Experimentalmente se obtuvo un radio de disponibilidad de 16,17 toneladas de residuos de cosecha en base seca por tonelada de caña cosechada, que luego de ser tratadas alcanzan una disponibilidad neta para combustión de 53 420 toneladas anuales con humedad de 19%. Como resultados del análisis energético con pruebas de adición de residuos de cosecha al bagazo en proporción volumétrica 1:4 y combustión en caldera AIPSAA, se

demuestra la mejora del rendimiento, aumentando la relación toneladas de vapor/toneladas de mezcla en 3,1% para una humedad de la mezcla de 48,1%. La humedad de los residuos fue 41,4% y la del bagazo 49,9%. Esta aplicación permitirá anualmente un incremento en la generación de energía eléctrica de 40 920 MWh, con ello alcanzar el cumplimiento al 100% de la cuota RER y reducir la compra de energía eléctrica en 24 628 MWh al proveedor. (Castillo & Solis , 2017)

-El estudio se dio en la empresa Agroindustrial Paramonga S.A.A donde se logró obtener como resultado positivo la capacidad energética del follaje de la caña de azúcar de las muestras analizadas en el periodo abril – julio de 2015. Se concluyó que la biomasa aérea seca tiene la capacidad de ser aprovechada como energía primaria, la cual se convierte a energía eléctrica, para la empresa AIPSAA. Constituye una opción viable y favorable para la azucarera AIPSAA, ello para fines de autoconsumo y suministro a terceros, sea vía el SEIN o atención a mercados cautivos. Queda claro que la posibilidad de usar el follaje de la caña representa la solución que le permitiría garantizar el suministro del volumen de biomasa/combustible para operar nuevas instalaciones de calderas. (Landauro, 2016)

## **2.2 Desarrollo de la temática correspondiente al tema investigado**

### **2.2.1 Energías renovables.**

Según la información dada por Organismo Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (OSINERGMIN, s.f) se denomina Energía Renovable a la energía que se obtiene de fuentes naturales virtualmente inagotables, ya sea por la inmensa cantidad de energía que contienen o por ser capaces de regenerarse por medios naturales.

Según (OSINERGMIN, s.f) en consideración su grado de desarrollo tecnológico y a su nivel de penetración en la matriz energética de los países, las Energías Renovables se clasifican en Energías Renovables Convencionales y Energías Renovables No Convencionales. Dentro de las primeras se considera a las grandes centrales hidroeléctricas; mientras que dentro de las segundas se ubica a las generadoras eólicas, solares fotovoltaicos, solares térmicas, geotérmicas, mareomotrices, de biomasa y las pequeñas hidroeléctricas.

Según (OSINERGMIN, s.f) Respecto al ámbito nacional debe destacarse que el Perú ha sido tradicionalmente un país cuya generación eléctrica se ha sustentado en fuentes renovables. Esto significa que nuestro desarrollo energético contribuye desde tiempo atrás a la reducción del efecto invernadero que hoy agobia al planeta, con un desarrollo que se sustenta mayoritariamente en fuentes limpias de energía. Hasta el año 2002, la electricidad generada con centrales hidroeléctricas representó el 85% del total de energía generada en el país. Con la llegada del Gas de Camisea la participación de las hidroeléctricas disminuyó hasta llegar al 61% en el año 2008.

Según (OSINERGMIN, s.f) En la actualidad, cuando la disponibilidad de recursos fósiles juega un rol determinante en el suministro energético global y nacional, y cuando los factores medio ambientales aparecen entre las preocupaciones principales de la sociedad contemporánea, las Energías Renovables resurgen con éxito creciente en todas las latitudes del planeta, alentadas por los apremios del suministro energético y la presencia de marcos normativos favorables.

### **2.2.2 Biomasa.**

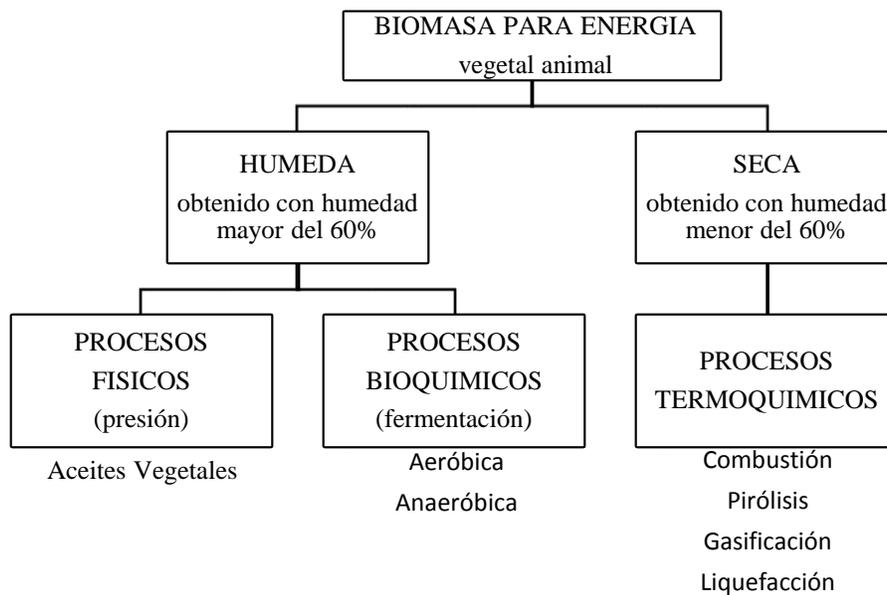
La biomasa es aquella materia orgánica de origen vegetal o animal, susceptible de ser aprovechada como fuente de energía. Según la información dada por la Asociación de Empresas de Energías Renovables (APPA, 2009) por su definición de amplio rango, la biomasa abarca un amplio conjunto de materias orgánicas que se caracterizan por su heterogeneidad, tanto por su origen como por su naturaleza. En el contexto energético, la biomasa puede considerarse como la materia orgánica originada de un proceso biológico, ya sea espontáneo o provocado, utilizable como fuente de energía

De acuerdo con (OSINERGMIN, s.f) La formación de biomasa a partir de la energía solar se lleva a cabo por el proceso denominado fotosíntesis vegetal que a su vez es desencadenante de la cadena biológica. Mediante la fotosíntesis las plantas que contienen clorofila, transforman el dióxido de carbono y el agua de productos minerales sin valor energético, en materiales orgánicos con alto contenido energético y a su vez sirven de alimento a otros seres vivos. Mediante estos procesos, la biomasa almacena a corto plazo la energía solar en forma de carbono. La energía almacenada en el proceso fotosintético puede ser posteriormente transformada en energía térmica, eléctrica o carburantes de origen vegetal, liberando de nuevo el dióxido de carbono almacenado.

De acuerdo con (OSINERGMIN, s.f) En el sector agroindustrial, específicamente la industria de la caña de azúcar, se ha establecido la presencia de un gran potencial de generación de electricidad a partir del bagazo de la caña y la cascarilla de arroz.

### 2.2.3 Proceso de conversión de biomasa a energía.

Energiza (como se citó en Landauro, 2016, pág. 16) menciona que paso previo para que la biomasa pueda ser utilizada para fines energéticos, tiene que ser convertida en una forma más conveniente para su utilización. Esta puede ser convertida en diversas formas tales como: carbón vegetal, briquetas, gas, etanol y electricidad.



*FIGURA 3* Energía proveniente de la biomasa  
Fuente: (Energías Renovables-Energía Biomasa, 2008)

#### Biomasa seca

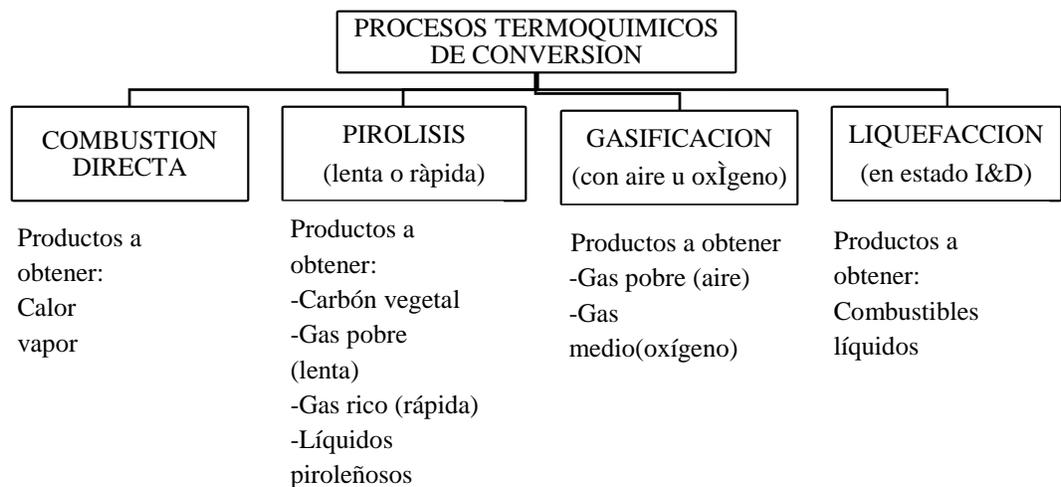
Aquella que puede obtenerse en forma natural con un tenor de humedad menor al 60%, como la leña, paja, etc. Este tipo se presta mejor a ser utilizada energéticamente mediante procesos TERMOQUÍMICOS O FISÍCOQUÍMICOS, que producen directamente energía térmica o productos secundarios en la forma de combustibles sólidos, líquidos o gaseosos. (Energías Renovables-Energía Biomasa, 2008)

## Biomasa húmeda

Se denomina así cuando el porcentaje de humedad supera el 60%, como por ejemplo en los restantes vegetales, residuos animales, vegetación acuática, etc. Resulta especialmente adecuada para su tratamiento mediante PROCESOS QUÍMICOS, o en algunos casos particulares, mediante simples PROCESOS FÍSICOS, obteniéndose combustibles líquidos y gaseosos. Hay que aclarar que esta clasificación es totalmente arbitraria, pero ayuda a visualizar mejor la siguiente caracterización de los procesos de conversión. (Energías Renovables-Energía Biomasa, 2008)

### **2.2.3.1 Procesos termoquímicos.**

Centro de Energías Renovables (como lo citó Landauro, 2016). “Se usa el calor para transformar la biomasa, preferentemente en base seca, quiere decir que los materiales que se usan son los que presentan menor humedad, sean de tipo leñoso o herbácea. Se obtienen productos con alto valor energético, como vapor y gases combustibles”. Entre los principales procesos termoquímicos se tiene:



**FIGURA 4** Procesos termoquímicos de conversión de biomasa en energía  
Fuente: (Energías Renovables-Energía Biomasa, 2008)

- **Combustión directa**

Es el más sencillo y más ampliamente utilizado, tanto en el pasado como en el presente. Permite obtener energía térmica, ya sea para usos domésticos (cocción, calefacción) o industriales (calor de proceso, vapor mediante una caldera, energía mecánica utilizando el vapor de una máquina). Las tecnologías utilizadas para la combustión directa de la biomasa abarcan un amplio espectro que va desde el sencillo fogón a fuego abierto (aún utilizado en vastas zonas para la cocción de alimentos) hasta calderas de alto rendimiento utilizadas en la industria. (Energías Renovables-Energía Biomasa, 2008)

- **Gasificación**

Consiste en la quema de biomasa (fundamentalmente residuos forestoindustriales) en presencia de oxígeno, en forma controlada, de manera de producir un gas combustible denominado “gas pobre” por su bajo contenido calórico en relación, por ejemplo, al gas natural (del orden de la cuarta parte). La gasificación se realiza en un recipiente cerrado, conocido por gasógeno, en el cual se introduce el combustible y una cantidad de aire menor a la que se requeriría para su combustión completa. El gas pobre obtenido puede quemarse luego en un quemador para obtener energía térmica, en una caldera para producir vapor, o bien ser enfriado y acondicionado para su uso en un motor de combustión interna que produzca, a su vez, energía mecánica. (Energías Renovables-Energía Biomasa, 2008)

- **Pirólisis**

Proceso similar a la gasificación (a la cual en realidad incluye) por el cual se realiza una oxigenación parcial y controlada de la biomasa, para obtener como producto una combinación variable de combustibles sólidos (carbón vegetal), líquidos (efluentes piroleñosos) y gaseosos (gas pobre). Generalmente, el producto principal de la pirólisis es el carbón vegetal, considerándose a los líquidos y gases como subproductos del proceso. La pirólisis con aprovechamiento pleno de subproductos tuvo su gran auge antes de la difusión masiva del petróleo, ya que constituía la única fuente de ciertas sustancias (ácido acético, metanol, etc.) que luego se produjeron por la vía petroquímica. Hoy en día, sólo la producción de carbón vegetal reviste importancia cuantitativa. (Energías Renovables-Energía Biomasa, 2008)

- **Co-combustión**

Endesa (como se citó en Landauro, 2016) expresa que la utilización de la biomasa como combustible en combinación a un combustible fósil, usualmente carbón mineral. La ventaja de este proceso es que reduce las emisiones de CO<sub>2</sub> por unidad de energía producida y las cantidades de carbón y/o combustible usado, según sea el caso.

