

Diseño conceptual de una planta peletizadora a base bagazo de caña con capacidad de 500 Kg/h para un aprovechamiento energético.



Presentado por:

Autor: Pablo Cesar Uran Sinisterra.

Director: José Isidro Garcia Melo. PhD

Codirector: Ing. Juan Guillermo Ayalde Restrepo.

Trabajo de grado para optar por el título de
Ingeniero Mecánico

Escuela de ingeniería mecánica
Universidad del Valle
Octubre 2025

Resumen

El Grupo Agroindustrial Riopaila Castilla, ubicado en Pradera, Valle del Cauca, dentro de la cadena productiva es uno de los principales actores en la producción azucarera de Colombia. En un contexto global, la sostenibilidad y la búsqueda de energías renovables son prioritarias, por lo que el aprovechamiento de uno de los subproductos más abundantes del proceso de transformación de la caña como es el bagazo mediante la generación de pellets emergen como una alternativa valiosa y tentadora.

Este proyecto de grado se centra específicamente en la valorización del bagazo a través de su conversión en pellets, una forma compacta y eficiente de biomasa que puede ser utilizada como fuente de energía en diversas aplicaciones industriales. Para esto, se ha planteado como objetivo es diseñar conceptualmente una planta productora de pellets a base de bagazo de caña de azúcar con una capacidad de producción de 500 Kg/h para un aprovechamiento energético en el Grupo Agro industrial Riopaila Castilla.

El trabajo comienza con un análisis exhaustivo de las propiedades físicas y químicas del bagazo disponible en el ingenio, identificando las variables clave que afectan la calidad del pellet final, como la humedad, el tamaño de partícula y la composición química, entre otras. A partir de estos datos, se desarrollan cálculos basados en balances de masa y energía, que permiten determinar parámetros críticos como la cantidad de agua a evaporar, el requerimiento térmico y el flujo de biomasa a procesar. Estos resultados son fundamentales para la selección técnica de los equipos principales del proceso. Con base en ello, se propone un diseño detallado de la planta peletizadora, que contempla equipos especializados, sistemas de manejo de materiales y controles automatizados. El diseño incorpora un enfoque modular, permitiendo la adaptabilidad a diferentes escalas de producción y a las condiciones específicas del lugar.

Al centrarse en la producción de pellets de alta calidad, este proyecto no solo contribuye al aprovechamiento eficiente del bagazo de caña en Riopaila Castilla, sino que también impulsa la generación de biomasa como una alternativa energética sostenible. Esto alinea al ingenio con las tendencias actuales hacia una economía circular y el uso de energías renovables.

Palabras Claves: Pellets, Sostenibilidad, energías renovables.

Índice general

Resumen	I
Lista de figuras	V
Lista de tablas	VII
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1. DEFINICIÓN DEL PROYECTO	1
1.1.1. Planteamiento del problema	1
1.2. OBJETIVOS DEL PROYECTO	3
1.2.1. Objetivo General	3
1.2.2. Objetivos Específicos	3
1.3. ESTADO DEL ARTE	3
CAPÍTULO 2: MARCO METODOLÓGICO	6
2.1. METODOLOGÍA DEL PROYECTO	6
2.1.1. FASE 1	6
2.1.2. FASE 2	7
2.1.3. FASE 3	7
2.1.4. FASE 4	7
CAPÍTULO 3: MARCO TEÓRICO	9
3.1. Bagazo	9
3.2. Energías renovables	10
3.3. Biomasa	10
3.3.1. Biomasa natural	11
3.3.2. Biomasa residual	11
3.4. Pellets	12
3.5. Ecuaciones	12
3.5.1. Balance de masa y energía.	12
3.6. Normativa estándar de calidad de pellets	13
3.6.1. Finos	13
3.6.2. Durabilidad mecánica	14
3.6.3. Densidad a granel	14
3.6.4. Humedad	14
3.6.5. Cenizas	15
3.6.6. Poder calorífico	15