### **2.2.3.2 Procesos bioquímicos.**

Los procesos bioquímicos se basan en la degradación de la biomasa por la acción de microorganismos, y pueden dividirse en dos grandes grupos: los que se producen en ausencia de aire (anaeróbicos) y los que se producen en presencia de aire (aeróbicos). (Energías Renovables-Energía Biomasa, 2008)

- **Procesos anaeróbicos**

La fermentación anaeróbica, para la que se utiliza generalmente residuos animales o vegetales de baja relación carbono / nitrógeno, se realiza en un recipiente cerrado llamado “digestor” y da origen a la producción de un gas combustible denominado biogás. Adicionalmente, la biomasa degradada que queda como residuo del proceso de producción del biogás, constituye un excelente fertilizante para cultivos agrícolas. (Energías Renovables-Energía Biomasa, 2008)

- **Procesos aeróbicos**

La fermentación aeróbica de biomasa de alto contenido de azúcares o almidones, da origen a la formación de alcohol (etanol), que, además de los usos ampliamente conocidos en medicina y licorería, es un combustible líquido de características similares a los que se obtienen por medio de la refinación del petróleo. Las materias primas más comunes utilizadas para la producción de alcohol son la caña de azúcar, mandioca, sorgo dulce y maíz. El proceso incluye una etapa de trituración y molienda para obtener una pasta homogénea, una etapa de fermentación y una etapa de destilación y rectificación. (Energías Renovables-Energía Biomasa, 2008)

Renovetec (como se citó en Landauro, 2016), a las características de los procesos termoquímicos y bioquímicos descritos, la biomasa se puede transformar en diferentes formas de energía, estas son:

Calor y vapor: Se genera calor y vapor mediante la combustión de biomasa o biogás, este calor generado puede utilizarse para generar vapor y crear energía o usarlo directamente.

Combustible gaseoso: Genera biogás lo que se usará en la industria agrícola o ganadera, para generar energía y calor. Es uno de los que más energía produce por las heces de animales.

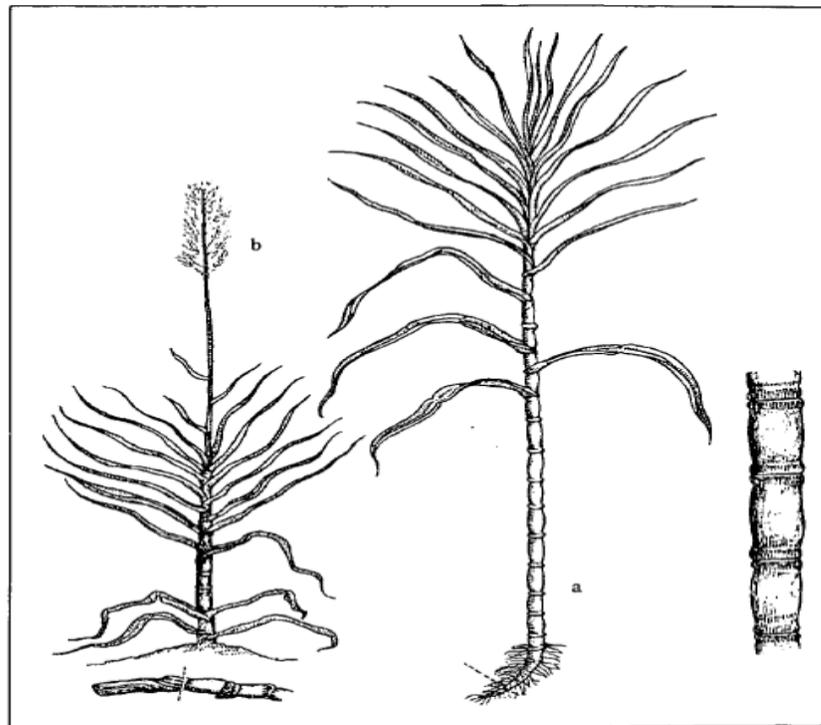
Biocombustibles: Es la alternativa a los combustibles tradicionales, aquí encontramos al bioetanol, el cual se obtiene por medio de cultivos de cereales, remolacha, legumbres y maíz; y se tiene al biodiesel, el cual reemplaza al diésel tradicional y mejora la producción de energía.

Electricidad: Se obtiene a partir de la combustión y gasificación de los recursos biomásicos, este no contribuye al efecto invernadero ya que no libera CO<sub>2</sub> e incrementa la industria bioenergética.

Co-generación (calor y electricidad): Se refiere a la producción de vapor y electricidad en simultáneo, lo cual puede aplicarse a diversos procesos industriales, como por ejemplo las azucareras, en donde se puede aprovechar los desechos del proceso. La co-generación puede resultar de una manera bastante eficiente. Sin embargo, existe la posibilidad de mejorar para producir más electricidad y vender el excedente a la red eléctrica. Para este análisis se hará referencia a la opción de combustión directa (procesar en un caldero el follaje de la caña de azúcar). El calor que resulta de la combustión del follaje en el caldero generará vapor, el cual se utilizará para operar turbinas y atender necesidades de vapor para proceso industrial.

#### 2.2.4 Caña de azúcar.

Es una gramínea tropical perenne con tallos gruesos y fibrosos que pueden crecer entre 3 y 5 metros de altura. Éstos contienen una gran cantidad de sacarosa que se procesa para la obtención de azúcar. La caña de azúcar es uno de los cultivos agroindustriales más importantes en las regiones tropicales. Se adapta a casi cualquier tipo de suelo, pero se desarrolla mejor en suelos francos, profundos y bien drenados. Se prefieren suelos con un pH de 7, pero se puede cultivar en un rango de 5,5 a 7,8. El cultivo demanda altos requerimientos nutricionales en consideración a la alta cantidad de materia verde y seca que produce, situación que agota los suelos y hace necesario un adecuado programa de fertilización. Sin embargo, es muy eficiente en el aprovechamiento de la luz solar. (Ramirez, 2008)



*FIGURA 5* Morfología botánica de la caña de azúcar  
Descripción: a) Tallo de la caña con hojas y raíz, b) Espiga que forma la inflorescencia de la caña.  
Fuente: (Landauro, 2016)

La mayoría de países en Latinoamérica cultiva la caña de azúcar para la producción de azúcar. Los principales productores son Brasil, México y Colombia. Los rendimientos promedio de producción para los principales productores de la región se presentan en el siguiente cuadro:

Tabla 1  
*Principales Productores de Caña de Azúcar*

| País          | t/ha    |
|---------------|---------|
| Perú          | 109,676 |
| Guatemala     | 96,032  |
| Colombia      | 91,569  |
| Ecuador       | 73,715  |
| Brasil        | 73,150  |
| México        | 72,724  |
| Venezuela     | 70,440  |
| Argentina     | 65,212  |
| R. Dominicana | 52,564  |
| Cuba          | 30,788  |

Fuente: (Ramirez, 2008)

#### **2.2.4.1 Subproductos de la caña de azúcar.**

El principal producto de este cultivo ha sido comúnmente el azúcar. En este caso, el azúcar y el etanol se consideran coproductos. El volumen de azúcar variará según la materia prima utilizada en la fabricación de etanol. Con miel pobre se pueden obtener 112 kg de azúcar por tonelada de caña, mientras que con miel rica 92 kg,

aunque esos valores dependen del nivel de sacarosa de la caña. El precio del azúcar dependerá del precio internacional o el acceso a los mercados preferentes. El bagazo de la caña es uno de los subproductos y se usa como fuente de energía. Por cada tonelada de caña se produce alrededor de 264 kg de bagazo (con un 50% de humedad), que se puede utilizar para la producción de energía eléctrica y calórica por medio de la cogeneración. (Ramirez, 2008)

Uno de los subproductos de la fabricación de etanol es la vinaza. Se estima que por cada litro de alcohol se producen entre 10 y 15 litros de vinaza. La vinaza tiene una carga orgánica muy alta por lo que puede ser potencialmente contaminante si no recibe algún tipo de tratamiento. Uno de los usos que se le da es como fertilizante y también se les puede dar un tratamiento anaeróbico para la producción de biogás, el cual podría utilizarse para generación de energía eléctrica. (Ramirez, 2008)

#### **2.2.4.2 Acceso a la energía.**

Dado que el nivel de acceso a energía se considera para zonas rurales, éste no es el caso en la producción de etanol ya que su fabricación se realiza en los ingenios y los rendimientos de escala no permiten producir de forma descentralizada. En el caso del bagazo de caña, éste es utilizado para producir la energía mediante combustión requerida en el proceso de producción y, cuando es posible, se inyectan los excedentes a la red de electricidad. (Ramirez, 2008)

#### **Bagazo**

El bagazo, como residuo de la molienda, es también utilizado en la industria papelera y del cartón, así como también en la fabricación de tableros aglomerados. (Melendez, 2018)

Una tonelada de bagazo con 50% de humedad tiene un poder calorífico de 7,64 MJ/kg. Los rendimientos potenciales por hectárea del bagazo como energía se presentan a continuación: (Ramirez, 2008)

Tabla 2  
Energía a partir de Bagazo

| Casos                  | MJ/ha   |
|------------------------|---------|
| 65 t/ha caña de azúcar | 496 600 |
| 85 t/ha caña de azúcar | 649 400 |

Fuente: (Ramirez, 2008)

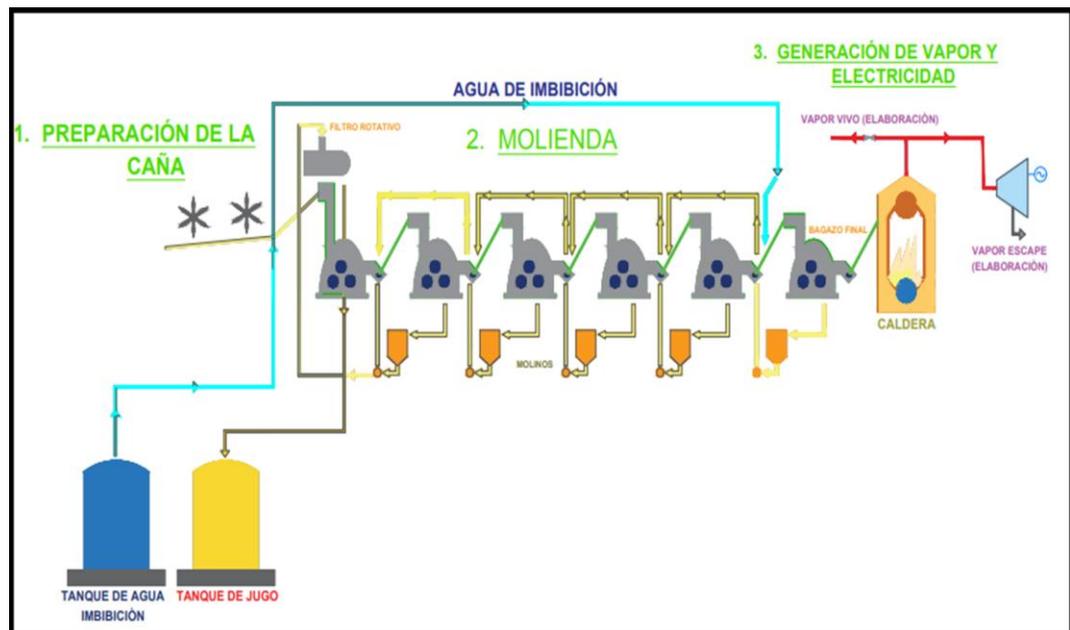


FIGURA 6 Generación de energía  
Fuente: (Melendez, 2018)

### Poder calorífico

Es la energía química del combustible que puede ser transformada directamente en energía térmica mediante un proceso térmico de oxidación.

Existen dos formas de expresar el poder calórico de un combustible. Si tras la combustión el agua formada en los gases de combustión se encuentra en forma líquida (PCS). Si permanece en forma de vapor (PCI). (Melendez, 2018)

**Poder calorífico superior (PCS o Hs) :**

Es la cantidad de calor que se obtiene de la combustión completa de la unidad de masa o volumen de un combustible cuando los productos de la combustión han alcanzado la misma temperatura que tenían el combustible y el aire antes de la combustión (25°C) y cuando el agua proveniente de la combustión y de la humedad del propio combustible se encuentren en fase líquida después de la combustión. En este proceso se asume que el vapor de agua ha entregado totalmente su calor latente de vaporización y se encuentra por ende condensado. (Alderetes, 2016)

**Poder calorífico superior (PCI O Hi):**

Es la cantidad de calor que se obtiene de la combustión completa de la unidad de masa o volumen del combustible cuando los productos de la combustión han alcanzado la misma temperatura que tenían el combustible y el aire antes de la combustión (25°C) y cuando el agua proveniente de la combustión y de la humedad del propio combustible se encuentren en fase gaseosa, es decir sin haber entregado su calor latente de vaporización. (Alderetes, 2016)

Ambos poderes caloríficos pueden estar referidos en base seca o húmeda. Hablaremos entonces del poder calorífico del bagazo seco o húmedo. La relación entre ambos poderes caloríficos, está dada según Baehr, por la siguiente ecuación.

$$H_s - H_i = r \left( \frac{9H}{100} + \frac{W}{100} \right)$$

Donde:

r = calor latente de vaporización del vapor: 540 kcal / kg

H = porcentaje de hidrógeno del bagazo

W = porcentaje de humedad del bagazo

La determinación del poder calorífico superior (Hs) se determina mediante bomba calorimétrica siguiendo los estándares antes citados, y una vez conocido, se podrá calcular por la ecuación anterior el poder calorífico inferior (Hi). (Alderetes, 2016)

### Calderos

La caldera es el equipo central donde se origina la energía térmica en forma de vapor. Los elementos principales para la generación de vapor son: agua, aire y combustible. (Melendez, 2018)



FIGURA 7 Caldera  
Fuente: (Melendez, 2018)

- TIPOS

Calderas de vapor pirotubulares: son aquellas en las que los humos de la combustión circulan por el interior de los tubos y el agua por el exterior.

(VYC industrial, s.f)

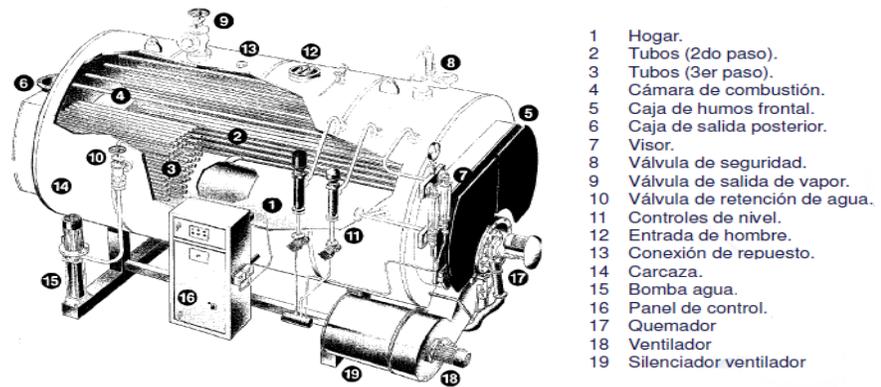


FIGURA 8 Caldera Pirotubular  
 Fuente: (solo ejemplos, 2019)

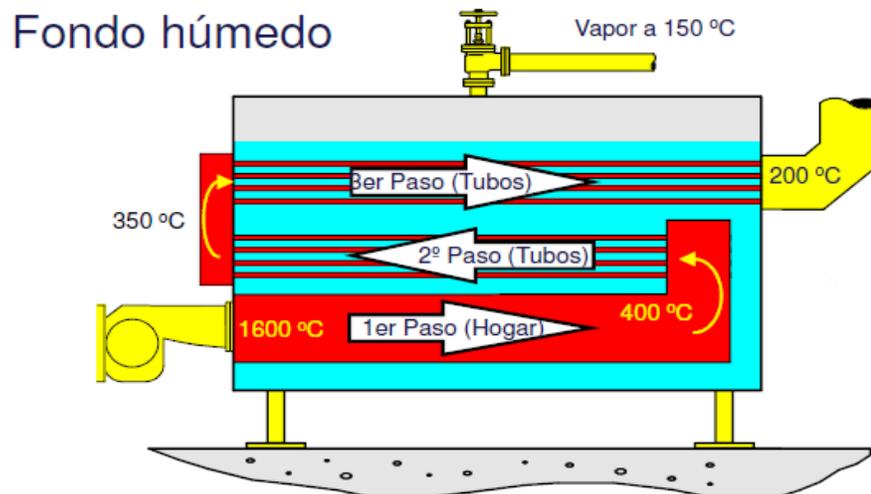


FIGURA 9 Calderos Pirotubulares  
 Fuente: (VYC industrial, s.f)

Calderas de vapor acuotubulares: son aquellas en las que el agua circula por el interior de los tubos y los humos de combustión por el exterior de estos. (solo ejemplos, 2019)

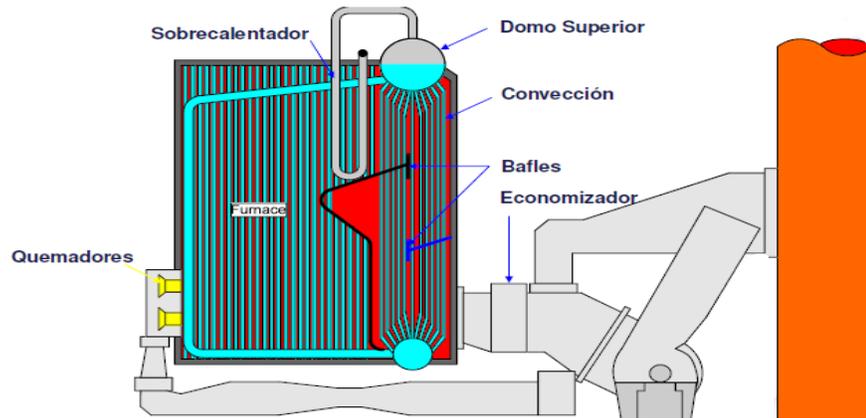


FIGURA 10 Caldera Acuotubulares  
Fuente: (solo ejemplos, 2019)

### Vapor

Es el fluido que se utiliza para dar movimiento rotativo a turbinas de vapor acopladas a generadores, en dichos generadores es donde se genera la energía eléctrica; tanto la electricidad como el vapor de escape en las turbinas es utilizado para consumo interno. (Melendez, 2018)

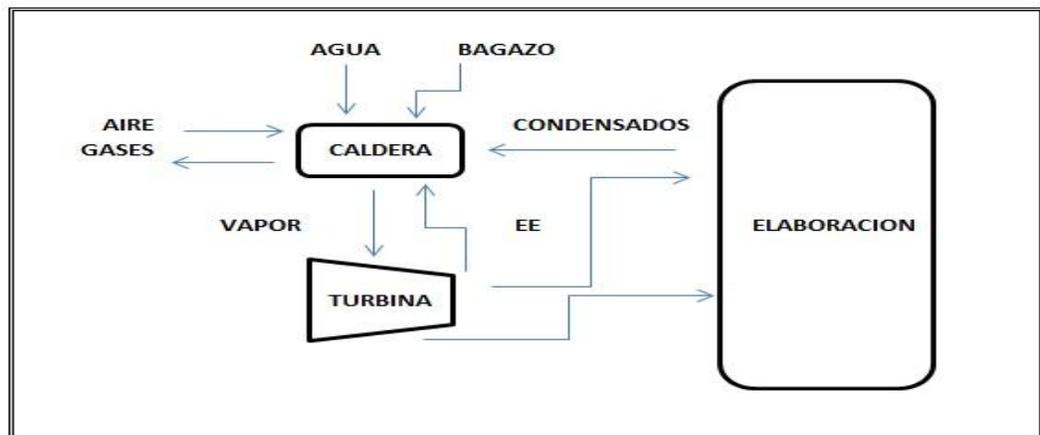
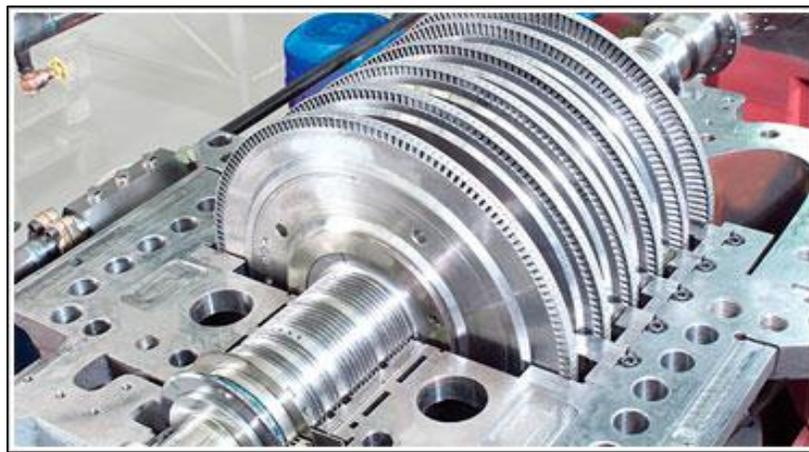


FIGURA 11 Típico proceso de generación de energía en un ingenio  
Fuente: (Melendez, 2018)

## **Turbina de vapor**

La Turbina es una turbomáquina motora que convierte en energía mecánica, la energía de una corriente de vapor de agua.

Esta energía mecánica se transfiere a través de un eje (rotor) para proporcionar el movimiento de una máquina de tal forma que el fluido en movimiento produce una fuerza tangencial que impulsa el rotor y la hace girar. (Melendez, 2018)



*FIGURA 12* Turbina a vapor  
Fuente: (Melendez, 2018)

## **Indicadores energéticos en los ingenios azucareros**

Según (Melendez, 2018) Los indicadores energéticos más importantes en un ingenio azucarero son:

- T<sub>vapor</sub>/Tcaña: Consumo específico de vapor en el proceso, expresado en Ton de vapor consumidos en el proceso de fabricación por cada tonelada de caña molida (T<sub>v</sub>/T<sub>c</sub>).
- kW-hr/Tcaña. - Índice específico de generación de energía eléctrica, por tonelada de caña molida (kWh/tc).

- T<sub>vapor</sub>/T<sub>bagazo</sub> - Índice de generación de vapor, representa las toneladas de vapor generados en la caldera por cada Ton de bagazo utilizado como combustible.

### **2.2.5 Caña de azúcar en el Perú.**

El Perú es un país productor de caña de azúcar desde el siglo XVI, cuando fue introducida con la llegada de los españoles; posteriormente se convirtió en un importante productor mundial. Sin embargo, el sector azucarero enfrentó una terrible crisis después de la reforma agraria en los primeros años de la década del setenta, que llevaron a la casi liquidación de las empresas azucareras, como consecuencia de la nula inversión en tecnología y modernización de las plantas, y la elevada corrupción en la administración de las empresas azucareras. (Ministerio de Agricultura y Riego, 2017)

El proceso de privatización de las empresas azucareras se inicia en 1996, con la Ley de Saneamiento Económico Financiero de las Empresas Agrarias Azucareras<sup>1</sup> de manera que a la fecha virtualmente todas las empresas han adoptado la forma de sociedades anónimas. Actualmente la mayor parte de estas empresas se encuentran debidamente saneadas, con grandes montos invertidos en su modernización y ampliación de sus plantas, que ha permitido la recuperación de la producción nacional, después de haber caído a uno de sus niveles más bajos en el año 1998 debido al impacto del fenómeno de “El Niño”. (Ministerio de Agricultura y Riego, 2017)

El tabla N°3 muestra la evolución de la producción de caña de azúcar, materia prima para la elaboración de azúcar de caña en el Perú. Este cultivo, en el tiempo va ir creciendo sostenidamente hasta el 2014 (11,3 millones de toneladas de caña) debido a la ampliación

de la frontera agrícola (área cosechada) que se ha duplicado respecto a décadas pasadas (150% respecto a los años '50). Por otro lado, el rendimiento, que a pesar de ser alto comparado con el de otros países, viene cayendo. (Ministerio de Agricultura y Riego, 2017)

Tabla 3  
*Perú Producción de Caña de Azúcar*

| AÑOS  | PRODUCCION | SUPERFICIE<br>COSECHADA<br>(ha) | RENDIMIENTO<br>(kg/ha) |
|-------|------------|---------------------------------|------------------------|
| ..... | .....      | .....                           | .....                  |
| 1955  | 6 097 566  | 35 898                          | 169 858                |
| 1956  | 5 876 384  | 37 767                          | 155 596                |
| 1957  | 6 077 792  | 39 353                          | 154 443                |
| 1958  | 6 840 208  | 39 492                          | 173 205                |
| 1959  | 6 543 824  | 41 367                          | 158 189                |
| 1960  | 7 359 171  | 47 361                          | 155 385                |
| 1961  | 7 288 136  | 47 075                          | 154 820                |
| 1962  | 7 247 077  | 46 830                          | 154 753                |
| 1963  | 7 697 310  | 49 160                          | 156 577                |
| 1964  | 7 590 920  | 48 855                          | 155 377                |
| 1965  | 7 498 940  | 46 520                          | 161 198                |
| 1966  | 8 463 380  | 53 530                          | 158 105                |
| 1967  | 7 942 800  | 49 670                          | 159 911                |
| ..... | .....      | .....                           | .....                  |
| 2010  | 9 660 895  | 76 983                          | 125 494                |
| 2011  | 9 884 936  | 80 069                          | 123 455                |
| 2012  | 10 368 666 | 81 126                          | 127 812                |
| 2013  | 10 992 240 | 82 205                          | 133 717                |
| 2014  | 11 389 617 | 90 357                          | 126 051                |
| 2015  | 10 211 856 | 84 574                          | 120 744                |
| 2016  | 9 832 526  | 87 696                          | 112 120                |

Fuente: (Ministerio de Agricultura y Riego, 2017)

### 2.2.5.1 Producción y consumo de azúcar de caña.

La producción de azúcar de caña, a partir del año 2000, muestra un crecimiento sostenido hasta el año 2003 (959 mil toneladas); sin embargo, en el 2004 y 2005 declina como consecuencia de otro fenómeno “El Niño” (748 mil toneladas 695 mil toneladas respectivamente). Es así que esta menor producción debe estar cubierta con mayores importaciones. A partir del 2006 se aprecia una fuerte y sostenida recuperación de la producción nacional, alcanzando en el 2014 la producción récord de 1 203 mil toneladas, reflejo de nuevas inversiones en plantas refinadoras e incorporación de nuevas tierras ganadas al desierto por parte de las principales empresas nacionales.