3.7. Modelado Funcional usando IDEF0	15
CAPÍTULO 4: Requerimientos	17
4.1. Requerimientos de elaboración de Pellets	17
4.2. Normas de Producción De Pellets	19
4.3. Requerimientos Normativos	20
CAPÍTULO 5: Arquitectura funcional de la planta piloto basada en un modelo funcional IDEF0	22
5.1. Aplicación del modelo IDEF0 en el diseño funcional de la planta	22
5.2. APLICACIÓN DE IDEF0 EN LA PLANTA PILOTO	23
5.2.1. Diagrama de Nivel A-0: Funciones Generales	23
5.2.2. Diagrama de Nivel A0: Descomposición Funcional del Sistema	24
5.2.3. Diagrama A1: Preparación del Material para Peletización	25
5.2.4. Diagrama A2: Preparación de mezcla	27
5.2.5. Diagrama A3: Compactación	28
5.2.6. Diagrama A4: Almacenamiento	29
CAPÍTULO 6: Determinación por valoración Tecnológicas Basadas en requerimientos Funcionales	31
6.1. Balance de masa	32
6.2. Balance de vapor	37
6.3. Consumo Energético	39
6.4. Selección tecnológica de los componentes funcionales	40
6.4.1. Secador de bagazo	40
6.4.2. Picador de bagazo	42
6.4.3. Mezcladora	44
6.4.4. Peletizadora	45
6.4.5. Tamizadora	47
6.4.6. Empacadora	48
6.5. Matriz de cumplimiento	50
6.6. Representación gráfica de la solución propuesta.	52
6.6.1. Matriz IDEF0 de la solución propuesta	52
6.6.2. Esquema funcional propuesto	53
6.6.3. Layout de la planta propuesta	54
CAPÍTULO 7: Estimación de costos de la solución propuesta	56
7.1. Costos	56
7.1.1. Estimación de costos de equipos principales	56
7.1.2. Estimación de costos de equipos secundarios	57
7.1.3. Estimación de costos de la energía eléctrica	58
7.1.4. Estimación de costos de personal operativo.	59
7.1.5. Estimación de costos de insumos.	59
7.1.6. Estimación de costos Totales.	60
CAPÍTULO 8: Conclusiones y trabajos futuros	61
8.1. Conclusiones	61
8.2. Trabajos Futuros	62

Lista de figuras

1.1. consumo mundial [3].	2
1.2. Árbol del problema del proyecto	3
1.3. Emisiones de gases efecto invernadero por sectores [7].	4
2.4. Metodología general del proyecto.	8
3.5. Bagazo [10]	9
3.6. Proceso de generacion de biomasa [12]	10
3.7. Biomosas [14]	11
3.8. Balance de masa proceso de secado [16].	13
3.9. Finos [6].	14
3.10. Durabilidad mecánica	14
3.11. Caracterización densidad	15
4.12. Proceso propuesto para la producción de Pellets a partir de bagazo de caña de azúcar. Autor: Propia	17
4.13. Normativa estándar de calidad de pellets [6].	20
5.14. Nodo A-0, Matriz IDEF0. Autor: Propio.	23
5.15. Nodo A0, Descomposición funcional del sistema. Autor: Propio.	25
5.16. Nodo A1, Descomposición funcional para la preparación del material. Autor: Propio.	26
5.17. Nodo A2, Descomposición funcional para la preparación de la mezcla.	27
5.18. Nodo A3, Compactación de la mezcla.	28
5.19. Nodo A4, Descomposición funcional para la disposicion final del proceso de peletizado.	30
6.20. Balance de materia de la capacidad de bagazo del ingenio.	33
6.21. Nodo. Desmedulado de bagazo condición inicial	34
6.22. Nodo. Caldera DZ	35
6.23. Nodo. Bodega antigua de bagazo	36
6.24. Balance y distribución de vapor. Autor: Propio.	38
6.25. Consumo energético del ingenio.	39
6.26. Secador de bagazo DLHG-2010.	42
6.27. Matriz de decisión picador de bagazo.	43
6.28. Picador de bagazo FSJ-2X600x600	44
6.29. Mezclador de bagazo y aditivo doble cinta MX-MX2350	45
6.30. Matriz selección peletizadora.	46
6.31. Peletizadora de biomasa MZLH420	47
6.32. Tamizadora de pellets TS150.	48
6.33. Empacadora de pellets DSC-50W.	49
6.34. Arquitectura funcional de la solución propuesta.	52
6.35. Esquema funcional del sistema de peletizado propuesto.	53