En el 2015 se observa una menor producción consecuencia, entre otros, de una paralización en la producción, además del impacto negativo del fenómeno de “El Niño” 2015-2016, que afectó principalmente la infraestructura vial y de riego, más que al cultivo en particular. (Ministerio de Agricultura y Riego, 2017)

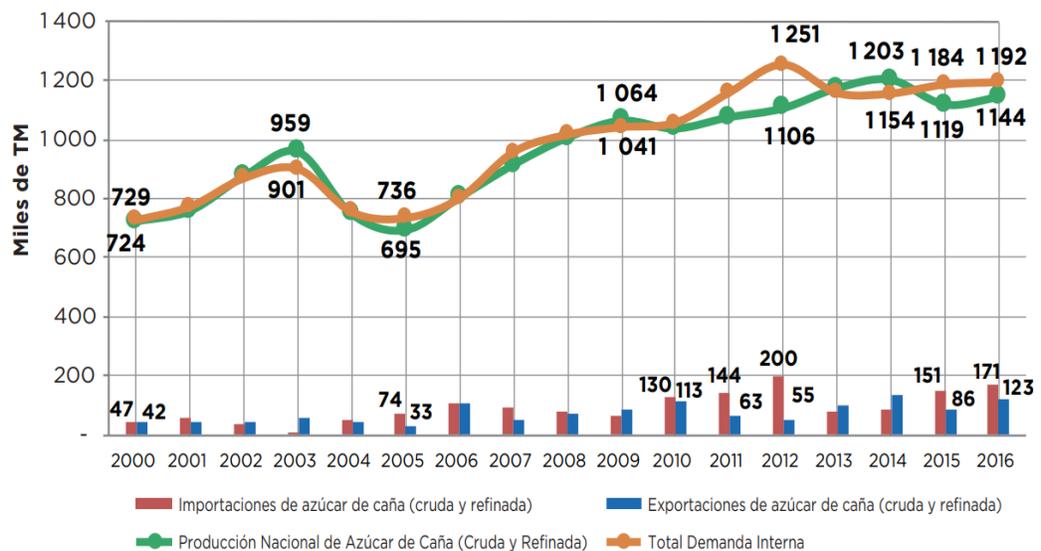


FIGURA 13 Perú, comportamiento de la demanda interna aparente de azúcar de caña  
Fuente: (Ministerio de Agricultura y Riego, 2017)

### **2.2.6 Caña de azúcar como cultivo energético.**

La producción azucarera ha demostrado que es capaz de satisfacer parte de la alimentación directa a la humanidad. Muchos de sus derivados constituyen fuentes de alimentación animal, los que a su vez complementan la dieta proteica de los seres humanos. Sin embargo, los residuos agrícolas resultantes de la cosecha cañera no son empleados en la cuantía que las circunstancias actuales lo exigen, a pesar de representar un formidable recurso como fuente de alimentación animal y generación de energía. (León et al., 2013)

Por otra parte, el hollín liberado durante la quema de la paja de la caña de azúcar en el campo, se deposita en el suelo en forma de finos copos oscuros. Este contiene alrededor de 70 productos químicos perjudiciales para el medio ambiente, que ocasionan serios problemas respiratorios en la población expuesta. En Cuba, la biomasa obtenida como subproducto de la industria azucarera, constituye el mayor recurso desde todos los puntos de vista, ya que, en una tonelada de caña fresca, aproximadamente, el 32 % es de bagazo integral y el 28 % de paja y cogollo de caña (Residuo Agrícola Cañero, RAC), los cuales son la biomasa más importante que se procesa y puede ser utilizada con fines energéticos, como alimento animal o para producir otros productos derivados de la caña de azúcar. (León et al., 2013)

La paja es el resultado del secado de las hojas de la caña de azúcar, producto del desarrollo de esta planta y el cogollo es la parte verde de la planta que queda en el campo (hojas verdes y pedazos de tallos). Los dos constituyen una fuente de energía renovable. El estimado de este residuo en el campo es aproximadamente de 15 a 20 % del peso de la caña, de ahí que su volumen sea elevado. (León et al., 2013)

La solución del aprovechamiento de estos residuos depende de una serie de factores que deberán ser estudiados y desarrollados, así son importantes los aspectos de recolección, transporte, almacenamiento y procesos tecnológicos para transformarlos. (León et al., 2013)

### **Caracterización**

La composición de la caña de azúcar en su estado natural se muestra en la tabla 4, donde se puede apreciar que los residuos constituyen alrededor del 30 %, de ahí la importancia de su utilización. La paja está constituida por la vaina y la hoja seca. Su composición química en estado natural se muestra en la tabla 5. (León et al., 2013)

Tabla 4  
*Composición de la Caña de Azúcar en la Plantación*

| Componente             | Contenido (%) |
|------------------------|---------------|
| Cogollo y hojas verdes | 8,54          |
| Vainas y hojas secas   | 19,74         |
| Tallos limpios         | 71,82         |

Fuente: (León et al., 2013)

Tabla 5  
*Composición Química de la Paja en Estado Natural*

| Componente | Paja integral (%) |
|------------|-------------------|
| Celulosa   | 45,13             |
| Lignina    | 14,11             |
| Pentosanos | 25,56             |
| Cenizas    | 8,03              |
| Humedad    | 9,67              |

Fuente: (León et al., 2013)

### **2.2.7 Residuos agrícolas de cosecha (RAC) de la caña de azúcar.**

Los residuos agrícolas de cosecha (RAC) es la fracción o fracciones de un cultivo que no constituyen la cosecha propiamente dicha, parte de la cosecha que no cumple con los requisitos de calidad mínima para ser comercializada como tal. (EcuRed, s.f)

Según el (MAGyP, s.f) La caña de azúcar es uno de los cultivos que genera gran cantidad de residuos de cosecha (RAC). Luego de realizada la cosecha mecanizada de la caña queda en el lote el residuo agrícola de cosecha (RAC), que en la mayoría de los casos es quemado por los productores por provocar los siguientes efectos negativos:

- Dificulta el cultivo mecánico, la fertilización y el control selectivo de malezas a través del colchón de residuo.
- Demora el brotado y genera discontinuidad del mismo, produciendo una disminución del rendimiento cuando las temperaturas son bajas y/o el suelo está muy húmedo luego de cosechar.
- Incrementa las poblaciones de plagas que se refugian y multiplican debajo del RAC.

Al quemar la caña se genera la pérdida del 48% del RAC, presentando una serie de inconvenientes como:

- Incremento de la necesidad de herbicidas.
- Pérdida de nutrientes del suelo y afectaciones a los microorganismos.
- Disminución de la porosidad del suelo y como consecuencia de esto menor infiltración del agua.

- Eliminación de los enemigos naturales de las plagas.

Toda esta biomasa que es dejada y luego quemada en los cañaverales podría ser aprovechada para generar energía y así disminuir los problemas ya mencionados anteriormente.

#### **2.2.7.1 Recolección y obtención de los residuos agrícolas de cosecha (RAC).**

En el mundo hay diversos métodos para la recolección de paja en la producción de cereales. Este proceso es una solución mecánica sencilla, ya que los residuos quedan alineados en el surco durante la cosecha. Además, estos materiales son, por lo regular, homogéneos en su composición y tamaño. En el caso de los residuos de la caña de azúcar, el proceso de recolección no es tan sencillo debido a la heterogeneidad y baja densidad de bulto. Otro factor de importancia lo constituye el hecho de que la inmensa mayoría de los países productores de azúcar de caña son subdesarrollados y no disponen de la infraestructura técnico-material necesaria. Sin embargo, la mayoría de los países productores de cereales tienen un alto desarrollo tecnológico e industrial. (León et al., 2013)

En Cuba, los residuos agrícolas de la caña pueden ser recolectados en dos lugares: en el centro de acopio o estaciones de limpieza de caña y en el propio campo. En el caso de la paja, cualquiera que sea su uso, se debe realizar un tratamiento mecánico que elimine la heterogeneidad de su geometría y haga posible su compactación para la utilización posterior. (León et al., 2013)

### **2.2.7.2 Transporte del RAC.**

Entre los aspectos relacionados con la manipulación de los residuos, uno de los más importantes por su incidencia técnico económica es la transportación. Los residuos agrícolas son materiales de baja densidad y su carga está limitada por volumen y no por el peso; por tanto, es imprescindible para la economía del transporte la utilización de todo el espacio disponible y la obtención de una buena compactación. La baja densidad lleva a que el costo por transporte aumente, ya que hay que gastar más para lograr el mismo suministro energético que con otro tipo de combustibles. Si se quiere aliviar este problema, se puede hacer aumentando la densidad de la biomasa. (León et al., 2013)

### **2.2.7.3 Energía a partir del RAC.**

Actualmente, los residuos constituyen un gran problema medioambiental, pero pueden tener un gran potencial energético, siempre que se solucionen sus graves dificultades (bajo potencial energético y densidad), lo que ocasiona problemas de transporte y almacenamiento. Por medio de la densificación es factible aumentar la densidad de los residuos biomásicos, lo que facilita su manejo y permite su utilización como un combustible más homogéneo, solucionando el problema de los residuos y acondicionándolos para una posible utilización energética. (MAGyP, s.f)

Los factores que limitan la combustión óptima de las materias leñosas son esencialmente físicos: la densidad aparente, la granulometría y la humedad, además de su disponibilidad. Entre las biomásas, la caña de azúcar ocupa un destacado lugar por sus altos rendimientos agrícolas. El rendimiento en materia seca de la caña de

azúcar, oscila desde 27-90 t/año dependiendo si se realiza con riego, fertilización, métodos de cosecha, cultivo, etc. (MAGyP, s.f)

El deseo de aprovechar al máximo el potencial energético de la caña surgió la idea de utilizar los residuos agrícolas del cultivo, renovables anualmente, como combustible en las calderas para la generación del vapor. Tales residuos están compuestos por las hojas verdes y secas de la caña, los cogollos, las basuras y la caña que no se puede procesar. Los residuos poseen un contenido de cenizas más alto que el del bagazo, por esta razón es recomendable quemarlos mezclados con bagazo. (León et al., 2013)

#### **2.2.7.4 Características del RAC.**

La caña de azúcar es uno de los cultivos con mayor capacidad de convertir la energía solar en biomasa. Si se toman en cuenta solo el bagazo y la paja, en los cañaverales se almacenan alrededor del equivalente a una tonelada de petróleo por cada tonelada de azúcar que puede producirse. La combustión de la biomasa no incrementa la concentración atmosférica de carbono, porque solo devuelve a la atmosfera el carbono que fijo la planta durante su crecimiento. (MAGyP, s.f)

La biomasa aprovechable energéticamente son el bagazo y los RAC. El bagazo representa el 30% de los tallos verdes molidos y es el residuo fibroso de la molienda; se obtiene con un 50% de humedad, esto significa que por cada hectárea cosechada es posible obtener anualmente 13,5 toneladas de bagazo equivalentes a 2,7 tce (tonelada de combustible equivalente: 37,5 MJ/kg). (MAGyP, s.f)

Según bibliografía, es posible recolectar en promedio 3,75 toneladas de RAC por hectárea de caña cosechada, que son equivalentes a 0,62 tce, esto contrasta bastante

con datos obtenidos de ensayo realizado por equipo del PRECOP en la Provincia de Tucumán, en donde se logró recolectar alrededor de 13000 kg RAC/ha (24000 kg RAC/ha de residuo inicial), dejando un porcentaje en el suelo para favorecer los procesos de mineralización de la materia orgánica, retención de humedad edáfica, evitar erosión, etc. (MAGyP, s.f)

#### **2.2.7.5 Caracterización de la biomasa como combustible.**

El término biomasa, en sentido amplio, se refiere a cualquier tipo de materia orgánica que ha tenido su origen inmediato como consecuencia de un proceso biológico. El conocimiento de su composición y propiedades es de fundamental importancia para evaluar su potencialidad como materia prima en los procesos de conversión térmica. (MAGyP, s.f)

**Las características del RAC como combustible son las siguientes**

- **Composición química**

Tabla 6  
*Características del RAC*

| Elementos químicos | RAC (%) |
|--------------------|---------|
| Carbono            | 48,28   |
| Hidrogeno          | 5,55    |
| Oxigeno            | 45,61   |
| Cenizas            | 9,5     |
| Azufre             | 0,13    |
| Nitrógeno          | 0,43    |

Fuente: (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca (MAGyP), s.f)

- **Calor específico de combustión.**

Si la humedad promedio de los RAC es de 25% después de transcurridos tres días de secado natural, el valor aproximado de su calor de combustión será de 11 825 kJ/kg (2 824 kcal/kg). (MAGyP, s.f)

### 2.2.8 Características energéticas y ambientales del uso de la biomasa cañera.

La caña de azúcar es capaz de almacenar el 1,7% de la energía existente en la radiación incidente en cultivos con irrigación y en condiciones experimentales, y 1,1% en campos bien atendidos con riego. Tiene un rendimiento genético potencial que se encuentra entre 200 y 300 t/ha que compite ventajosamente con otros cultivos. (MAGyP, s.f)

El rendimiento alcanzable en la zona donde el equipo PRECOP realizo el ensayo en la Provincia de Tucumán es de alrededor de 69 000 kg/ha siendo la variedad cultivada la LCP384 (soca 1). Para un valor calórico de 17 476 MJ/kg de materia seca, con un contenido de materia seca del 30% y un rendimiento de 100 toneladas de caña integral por hectárea, la producción energética de la caña es 20 veces mayor que la energía que se utiliza para producirla, cosecharla y trasladarla hasta el ingenio. Cuatro toneladas de paja equivalen a una tonelada de petróleo (calor de combustión de la paja con 30% de humedad: 11,7 MJ/kg.). (MAGyP, s.f)

### 2.2.9 Proporción de los compuestos de los residuos de la caña en el cañaveral.

Tabla 7  
*Compuestos de los Residuos de la Caña*

| Residuos     | Proporción |
|--------------|------------|
| Hojas secas  | 7          |
| Hojas verdes | 8          |
| Cogollo      | 7          |

Fuente: (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca (MAGyP), s.f)

Los compuestos de residuos de caña según (MAGyP, s.f) son:

**Hojas secas:** Presenta un contenido de celulosa similar al de los tallos de caña, pero con mayor contenido de sílice. Su contenido de fibra seca esta alrededor de 90%. Su forma alargada y estrecha, con cierta resistencia a la flexión, hace que su presencia en un bulto de caña adquiera mayor volumen. Se puede reducir su tamaño con facilidad en molinos de martillo

**Hojas verdes:** su contenido de fibra seca esta alrededor de 35% y el contenido de sus jugos tiende a parecerse al del cogollo. Tiene las características morfológicas de las hojas secas.

**Cogollo:** tiene una longitud que puede variar entre los 10 y los 30 cm con una constitución física similar al tallo de caña, pero su jugo es rico en no azúcares y pobre en sacarosa.

#### **2.2.9.1 Características de los RAC: Datos físicos.**

Tabla 8  
*Características del RAC*

| Parámetros   | Valores |
|--|---------|
| Densidad a granel (kg/m <sup>3</sup> ) a 40-55% de humedad | 25-40   |
| Densidad picado (kg/m <sup>3</sup> ) a 40 % humedad        | 80      |
| Densidad empacado (kg/m <sup>3</sup> ) a 30% humedad       | 170-225 |
| Briqueta mediana densidad a 25% humedad                    | 400     |
| Briqueta alta densidad a 25% humedad                       | 1200    |

Fuente: (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca (MAGyP), s.f)

El poder calorífico de maloja de caña de azúcar con 15% de humedad es de 3 100 kcal/kg. El PC superior es (según mediciones en la EEAOC) de 3 500-3 600 kcal/kg MS. Y el PC inferior varía entre 2 300-2 400 kcal/kg MS (con 15% de humedad y entre un 10 y 11% de cenizas). (MAGyP, s.f)

#### **2.2.9.2 Características deseables del material para ser utilizado como combustible.**

- Los RAC son más fáciles de manejar cuando no están verdes porque se vuelven frágiles. La humedad de los mismos varía considerablemente según el tiempo que pasa después de cosechada la caña; se debe procurar procesar RAC con humedades inferiores al 50%.
- La granulometría del RAC no es constante, pero según estudios realizados por Cenicaña sobre la superficie específica, el valor con el que conviene que salgan picados los RAC debe estar por debajo de los 3 000 mm<sup>2</sup>/gr. (MAGyP, s.f)

## CAPITULO III: MARCO METODOLOGICO

### 3.1 Tipo y Diseño de investigación

- **Investigación exploratoria**

Consiste en evaluar la biomasa del (RAC) como fuente de energía en la Empresa Agroindustrial Pomalca.

- **Investigación descriptiva cuantitativa**

El presente trabajo de investigación es de enfoque cuantitativo, para determinar como la generación de energía eléctrica se desarrolla mediante la combustión de los residuos agrícolas de cosecha (RAC).

### 3.2 Población y muestra

#### 3.2.1 Población.

Una población es el conjunto de todos los casos que concuerdan con una serie de especificaciones. Según lo descrito se considera como población a todas las empresas agroindustriales o ingenios azucareros ubicados en la región de Lambayeque.

#### 3.2.2 Muestra.

De acuerdo a la población establecida para la presente investigación, se toma como muestra la empresa Agroindustrial Pomalca S.A.A.

Para el presente estudio se utilizará los residuos agrícolas de cosecha (RAC) de la caña de azúcar para que mediante un proceso de combustión generar energía eléctrica.

### 3.3 Hipótesis

Mediante la propuesta de la combustión de los residuos de cosecha, se obtendrá energía térmica la cual generará vapor de agua en las calderas para después ingresar a los turbogeneradores y terminar obteniendo energía Eléctrica y así poder abastecer la demanda de energía eléctrica de la empresa Agroindustrial Pomalca S.A.A.

### 3.4 Variables – Operacionalización

Variable Independiente: Residuos agrícolas de Cosecha (RAC) de la caña de azúcar

Variable Dependiente: Energía

Tabla 9  
*Operacionalización de las Variables*

| <b>Variab</b> les   | <b>Definición conceptual</b>   | <b>Definición operacional</b>  | <b>Indicadores</b>   |
|---|--|--|--|
| <p><b><u>Variable independiente</u></b></p> <p>Residuos agrícolas de Cosecha (RAC) de la caña de azúcar</p> | <p><b>Los residuos agrícolas de cosecha de la caña de azúcar</b> son aquellos residuos que quedan en los cañaverales después de la cosecha, estos residuos pueden ser aprovechados para transformarse en biocombustibles rentables y sostenibles que pueden utilizarse en los ingenios para generación de energía eléctrica.</p> | <p>Evaluación del sistema biomasa aprovechando los residuos agrícolas de cosecha de la caña de azúcar.</p> | <p>Cuantificar la cantidad promedio de hectáreas (ha) cosechadas diarias y anuales.</p> <p>Cuantificar (t) la cantidad de residuos agrícolas de cosecha (RAC) de la caña de azúcar.</p> <p>Determinar el poder calorífico.</p> |
| <p><b><u>Variable dependiente</u></b></p> <p>Energía</p>  | <p><b>La energía</b> se refiere a una fuerza capaz de generar una acción o un trabajo capaz de movilizar, transformar, hacer surgir o mantener funcionando a un objeto. Estos tipos de energía pueden ser eléctrica, cinética, eólica, solar etc.</p>  | <p>Calcular la energía promedio diaria y anual.</p>  | <p>Energía promedio diaria. (MWh)</p> <p>Energía promedio anual. (MWh)</p> <p>Potencia (kW)</p>  |

Fuente: Elaboración propia

### **3.5 Métodos y técnicas de investigación**

#### **3.5.1 Fuentes primarias.**

Información proporcionada por el personal, al gerente de Fabrica Ing. Willy Rodríguez y el jefe de mantenimiento Ing. Renee Melendez en la Empresa Agroindustrial Pomalca.

Visitas al área de producción de la fábrica y administración.

#### **3.5.2 Fuentes secundarias.**

Libros, artículos de gestión de inventarios.

Biblioteca de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.

Investigaciones o tesis y otros documentos de combustión de los residuos agrícolas de cosecha (RAC).

### **3.6 Análisis estadístico e interpretación de datos**

#### **3.6.1 Determinación del potencial energético de la biomasa residual.**

Para determinar el potencial energético, se debe evaluar el potencial energético inferior (PCI) de la biomasa residual producida y el peso seco de la biomasa para luego determinar su energía en forma de calor (kJ).

$$\text{Energía de la biomasa} = \text{PCI} \times \text{peso de la biomasa} \dots \dots \dots \text{Ecuación 1}$$

Donde:

- PCI: Poder calorífico inferior (kJ/kg)
- Peso de la biomasa (kg)

### **3.6.2 Evaluación del poder calorífico inferior.**

El Poder Calorífico Inferior (PCI) se define como la cantidad de energía que se desprende en la combustión de una unidad de masa de un material combustible en la que el agua se libera en forma de vapor. Por lo tanto, el contenido energético de la biomasa se mide en el poder calorífico que el recurso posee. (Serrato & Lesmes, 2016)

Este término hace referencia a la cantidad de calor que es capaz de producir por medio de la combustión por unidad de masa del recurso, la unidad de medida puede estar dada en MJ/kg, MJ/lt o MJ/m<sup>3</sup>, de acuerdo al estado en el que se encuentre la materia (sólido, líquido, gaseoso). Se observa en la tabla 10 el valor calorífico que tienen los sectores agrícolas, pecuario y los Residuos Sólidos Orgánicos Urbanos (RSOU) a partir de diferentes fuentes generadoras de biomasa y también de los tipos de residuos. (Serrato & Lesmes, 2016)

Así mismo existe un PCI dependiendo del tipo de residuo. Este varía dependiendo de las propiedades del residuo, por ejemplo, como se observa en la tabla 10 el PCI presente en el bagazo de la caña panelera es mayor al PCI de las hojas secas de la misma. Esto sucede por la composición del residuo, su humedad y su capacidad de producir calor, a pesar de ser parte de la misma fuente de biomasa. (Serrato & Lesmes, 2016)

Tabla 10  
*Poder Calorífico Inferior para Biomasa residual en Colombia*

| Sector   | Fuente de biomasa | Tipo residuo    | PCI (kcal/kg) | PCI (kJ/kg) |
|----------|-------------------|-----------------|---------------|-------------|
| Agrícola | Palma de aceite   | Cuesco          | 3.988         | 16.685,79   |
|          |                   | Fibra           | 4.273         | 17.878,23   |
|          |                   | Raquis          | 4.021         | 16.823,86   |
|          | Caña de azúcar    | RAC             | 3.684         | 15.413,86   |
|          |                   | Bagazo          | 4.456         | 18.643,90   |
|          | Caña para panela  | Bagazo          | 4.456         | 18.643,90   |
|          |                   | Hojas secas     | 4.007         | 16.765,29   |
|          |                   | RAC             | 3.684         | 15.413,86   |
|          | Café              | Pulpa           | 4.259         | 17.819,66   |
|          |                   | Cisco           | 4.430         | 18.535,12   |
|          |                   | Tallos          | 4.384         | 18.342,66   |
|          | Maíz              | Rastrojo        | 3.429         | 14.346,94   |
|          |                   | Tusa            | 3.390         | 14.183,76   |
|          |                   | Capacho         | 3.815         | 15.961,96   |
|          |                   | Hojas secas     | 4.274         | 17.882,42   |
|          | Arroz             | Tamo            | 3.113         | 13.024,79   |
|          |                   | Cascarilla      | 3.603         | 15.074,95   |
|          | Banano            | Raquis          | 1.809         | 7.568,86    |
| Vástago  |                   | 2.032           | 8.501,89      |             |
| Rechazo  |                   | 2.488           | 10.409,79     |             |
| Plátano  | Raquis            | 1.808           | 7.564,67      |             |
|          | Vástago           | 2.032           | 8.501,89      |             |
| Pecuario | Avícola           | Ponedoras       | 2.248         | 9.405,63    |
|          |                   | Engorde         | 3.645         | 15.250,68   |
|          | Bovino            | Leche           | 2.801         | 11.719,38   |
|          |                   | Doble propósito | 3.680         | 15.397,12   |
|          | Porcino           | Carne           | 3.783         | 15.828,07   |
|          |                   | Tecnificado     | 6.049         | 25.309,02   |
| RSOU     | Plaza mercado     | Sólido orgánico | 3.772         | 15.782,05   |
|          | Centro acopio     | Sólido orgánico | 3.772         | 15.782,05   |
|          | Poda              | Sólido orgánico | 3.772         | 15.782,05   |

Fuente: (Serrato & Lesmes, 2016)

### 3.6.3 Generación total del RAC

Según (Alderetes, 2016) Parte de este material se deja en el campo ya que sirve para:

- protección contra la erosión
- disminuye la amplitud de variación térmica de la superficie del suelo
- incrementa la actividad microbiológica

- controla el crecimiento de plantas dañinas
- reduce costos de producción

Se estima que el 50% del RAC es posible ser recuperado para su uso como combustible y que el otro 50% se puede dejar en el campo por los beneficios antes mencionados. La cantidad de RAC disponible por hectárea es muy variable ya que depende del tipo de variedad de caña, la época del año y particularmente del nivel de producción del cañaveral.