6.36. Layout de la planta propuesta.	55
--	----

Índice de cuadros

6.1. Matriz de selección secador de bagazo.	41
6.2. Matriz de decisión secador de bagazo.	41
6.3. Matriz de selección secador de bagazo.	43
6.4. Matriz de selección para la selección de la mezcladora de bagazo.	44
6.5. Matriz de decisión para la selección de la mezcladora de bagazo.	45
6.6. Matriz de decisión para la peletizadora de bagazo.	46
6.7. Matriz de decisión para la tamizadora de pellets.	47
6.8. Matriz de selección para la tamizadora de pellets.	48
6.9. Matriz de decisión para la empacadora de pellets.	49
6.10. Matriz de selección para la empacadora de pellets.	49
6.11. Matriz de cumplimiento.	51
7.12. Costos de equipos principales.	57
7.13. Costos de equipos secundarios.	58
7.14. Costos en energía eléctrica.	58
7.15. Costos en personal operativo.	59
7.16. Costos de insumos para la producción.	59
7.17. Costos Totales.	60

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

En este capítulo se exponen las bases del presente trabajo de grado. Inicialmente se presenta la definición del proyecto, donde se formula el problema. Esta definición, se sintetiza por medio de los árboles del problema como en la Figura 1.2. Luego, se definen los objetivos (Sección 1.2). Y, por último, se realiza una revisión del estado del arte, donde se exhiben las deficiencias de las soluciones actuales y se refuerza la pertinencia del proyecto.

1.1. DEFINICIÓN DEL PROYECTO

1.1.1. Planteamiento del problema

Segun las estadísticas, la mayor fuente de energía son generalmente devidados de los combustibles fósiles, los efectos de su extracción, refinación, distribución y uso ha generado múltiples consecuencias en el medio ambiente y en el entorno que le rodea [1]. Contrariamente, en Colombia la producción de energía proviene principalmente de las plantas hidroeléctricas. Gracias a la abundancia de agua en la mayor zona del país, y en un segundo lugar se utiliza como fuente de energía los combustibles fósiles como los es el carbón, petróleo, gas, etc. Este escenario expone el potencial energetico nacional al hecho que las reservas ya se están agotando o erradicando debido a su mala relación con el medio ambiente, es decir, cuando los combustibles fósiles generan combustión, liberan dióxido de carbono y otros gases, produciendo así el efecto invernadero que a su vez atrapan todo el calor liberado dentro de nuestra atmósfera [2], lo que los poseciona en los principales responsables del calentamiento global, cambio climático, y problemas de salud generados.

Adicionalmente, el rápido aumento de la población y la demanda energética para diversas actividades humanas han resultado en un incremento del consumo energético global en sus fuentes primarias. Para el año 2012, el consumo mundial de energía a partir de distintas fuentes como petróleo, gas natural, carbón mineral, energía nuclear, energía hidroeléctrica y fuentes renovables alcanzó aproximadamente 12,470 millones de toneladas equivalentes de petróleo (tep), lo que equivale aproximadamente a 50×10^{18} julios. De este total, entre un 80 y un 85 % provino directamente de combustibles fósiles [3].