Para determinar este valor se efectuaron numeroso estudios y ensayos de campo, que se resumen en la tabla N°11. Otro dato muy interesante de resaltar, es que la humedad promedio de estos residuos (50%) al cabo de 10-15 días de estacionamiento en el campo, puede reducirse a valores tan bajos como 10-15%, lo que resulta de gran interés desde el punto de vista térmico. Una última cuestión relacionada al uso de esta biomasa es lo concerniente a su manipuleo y transporte cuyas inversiones y costos operativos deberán ser evaluados financieramente respecto de los beneficios resultantes de la cogeneración. (Alderetes, 2016)

Tabla 11  
*Producción potencial del RAC*

| Cantidad                    | RAC         |
|-----------------------------|-------------|
| Cantidad/ha de caña         | 4-12 ton/ha |
| Cantidad por caña cosechada | 14-15% caña |

Fuente: (Alderetes, 2016)

## CAPITULO IV: DESARROLLO DEL MARCO METODOLOGICO

### 4.1 Evaluación del potencial energético de los residuos agrícolas de cosecha (RAC) de la caña de azúcar

#### 4.1.1 Calculo del peso de la biomasa.

Calculando las hectáreas producidas en un día para después encontrar el peso de la biomasa.

Tabla 12  
*Cantidad de Caña Procesada al año*

| AÑO  | CANTIDAD DE CAÑA(t) |
|------|---------------------|
| 2008 | 713 041,17          |
| 2009 | 910 800,81          |
| 2010 | 873 798,72          |
| 2011 | 846 977,21          |
| 2012 | 808 682,57          |
| 2013 | 966 229,4           |
| 2014 | 936 957,02          |
| 2015 | 695 173,06          |
| 2016 | 725 574,77          |
| 2017 | 674 676,07          |
| 2018 | 785 293,72          |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 13  
*Cantidad de Hectáreas Cosechadas al año*

| AÑO  | Hectáreas de caña cosechada(ha) |
|------|---------------------------------|
| 2008 | .....                           |
| 2009 | .....                           |
| 2010 | .....                           |
| 2011 | 10 984,21                       |
| 2012 | 8 636,06                        |
| 2013 | 8 924,825                       |
| 2014 | 9 794,28                        |
| 2015 | .....                           |
| 2016 | .....                           |
| 2017 | .....                           |
| 2018 | .....                           |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 14

*Indicador (Relación entre Toneladas Caña Procesadas y hectáreas cosechadas)*

| AÑO  | T caña/ha cosechada |
|------|---------------------|
| 2008 | .....               |
| 2009 | .....               |
| 2010 | .....               |
| 2011 | 77,109              |
| 2012 | 93,640              |
| 2013 | 108,263             |
| 2014 | 95,664              |
| 2015 | .....               |
| 2016 | .....               |
| 2017 | .....               |
| 2018 | .....               |

Fuente: Elaboración propia

En promedio tenemos que por cada hectárea cosechada tenemos 93,669 toneladas de caña procesadas.

La empresa Agroindustrial Pomalca cosecha y procesa en promedio 3 000 toneladas de caña al día.

Tabla 15

*Hectáreas Cosechadas al Dia*

| t caña cosechada | ha cosechada |
|------------------|--------------|
| 3 000            | 32,028       |

Fuente: Elaboración propia

Con la tabla N°11 podemos sacar un promedio de 14.5% toneladas de RAC por toneladas de caña cosechada.

Tabla 16

*Cantidad de RAC al Dia*

| t caña cosechada | RAC (t) |
|------------------|---------|
| 3 000            | 435     |

Fuente: Elaboración propia

Entonces tenemos 435 toneladas de RAC producidos en un día de las cuales solo la mitad serán utilizados para la generación de energía que es igual 217,5 toneladas.

Cantidad de biomasa para usar como combustible = 217,5 toneladas al día = 217 500 kg al día.

#### 4.1.2 Determinación del PCI.

Teniendo en cuenta los datos obtenidos de la tabla 10, el PCI (kcal/kg) de los residuos agrícolas de cosecha de la caña de azúcar que se incinerarán está determinado de la siguiente manera:

Tabla 17  
*Poder calorífico del RAC*

| Tipo de residuo | PCI (kcal/kg) |
|-----------------|---------------|
| RAC             | 3 684         |

Fuente: Elaboración propia

#### 4.1.3 Calculo de energía biomasa.

Para el cálculo de la energía de la biomasa, se utiliza la Ecuación N° 1:

$$\text{Energía de la biomasa} = \text{PCI} \times \text{Peso de la biomasa}$$

Tabla 18  
*Energía Calorífica de la Biomasa(RAC)*

| Tipo de residuo | PCI ( kcal/kg) | ENERGIA (kcal) | ENERGIA (kJ)  |
|-----------------|----------------|----------------|---------------|
| RAC             | 3 684          | 801 270 000    | 3 352 513 680 |

Fuente: Elaboración propia

Teniendo en cuenta que 1 kcal = 4,184 kJ, la energía total de la biomasa en forma de calor es 3 352 513 680 kJ.

#### **4.1.4 Ubicación de la reserva del RAC.**

Para una correcta ubicación del almacén del RAC, tiene que cumplir algunos requisitos:

- Estar cerca de la fábrica en donde se utilizará esta biomasa como combustible.
- Tener vías para camiones

Es por eso que la biomasa del RAC se almacenará en la misma fabrica ya que cuenta con un área disponible de 200 metros de largo por 100 de ancho.

## CAPITULO V: ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO

### 5.1 Potencial energético de la biomasa RAC de la caña de azúcar

De acuerdo al Capítulo IV, la energía calorífica generada por la combustión de la biomasa de RAC es aproximadamente 3 352 513 680 kJ.

Para poder calcular cuanta energía es producida por la combustión del RAC, hallamos primero la cantidad de vapor que es producido.

Tabla 19  
*Reporte de Energía de la Empresa Agroindustrial Pomalca*

| Fecha      | Generación de Energía Eléctrica kW-h |             |           |           | Vapor consumido (Ton/hr) |             |                 |          | Molienda |          |                | Ton. vapor /Ton. caña | kW-h / Ton. Caña | Ton vapor/ Ton Bag Cons. |                |
|------------|--------------------------------------|-------------|-----------|-----------|--------------------------|-------------|-----------------|----------|----------|----------|----------------|-----------------------|------------------|--------------------------|----------------|
|            | Turbo No. 3                          | Turbo No. 4 | Grupo 500 | Total     | Turbo No. 3              | Turbo No. 4 | vapor/reducción | Total    | Ton/hr   | TCM      | Bag. Producido |                       |                  |                          | Bag. Consumido |
| 01/07/2016 | 32,100.00                            | 55,979.00   |           | 88,079.00 | 513.60                   | 783.71      | 129.73          | 1,427.04 | 59.46    | 2,883.13 | 1,110.10       | 960.10                | 0.49             | 30.55                    | 1.49           |
| 02/07/2016 | 27,700.00                            | 59,313.00   |           | 87,013.00 | 443.20                   | 830.38      | 127.36          | 1,400.94 | 58.37    | 3,058.39 | 1,099.32       | 1,049.32              | 0.46             | 28.45                    | 1.34           |
| 03/07/2016 | 28,700.00                            | 58,213.00   |           | 86,913.00 | 459.20                   | 814.98      | 127.42          | 1,401.60 | 58.40    | 2,773.35 | 939.75         | 909.75                | 0.51             | 31.34                    | 1.54           |
| 04/07/2016 | 28,500.00                            | 55,612.00   |           | 84,112.00 | 456.00                   | 778.57      | 123.46          | 1,358.02 | 56.58    | 2,561.50 | 806.56         | 796.56                | 0.53             | 32.84                    | 1.70           |
| 05/07/2016 | 26,300.00                            | 47,721.00   |           | 74,021.00 | 420.80                   | 668.09      | 108.89          | 1,197.78 | 49.91    | 1,972.05 | 641.25         | 661.25                | 0.61             | 37.64                    | 1.81           |
| 06/07/2016 | 26,900.00                            | 59,136.00   |           | 86,036.00 | 430.40                   | 827.90      | 125.83          | 1,384.13 | 57.67    | 2,702.06 | 875.30         | 895.30                | 0.51             | 31.84                    | 1.55           |
| 07/07/2016 | 22,400.00                            | 62,266.00   |           | 84,666.00 | 368.40                   | 871.72      | 123.01          | 1,363.14 | 56.38    | 2,684.16 | 861.75         | 848.98                | 0.50             | 31.54                    | 1.59           |
| 08/07/2016 | 24,600.00                            | 63,920.00   |           | 88,520.00 | 393.60                   | 894.88      | 128.85          | 1,417.33 | 59.06    | 2,719.31 | 931.80         | 906.80                | 0.52             | 32.55                    | 1.56           |
| 09/07/2016 | 26,200.00                            | 58,694.00   |           | 84,894.00 | 419.20                   | 821.72      | 124.09          | 1,365.01 | 56.88    | 2,339.16 | 772.90         | 750.36                | 0.58             | 36.29                    | 1.82           |
| 10/07/2016 | 27,700.00                            | 61,742.00   |           | 89,442.00 | 443.20                   | 864.39      | 130.76          | 1,438.35 | 59.93    | 2,625.71 | 834.27         | 810.39                | 0.55             | 34.06                    | 1.77           |
| 11/07/2016 | 26,800.00                            | 60,050.00   |           | 86,650.00 | 426.60                   | 840.70      | 126.63          | 1,392.93 | 58.04    | 2,647.19 | 913.37         | 846.09                | 0.53             | 32.73                    | 1.65           |
| 12/07/2016 | 26,100.00                            | 61,318.00   |           | 87,418.00 | 417.60                   | 858.45      | 127.61          | 1,403.66 | 58.49    | 2,618.65 | 890.11         | 790.11                | 0.54             | 33.38                    | 1.78           |
| 13/07/2016 | 28,400.00                            | 68,210.00   |           | 96,610.00 | 454.40                   | 954.94      | 140.93          | 1,550.27 | 64.59    | 3,023.29 | 972.66         | 882.64                | 0.51             | 31.96                    | 1.76           |
| 14/07/2016 | 27,200.00                            | 66,021.00   |           | 93,221.00 | 436.20                   | 924.29      | 136.95          | 1,495.44 | 62.31    | 2,866.68 | 912.41         | 954.13                | 0.52             | 32.62                    | 1.57           |
| 15/07/2016 | 26,700.00                            | 66,225.00   |           | 92,925.00 | 427.20                   | 927.15      | 135.44          | 1,469.79 | 62.07    | 2,984.83 | 1,008.07       | 948.07                | 0.50             | 31.13                    | 1.57           |
| 16/07/2016 | 27,800.00                            | 61,932.00   |           | 89,532.00 | 441.60                   | 867.05      | 130.86          | 1,439.51 | 59.98    | 2,626.36 | 866.43         | 817.85                | 0.55             | 34.09                    | 1.76           |
| 17/07/2016 | 26,800.00                            | 59,381.00   |           | 86,981.00 | 426.60                   | 831.33      | 125.69          | 1,382.63 | 57.61    | 2,394.22 | 771.03         | 745.90                | 0.58             | 35.91                    | 1.85           |
| 18/07/2016 | 26,400.00                            | 59,715.00   |           | 86,115.00 | 422.40                   | 836.01      | 125.84          | 1,384.25 | 57.68    | 2,335.35 | 794.42         | 733.00                | 0.59             | 36.87                    | 1.89           |
| 19/07/2016 | 25,000.00                            | 60,773.00   |           | 85,773.00 | 400.00                   | 850.82      | 125.08          | 1,375.90 | 57.33    | 2,451.39 | 819.21         | 677.91                | 0.56             | 34.99                    | 2.03           |
| 20/07/2016 | 25,100.00                            | 56,134.00   |           | 81,234.00 | 401.60                   | 785.88      | 118.75          | 1,306.22 | 54.43    | 2,050.69 | 702.72         | 772.72                | 0.64             | 39.61                    | 1.69           |
| 21/07/2016 | 26,300.00                            | 59,625.00   |           | 85,925.00 | 420.80                   | 834.75      | 125.56          | 1,381.11 | 57.55    | 1,570.19 | 520.58         | 540.58                | 0.88             | 64.72                    | 2.55           |
| 22/07/2016 | 25,800.00                            | 51,340.00   |           | 77,140.00 | 412.80                   | 718.76      | 113.16          | 1,244.72 | 51.86    | 2,537.03 | 853.14         | 833.14                | 0.49             | 30.41                    | 1.49           |
| 23/07/2016 | 28,900.00                            | 52,151.00   |           | 81,051.00 | 482.40                   | 730.11      | 119.25          | 1,311.77 | 54.66    | 1,711.60 | 594.36         | 629.36                | 0.77             | 47.35                    | 2.08           |
| 24/07/2016 | 27,800.00                            | 42,290.00   |           | 70,090.00 | 444.80                   | 592.06      | 103.69          | 1,140.55 | 47.52    | 2,232.60 | 775.17         | 720.17                | 0.51             | 31.39                    | 1.58           |
| 25/07/2016 | 26,200.00                            | 41,382.00   |           | 67,582.00 | 419.20                   | 579.35      | 99.85           | 1,098.40 | 45.77    | 2,075.12 | 711.95         | 691.95                | 0.53             | 32.57                    | 1.59           |
| 26/07/2016 | 28,800.00                            | 50,850.00   |           | 79,650.00 | 460.80                   | 711.90      | 117.27          | 1,289.97 | 53.75    | 1,422.86 | 1,039.21       | 939.21                | 0.91             | 55.98                    | 1.37           |
| 27/07/2016 | 26,200.00                            | 46,006.00   |           | 72,206.00 | 419.20                   | 644.08      | 106.33          | 1,169.61 | 48.73    | 2,618.81 | 917.03         | 867.03                | 0.45             | 27.57                    | 1.35           |
| 28/07/2016 | 28,200.00                            | 50,901.00   |           | 79,101.00 | 451.20                   | 712.61      | 116.38          | 1,280.20 | 53.34    | 2,850.52 | 964.18         | 864.18                | 0.45             | 27.75                    | 1.48           |
| 29/07/2016 | 28,000.00                            | 49,053.00   |           | 76,053.00 | 448.00                   | 672.74      | 112.07          | 1,232.82 | 51.37    | 2,557.87 | 1,057.89       | 857.89                | 0.48             | 29.73                    | 1.44           |
| 30/07/2016 | 27,800.00                            | 49,315.00   |           | 76,915.00 | 441.60                   | 690.41      | 113.20          | 1,245.21 | 51.88    | 2,701.99 | 960.34         | 860.34                | 0.46             | 28.47                    | 1.45           |
| 31/07/2016 | 27,200.00                            | 45,895.00   |           | 73,095.00 | 435.20                   | 642.53      | 107.77          | 1,185.50 | 49.40    | 2,294.61 | 455.54         | 755.54                | 0.52             | 31.86                    | 1.57           |

Fuente: (Melendez, 2018)

De esta tabla podemos sacar los indicadores energéticos del Empresa Agroindustrial Pomalca.

Tabla 20  
*Indicadores Energéticos de la Empresa Agroindustrial Pomalca*

| kWh/t. Caña | t. Vapor/t. caña | t. Vapor/t. Bag. Cons. |
|-------------|------------------|------------------------|
| 30,55       | 0,49             | 1,49                   |

Fuente: (Melendez, 2018)

Con estos datos podemos obtener una relación de cuanta energía calorífica de la biomasa del bagazo se necesita para generar una tonelada vapor.

➤ Energía de la biomasa de bagazo:

**Energía de la biomasa = PCI x Peso de la biomasa (bagazo consumido)**

Donde:

- Bagazo cons.: 33,27% caña molida por día (Promedio)
- Caña molida al día: 3 000 toneladas (3 000 000 kg)
- PCI: 4 456 (kcal/kg)

Energía de la biomasa = 4 456(kcal/kg) x 33,27%(3 000 000 kg)

Energía de la biomasa = 4 447 533 600 kcal al día

Energía de la biomasa = 4 447 533 600 kcal x (4.184 kJ/kcal)

**Energía de la biomasa = 1,861 x 10<sup>10</sup> kJ al día**

Utilizando los índices energéticos de la Empresa agroindustrial Pomalca podemos hallar la energía eléctrica producida y la cantidad de vapor generado.

Tabla 21

Cantidad de Energía Eléctrica y vapor al día (Producido por bagazo)

| kWh al día | t. Vapor al día |
|------------|-----------------|
| 91 650     | 1 487,169       |

Fuente: Elaboración propia

Ahora podemos sacar nuevas relaciones como, por ejemplo:

Tabla 22

Relación (Energía Eléctrica/Vapor) y (Energía Calorífica/Vapor)

| kWh/t. Vap | kJ/t. Vap.            |
|------------|-----------------------|
| 61,627     | 1,251X10 <sup>7</sup> |

Fuente: Elaboración propia

Teniendo la relación de (Energía Eléctrica/t.Vapor) y (Energía Calorífica/t.Vapor) ya podemos encontrar cuanta energía podemos producir con la biomasa de RAC.

**Energía de la biomasa RAC = 3 352 513 680 kJ al día**

Podemos encontrar la cantidad de vapor generado y la Energía Eléctrica por la energía calorífica de la biomasa de RAC:

**Cantidad de vapor:** 267,929 Toneladas de vapor al día

**Energía eléctrica:** 16 511,712 kWh al día ó 16,512 MWh al día

Podemos calcular la energía eléctrica producida al año (365 días), y teniendo en cuenta la parada anual de producción de 45 días. Se consideró un valor de 320 días para el siguiente cálculo.

Energía eléctrica: 16,512 MWh x 320 días

**Energía eléctrica al año:** 5 283,748 MWh al año

## 5.2 Potencia instalada

Potencia instalada = Energía eléctrica/tiempo

Potencia instalada = 16,512 MWh/24 h

Potencia instalada = 0,687 MW

Potencia instalada = 687,988 kW

## 5.3 Evaluación económica del Proyecto

Para analizar la rentabilidad económica del proyecto se realiza un análisis a través de las variables económicas como: el valor actual neto (VAN), la tasa interna de rentabilidad (TIR) y el periodo de recuperación (PR).

### 5.3.1 Inversión.

Se consideran equipos y sistemas estándar para centrales térmicas de generación eléctrica, en lo posible se usarán diseños modulares pre armados en fábrica. El coste de una planta de biomasa puede variar sensiblemente en función de la tecnología empleada, el tipo de biomasa y la potencia instalada.

### 5.3.2 Valor Actual Neto (VAN).

$$VAN = -FC_0 + \sum_{i=1}^n \frac{FC_i}{(1+r)^i}$$

Siendo:

- VAN: Valor actual neto.
- $FC_0$ : Inversión inicial del proyecto.

- $FC_i$ : Flujo de caja anual.
- $r$ : Tasa de rentabilidad o tasa de descuento.
- $n$ : Número de años para estudio de la rentabilidad

$VAN > 0 \rightarrow$  el proyecto es rentable.

$VAN = 0 \rightarrow$  alcanzaremos el punto de equilibrio, es decir, que no obtendremos ni pérdidas ni ganancias.

$VAN < 0 \rightarrow$  el proyecto no es rentable.

### **5.3.3 Tasa Interna de Retorno (TIR).**

Este segundo criterio de valoración de rentabilidad lo que nos proporciona es la tasa que hace nulo el VAN; es decir, la tasa de interés que iguala la inversión inicial con los flujos de caja futuros esperados durante la duración del proyecto.

$$VAN = 0 \rightarrow -FC_0 + \sum_{i=1}^n \frac{FC_i}{(1+TIR)^i} = 0$$

### **5.3.4 Período de Recuperación (PR).**

Este tercer criterio de valoración de rentabilidad de inversión lo que nos proporciona es la duración mínima del proyecto para poder recuperar la inversión inicial a través de los sucesivos flujos de caja que nos vayan proporcionando a lo largo de su vida. A continuación, se muestran los resultados del VAN, TIR y PR se obtienen a partir de la tabla del flujo de caja anual elaborada a partir de la energía producida anualmente y los costos de energía facturados en kWh consumida.

### 5.3.5 Costo nivelado por energía (LCOE).

La metodología Costo Nivelado por Energía (LCOE, por sus siglas en inglés) es una herramienta muy usada para comparar tecnologías de generación renovable, que nos da el costo por kilowatt-hora que produce cualquier tipo de sistema de generación de electricidad, como la solar, de biomasa y la eólica.

Para el cálculo del LCOE se implementó la metodología de flujos anuales de costos y generación neta de energía en el periodo de vida útil del proyecto, mientras que la inversión es considerada como un desembolso realizado en el periodo inicial

$$\text{LCOE} = \frac{\text{Inversión} + \sum(\text{Costos} - \text{Otros Ingresos})}{\sum \text{Energía total}}$$

#### Datos a considerar:

- Para evaluar la rentabilidad tomamos como base los datos brindados por la empresa española Renovetec<sup>1</sup> y así poder tener una inversión estimada.
- Costo de energía según pliego tarifario MT3<sup>2</sup>.
- La inflación está dada por el Banco Central de Reserva (BCR).
- Tasa de descuento de 12%.
- Se considera un mantenimiento de 4% de la inversión inicial.
- Se considera una reducción de producción de energía de 0,8%.

---

<sup>1</sup> <http://energia.renovetec.com/centrales-de-ciclo-combinado/300-presupuesto-de-planta-de-biomasa>

<sup>2</sup> <https://www.osinergmin.gob.pe/Tarifas/Electricidad/PliegosTarifariosUsuarioFinal.aspx?Id=140000>

Tabla 23

*Datos para Evaluar la Rentabilidad*

| DATOS PARA CALCULO DE LA RENTABILIDAD             |                  |
|---|------------------|
| INVERSION ESTIMADA                                | S/. 6 374 414,56 |
| COSTO DE LA ENERGÍA SEGÚN EL PLIEGO TARIFARIO MT3 | S/. 0,2651       |
| POTENCIA DE LA ENERGIA DE BIOMASA INSTALADA kW    | 687,988          |
| AÑOS DE ESTUDIO                                   | 20               |
| INFLACIÓN SEGÚN EL BCR                            | 3,3%             |
| TASA DE DESCUENTO                                 | 12%              |
| MANTENIMIENTO Y OTROS                             | 4%               |
| REDUCCIÓN DE PRODUCCION DE ENERGÍA (0,8%)         | 0,992            |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 24

*Flujo de Caja*

| Año       | Precio venta<br>Venta-pliego<br>tarifario<br>(S/.kWh) | Producción<br>estimada de<br>energía<br>biomasa<br>(kWh) | Ingresos (S/.) | Seguridad y<br>mantenimiento<br>de la planta<br>biomasa (4%) | Flujo de Caja  |
|-----------|---|--|----------------|--|----------------|
| <b>0</b>  | 0,2651  |  |                |  | -6 374 414,557 |
| <b>1</b>  | 0,2738  | 5 283 747,954  | 1 446 945,395  | 263 390,81   | 1 183 554,585  |
| <b>2</b>  | 0,2829  | 5 241 477,971  | 1 482 737,036  | 272 082,706  | 1 210 654,33   |
| <b>3</b>  | 0,2922  | 5 199 546,147  | 1 519 414,019  | 281 061,436  | 1 238 352,584  |
| <b>4</b>  | 0,3019  | 5 157 949,778  | 1 556 998,245  | 290 336,463  | 1 266 661,782  |
| <b>5</b>  | 0,3118  | 5 116 686,179  | 1 595 512,153  | 299 917,566  | 1 295 594,587  |
| <b>6</b>  | 0,3221  | 5 075 752,69   | 1 634 978,742  | 309 814,846  | 1 325 163,896  |
| <b>7</b>  | 0,3327  | 5 035 146,668  | 1 675 421,576  | 320 038,736  | 1 355 382,84   |
| <b>8</b>  | 0,3437  | 4 994 865,495  | 1 716 864,804  | 330 600,014  | 1 386 264,79   |
| <b>9</b>  | 0,3551  | 4 954 906,571  | 1 759 333,172  | 341 509,815  | 1 417 823,357  |
| <b>10</b> | 0,3668  | 4 915 267,319  | 1 802 852,037  | 352 779,638  | 1 450 072,399  |
| <b>11</b> | 0,3789  | 4 875 945,18   | 1 847 447,385  | 364 421,366  | 1 483 026,019  |
| <b>12</b> | 0,3914  | 4 836 937,619  | 1 893 145,844  | 376 447,272  | 1 516 698,572  |
| <b>13</b> | 0,4043  | 4 798 242,118  | 1 939 974,699  | 388 870,032  | 1 551 104,668  |
| <b>14</b> | 0,4177  | 4 759 856,181  | 1 987 961,914  | 401 702,743  | 1 586 259,171  |
| <b>15</b> | 0,4314  | 4 721 777,331  | 2 037 136,139  | 414 958,933  | 1 622 177,206  |
| <b>16</b> | 0,4457  | 4 684 003,113  | 2 087 526,739  | 428 652,578  | 1 658 874,161  |
| <b>17</b> | 0,4604  | 4 646 531,088  | 2 139 163,8    | 442 798,113  | 1 696 365,687  |
| <b>18</b> | 0,4756  | 4 609 358,839  | 2 192 078,156  | 457 410,451  | 1 734 667,706  |
| <b>19</b> | 0,4913  | 4 572 483,968  | 2 246 301,401  | 472 504,996  | 1 773 796,406  |
| <b>20</b> | 0,5075  | 4 535 904,096  | 2 301 865,913  | 488 097,66   | 1 813 768,253  |

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, después de hacer un análisis económico a través del flujo de caja se presentan los resultados de las variables económicas, siendo el VAN positivo, el TIR mayor a la tasa de descuento y el PR no mayor a 6 años, podemos aceptar que el proyecto tiene una viabilidad económica.

| RESULTADOS |                  |
|------------|------------------|
| VAN        | S/. 3 411 458,25 |
| TIR        | 20 %             |
| PR         | 6 años           |