Específicamente, La utilización principal de fuentes primarias de energía en el mundo se concentra mayormente en los combustibles fósiles tradicionales, como el petróleo, el gas natural y el carbón. Estos tres recursos representan el 85,5 % del consumo global de energía, mientras que la energía nuclear contribuye con un 4,5 %, la hidroelectricidad con un 6,9 % y las fuentes de energía renovable no convencionales apenas suponen el 3,2 % del total BP 2017 (ver figura 1.1) [3].

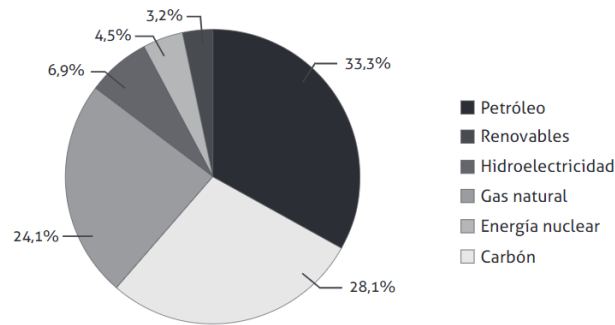


Figura 1.1: consumo mundial [3].

Por otro lado, los ingenios azucareros han optado como fuente principal el uso de la fibra de bagazo como biocombustible para generar el vapor necesario para el funcionamiento de la planta y a su vez para cogenerar. El incremento en la producción en las industrias azucareras genera un gran porcentaje de bagazo, en la cual aumenta notablemente el desperdicio de la misma, Este bagazo de caña se almacena afuera de la fabrica ocupando un gran espacio ocasionando un problema de almacenamiento y contaminación, ya que esto residuos son expuestos al aire libre para su descomposición natural y facilidad de transporte con empresas compradoras de bagazo, por lo dicho anteriormente los ingenios azucareros están enfocados en la búsqueda de nuevas alternativas de fuentes de energía como lo es el aprovechamiento de energías renovables en base de bagazo de caña [4].

En este contexto, La implementación de pellets, que consiste en la compactación de fibras de bagazo con la ayuda de aglomerantes, con baja humedad y alto poder calorífico, el uso de este tipo de biomasa es una propuesta multipropósito, ya que abarca soluciones desde la emisión de gases hasta la facilidad de mantenimiento a la caldera. Es decir, que debido a su alto poder calorífico mayor es la producción de energía y a su vez disminuye la emisión de gases [5]. Al generar combustión con pellets disminuye el mantenimiento en la caldera debido a que el porcentaje de inquemados reduce y a su vez disminuye el residuo de cenizas exponencialmente, así mismo el aumento económico es notable debido al alto residuo de fibra de bagazo que son producidos, dando paso a la comercialización y exportación de este tipo de biomasa aprovechando la fuerte demanda generada en la unión europea cumpliendo la normativa sobre la calidad de producción de pellets ISO 17225 [6].

En este contexto, esta propuesta se centra en el diseño de una planta peletizadora para bagazo de caña para el aprovechamiento energético de la fibra resultante de un proceso azucarero. Para esto, se estimula las condiciones de borde como lo es el flujo masico de aire y vapor necesarios para reducir la humedad del bagazo hasta un 13-15 %, eficiencia de combustión de la caldera 5 para la selección del secador para que funciones a las condiciones dadas, posteriormente se realiza pruebas de peletización para la corroboración de cálculos, una vez obtenido los resultados teóricos y experimentales se comprueba su combustión.

En consecuencia, el principal reto del ingenio GRUPO AGROINDUSTRIAL RIOPAILA CASTILLA es el aprovechamiento energético del subproducto resultante de la molienda de la caña de azúcar implementado una nueva alternativa generadora de energía y producto de exportación.

Por último, la figura 1.2 presenta un resumen gráfico de lo expuesto anteriormente descrito en un arbol del problema.