Para el cálculo del LCOE se usa los datos de la tabla N°24

| <b>Año</b>  | <b>Producción estimada de energía biomasa (kWh)</b> | <b>Seguridad y mantenimiento de la planta biomasa (4%)</b> |
|-------------|---|--|
| <b>0</b>    |   |  |
| <b>1</b>    | 5 283 747,954                                       | 263 390,81   |
| <b>2</b>    | 5 241 477,971                                       | 272 082,706  |
| <b>3</b>    | 5 199 546,147                                       | 281 061,436  |
| <b>4</b>    | 5 157 949,778                                       | 290 336,463  |
| <b>5</b>    | 5 116 686,179                                       | 299 917,566  |
| <b>6</b>    | 5 075 752,69  | 309 814,846  |
| <b>7</b>    | 5 035 146,668                                       | 320 038,736  |
| <b>8</b>    | 4 994 865,495                                       | 330 600,014  |
| <b>9</b>    | 4 954 906,571                                       | 341 509,815  |
| <b>10</b>   | 4 915 267,319                                       | 352 779,638  |
| <b>11</b>   | 4 875 945,18  | 364 421,366  |
| <b>12</b>   | 4 836 937,619                                       | 376 447,272  |
| <b>13</b>   | 4 798 242,118                                       | 388 870,032  |
| <b>14</b>   | 4 759 856,181                                       | 401 702,743  |
| <b>15</b>   | 4 721 777,331                                       | 414 958,933  |
| <b>16</b>   | 4 684 003,113                                       | 428 652,578  |
| <b>17</b>   | 4 646 531,088                                       | 442 798,113  |
| <b>18</b>   | 4 609 358,839                                       | 457 410,451  |
| <b>19</b>   | 4 572 483,968                                       | 472 504,996  |
| <b>20</b>   | 4 535 904,096                                       | 488 097,66   |
| <b>SUMA</b> | 98 016 386,303                                      | 7 297 396,172  |

Usaremos la siguiente formula:

$$LCOE = \frac{\text{Inversión} + \sum(\text{Costos} - \text{Otros Ingresos})}{\sum \text{Energía total}}$$

- Inversión: S/. 6 374 414,56
- $\sum(\text{Costos} - \text{Otros Ingresos})$ : Sera la suma de todos los costos de mantenimiento y seguridad de la planta de bimasa.
- Energía total: Energía total generada.

$$LCOE = \frac{6\,374\,414,56 + 7\,297\,396,172}{98\,016\,386,303}$$

$$LCOE = 0,139 \approx 0,14$$

Entonces el costo teórico de generar 1 kWh es S/. 0,14

#### 5.4 Huella de carbono

La huella de carbono es la medición de los gases de efecto invernadero (GEI) expresadas en kilogramos de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) que son liberados a la atmósfera como resultado de nuestras actividades cotidianas o la producción de un bien o servicio. Comprende todo el proceso de producción desde las materias primas hasta el tratamiento de los residuos. La medición de la huella de carbono personal o comercial permite identificar las principales fuentes de emisiones de CO<sub>2</sub>, diseñar programas efectivos de reducción y alcanzar mejoras ambientales, económicas y sociales. La eficiencia energética es la tecnología más importante para reducir la huella de carbono, porque si usamos eficientemente la energía, reducimos las emisiones de CO<sub>2</sub>. Los gases de efecto invernadero son producidos por el uso de combustibles fósiles (petróleo, gas, carbón, leña, etc.), siendo el dióxido de carbono, el principal contaminante que origina el incremento de la temperatura del planeta. (Ministerio de Energía y Minas (MINEM), s.f)

Para calcular las emisiones de CO<sub>2</sub> se emplea la siguiente fórmula directa:

$$\text{Emisiones (kg CO}_2\text{)} = \text{consumo de energía (un)} \times \text{factor de emisión (kg CO}_2\text{/un)}$$

Donde:

- Consumo de energía: Es la cantidad de energía eléctrica, gasolina, diésel, GLP, gas natural, leña, etc., expresado en sus unidades correspondientes: kWh, galones, kilogramos, metros cúbicos.
- Factor de emisión: Es un valor definido que expresa la cantidad de CO<sub>2</sub> emitido por cada unidad del combustible.

Tabla 25

*Emisiones de kg CO<sub>2</sub> eq /kWh Generados por cada uno de los Tipos de Generación Eléctrica en el Perú*

| TIPO DE GENERACIÓN ELECTRICA                | Kg CO <sub>2</sub> eq /kWh |
|---|----------------------------|
| Quema de carbón                             | 1,35                       |
| Gas natural, centrales de ciclo combinado   | 0,755                      |
| Gas natural, planta de energía convencional | 0,415                      |
| Quema de Petróleo                           | 1,29                       |
| Eólica, <1MW, en tierra                     | 0,0196                     |
| Eólica, 1-3 MW, en tierra                   | 0,0206                     |
| Quema de Biogás                             | 0,251                      |
| Energía producida por Biomasa               | 0,0525                     |
| Energía hidráulica                          | 0.00679                    |
| Energía fotovoltaica                        | 0.0831                     |

Fuente: (Vázquez, y otros, 2017)

#### FACTOR DE EMISIÓN DE CONSUMO ELÉCTRICO

|                     | Consumo anual | Unidades de medida física | Factor de emisión (Kg de CO <sub>2</sub> eq /kWh) |                               | Kg de CO <sub>2</sub> eq |
|---------------------|---------------|---------------------------|---|-------------------------------|--------------------------|
| <b>Electricidad</b> | 5 283 747,954 | kWh                       | 0,0525  | Kg de CO <sub>2</sub> eq /kWh | 277 396,768              |

Después del cálculo realizado se obtiene que se emite 277 396,768 kg de CO<sub>2</sub> eq por el consumo de 5 283 747,954 kWh de energía eléctrica en un año.

## CAPITULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1 CONCLUSIONES

Las conclusiones a las que se ha llegado en este proyecto de investigación se resumen a continuación:

- La cantidad de residuos agrícolas de cosecha que genera la Empresa Agroindustrial Pomalca es de 435 toneladas al día de las cuales solo la mitad serán aprovechados para la generación de energía Eléctrica.
- La energía calorífica que genera la biomasa de los residuos agrícolas de cosecha mediante el proceso de combustión en la Empresa Agroindustrial Pomalca es 3 352 513 680 kJ, lo cual resulta eficiente para una posible generación eléctrica.
- De acuerdo a la energía calorífica calculada, la cantidad de energía eléctrica que se puede generar por combustión de residuos agrícolas es de 16,512 MWh al día.
- Después de un análisis económico podemos determinar que la inversión para esta instalación es de S/. 6 374 414,56, a pesar del elevado costo de la instalación las variables económicas son positivas, las cuales son un valor actual neto (VAN) de S/. 3 411 458,25 y una tasa interna de rentabilidad (TIR) de 20%. La instalación del sistema resulta rentable a largo plazo, después de determinar el periodo de retorno de la inversión es de 06 años, donde al finalizar este tiempo la instalación nos permitirá ahorrar los costos por consumo de energía eléctrica.

## **6.2 RECOMENDACIONES**

Las recomendaciones que se proponen para una optimización del proyecto se mencionan a continuación:

- La Empresa Agroindustrial Pomalca tiene que dejar de quemar la caña de azúcar para no disminuir la cantidad de residuos agrícolas y así tener mayor cantidad de biomasa para la generación de energía eléctrica.
- La Empresa Agroindustrial Pomalca cuenta con una gran cantidad de hectáreas de sembríos de caña de azúcar la cual generan una gran cantidad de residuos agrícolas de cosecha y actualmente no cuenta con una gestión encargada de la correcta cosecha para el mayor aprovechamiento del RAC.

## BIBLIOGRAFIA

- Alderetes, C. (2016). *Calderas a Bagazo – Proyecto, operación y mantenimiento*. Argentina.
- Asociación de Empresas de Energías Renovables (APPA). (2009). ¿Que es la Biomasa? Obtenido de <https://www.appa.es/appa-biomasa/que-es-la-biomasa/>
- Assureira, E., & Assureira, M. (2013). Potencial Energético de la Biomasa Residual en el Perú. Obtenido de <http://conferencia2013.consortio.edu.pe/wp-content/uploads/2014/09/3.-Assureira.pdf>
- Bolsa de valores de Lima S.A.A. (BVL). (2014). *Memoria Anual 2014*. Obtenido de <https://www.bvl.com.pe/hhii/B08360/20160418173501/MEMORIA32322014.PDF>
- Bolsa de valores de Lima S.A.A. (BVL). (2016). *Detalle de las acciones implementadas por la sociedad*. Lima. Obtenido de <https://www.bvl.com.pe/eeff/B11067/20170404181702/RSB110672016AIA01.PDF>
- Calderas de tubos de agua*. (sf). Obtenido de [http://recursosbiblio.url.edu.gt/publicjlg/biblio\\_sin\\_paredes/fac\\_ing/Manu\\_cald/I/cap/03.pdf](http://recursosbiblio.url.edu.gt/publicjlg/biblio_sin_paredes/fac_ing/Manu_cald/I/cap/03.pdf)
- Castillo, A., & Solis, J. (2017). Análisis energético de la adición de residuos de cosecha al bagazo de caña de azúcar para la mejora del proceso de cogeneración en la industria azucarera: caso Agroindustrial Paramonga. (*Maestria*). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima-Perú.
- Dominguez, C., Bravo, H., & Sosa, R. (2014). Prevención, minimización y control de la contaminación ambiental en un ingenio azucarero de México. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*.
- EcuRed*. (s.f). Obtenido de [https://www.ecured.cu/Residuo\\_agr%C3%ADcola](https://www.ecured.cu/Residuo_agr%C3%ADcola)
- Energías Renovables-Energía Biomasa. (2008). Obtenido de [http://www.energia.gov.ar/contenidos/archivos/publicaciones/libro\\_energia\\_biomasa.pdf](http://www.energia.gov.ar/contenidos/archivos/publicaciones/libro_energia_biomasa.pdf)
- Gastañaduy, A., & Lozano, U. (2003). *Empresa Agroindustrial Pomalca S.A*. Obtenido de <http://jefas.esan.edu.pe/index.php/jefas/article/view/152/143>
- Henry, G. (2010). *Potencial de Cogeneración a partir de los Residuos Biomasicos de la Caña de Azúcar en el Perú*. Obtenido de [https://guzlop-editoras.com/web\\_des/ener01/biomasa/pld0243.pdf](https://guzlop-editoras.com/web_des/ener01/biomasa/pld0243.pdf)
- Landauro, K. (2016). Potencial Energético del Follaje de la Caña de Azúcar para su Aprovechamiento: caso Agroindustrial Paramonga S.A.A, Abril – Julio 2015 . (*Tesis de Pregrado*). Universidad Científica del Sur, Lima-Perú.
- León, T., Dopico, D., Triana, O., & Medina, M. (2013). Paja de la caña de azúcar. Sus usos en la actualidad. *Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar Cuba (ICIDCA)*, 13-22.

- Melendez, R. (2018). El bagazo y la Generación de Energía en Ingenios Azucareros. *CONEIMERA*. Lambayeque.
- Ministerio de Agricultura y Riego. (2017). *Producción de la caña de azúcar en el Perú, perspectivas*. Lima-Perú.
- Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca (MAGyP). (s.f). *La caña de azúcar como cultivo energético*. Obtenido de <http://www.cosechaypostcosecha.org/data/articulos/agoindustrializacion/La-Cana-De-Azucar-Como-Cultivo-Energetico.pdf>
- Ministerio de Energía y Minas (MINEM). (s.f). *La huella de carbono y la eficiencia energética*. Obtenido de <http://www.minem.gob.pe/giee/pdf/ficha-informativa-02-secundaria.pdf>
- Muñoz, M. (2017). Potencial de los Residuos Agrícolas de Cosecha de Caña de Azúcar, como un biocombustible. *ResearchGate*.
- Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (OSINERGMIN). (s.f). *Introducción a las energías renovables*. Obtenido de <http://www.osinergmin.gob.pe/empresas/energias-renovables/introduccion-energias-renovables/que-son-las-energias-renovables>
- OSINERGMIN. (s.f). *Biomasa*. Obtenido de <http://www.osinergmin.gob.pe/empresas/energias-renovables/biomasa/que-es-la-biomasa>
- Ramirez, M. (2008). *Cultivos para la producción sostenible de biocombustibles: Una alternativa para generación de empleos e ingresos*. Tegucigalpa.
- Reyes, J. (2003). La biomasa cañera como alternativa para el incremento de la eficiencia energética y la reducción de la contaminación ambiental. *Gale OnFile*.
- Serrato, C., & Lesmes, V. (2016). Metodología para el cálculo de energía extraída a partir de la biomasa en el departamento de Cundinamarca. (*Tesis de pregrado*). Universidad Distrital Francisco José Caldas, Bogotá-Colombia.
- solo ejemplos*. (2019). Obtenido de <https://www.soloejemplos.com/ejemplo-de-tipos-de-calderas/>
- Vázquez, I., Quispe, I., Rodríguez, B., Verán, D., Gilardino, A., & Ziegler, K. (2017). *Informe de identificación de emisiones de gases de efecto invernadero (GEIs) en subsectores del Perú y análisis del potencial de mitigación*. Lima. Obtenido de <http://red.pucp.edu.pe/ciclodevida/wp-content/uploads/2018/06/Reporte-inicial-de-identificaci%C3%B3n-de-emisiones-de-GEIs.pdf>
- VYC industrial*. (s.f). Obtenido de <https://vycindustrial.com/calderas-de-vapor-pirotubulares-y-acuotubulares/>

## ANEXOS

**Anexo 3: Turbogenerador 2 (Empresa Agroindustrial Pomalca)**



**Anexo 4: Turbogenerador 4 (Empresa Agroindustrial Pomalca)**



**Anexo 5: Calderas (Empresa Agroindustrial Pomalca)**