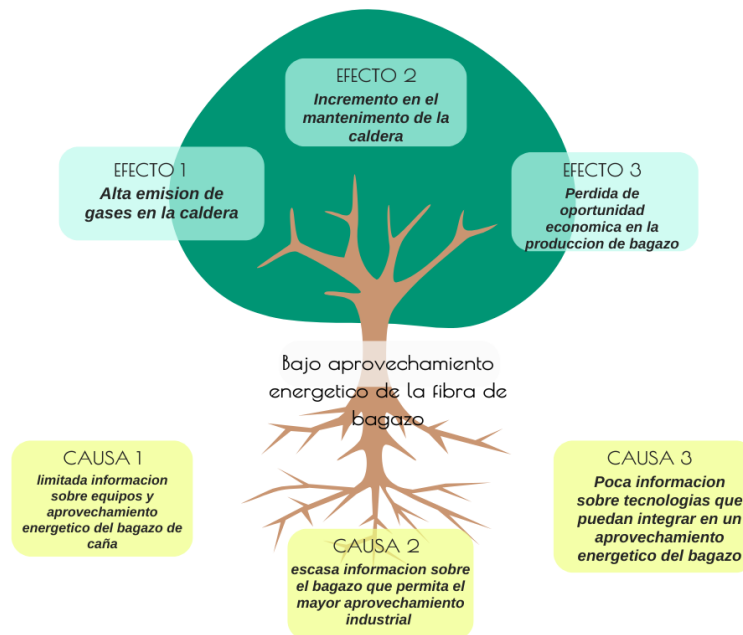


Figura 1.2: Árbol del problema del proyecto

1.2. OBJETIVOS DEL PROYECTO

1.2.1. Objetivo General

Diseñar conceptualmente un planta productora de pellets a base de bagazo de caña de azúcar con una capacidad de producción de 500 Kg/h para un aprovechamiento energético.

1.2.2. Objetivos Específicos

1. Definir los requerimientos de la planta de aprovechamiento energético basado en análisis de referencia y experimentación.
2. Especificar la arquitectura funcional de la planta piloto basado en la referencia IDEF.
3. Especificar las tecnológica de las componentes funcionales de la estructura basado en parámetros técnicos y económicos.
4. Estimación general de costos de la solución propuesta.

1.3. ESTADO DEL ARTE

El empleo de biocombustibles tiene sus orígenes en el momento en que los seres humanos descubrieron el fuego, utilizando madera tanto para cocinar alimentos como para generar calor; A principios del siglo XX, Rudolf Diesel inventó el motor de combustión interna y desarrolló un prototipo que

podía operar con aceite de maní. Sin embargo, con el aumento de la disponibilidad y la reducción de costos del petróleo, así como los mejores resultados que ofrecían los combustibles fósiles para el desarrollo de motores diésel, estos combustibles ganaron más prominencia. [7]

En 1970, los biocombustibles ganaron mayor importancia como resultado de un déficit en el suministro de petróleo, que surgió a raíz de tensiones entre países árabes e Israel. A medida que el siglo XX llegaba a su fin, diversas preocupaciones, tales como el cambio climático, la disminución de los recursos fósiles y el impulso por alcanzar la sustentabilidad energética, entre otros factores, motivaron el desarrollo de los biocombustibles. (ver figura 1.3) [7]

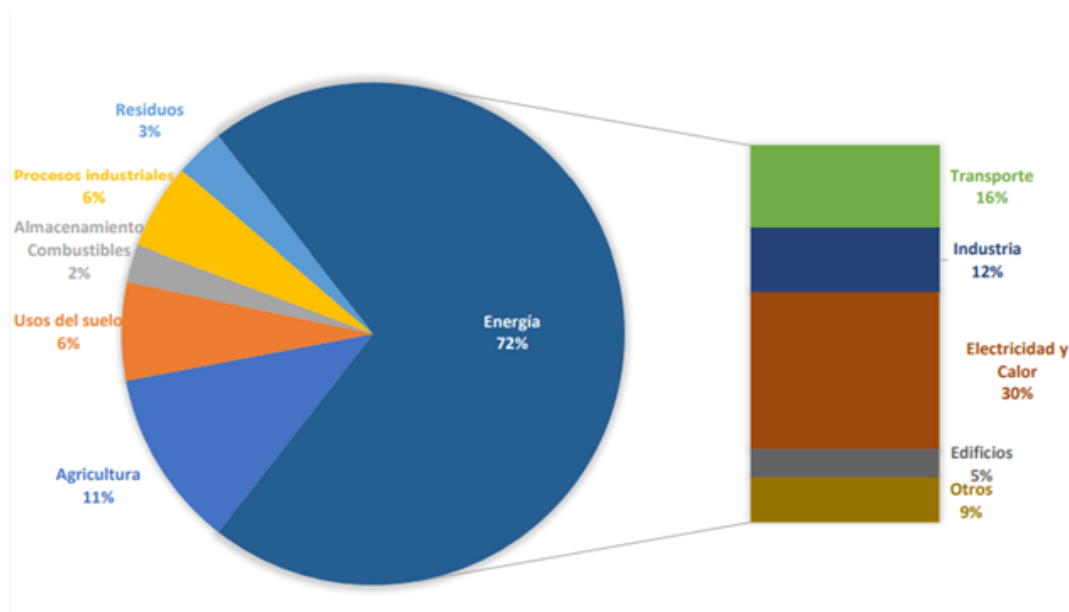


Figura 1.3: Emisiones de gases efecto invernadero por sectores [7].

Por tal razón el principal reto de la industria era el aprovechamiento de la energía renovable como el bagazo, debido a la creciente preocupación por el efecto invernadero y la necesidad de reducir la emisión de gases; Por lo tanto, el origen del pellet se remonta al siglo XIX, cuando el ingeniero alemán Friedrich Wilhelm Föster inventó las "pastillas de madera", utilizadas para calentar locomotoras a vapor y otras máquinas. Inicialmente, se fabricaban principalmente con madera residual de la industria forestal, pero luego se empezaron a utilizar otros materiales y subproductos industriales.

A finales del siglo XIX, se desarrollaron las primeras prensas para producir pequeñas bolitas de madera, empleadas como combustible en hornos y cocinas de casas rurales europeas. En el siglo XX, los científicos descubrieron que el pellet podía sustituir a los combustibles fósiles como carbón o petróleo, lo que aumentó su uso gradualmente [3].

Durante los años 20 y 30, se mejoró la calidad del pellet con tecnologías como el prensado a presión hidráulica y la separación por tamizado. En los años 50, Alemania y Austria empezaron a utilizarlo para calefacción doméstica, lo que incrementó su popularidad. Durante los años 70, se desarrollaron combustibles sólidos más eficientes, como pellets fabricados con aserrín, astillas de madera y cáscaras de almendras trituradas. En las décadas siguientes, su uso creció debido a su bajo coste y su impacto ambiental reducido, especialmente para calefacción doméstica en Europa Occidental y Estados Unidos [8].

En los años 1990, el pellet se convirtió en un producto internacionalmente reconocido, con mejoras en producción y calidad. Recientemente, su uso ha aumentado gracias a avances tecnológicos que permiten su producción más limpia y eficiente, así como a su creciente demanda en diversos sectores.

Hoy en día, el pellet es una opción popular para calefacción doméstica y también se usa en industria y agricultura. Además, algunos países ofrecen subvenciones para fomentar su uso. En la industria, las plantas termoeléctricas que lo utilizan generan energía limpia y sostenible, contribuyendo a reducir las emisiones y satisfacer las necesidades energéticas; Actualmente el pellet es una opción atractiva para muchas personas que buscan un combustible económico y limpio para calentar sus hogares. El pellet se ha convertido en un combustible cada vez más popular debido a sus ventajas sobre otros combustibles como el gas natural o el carbón: es barato, limpio, fácil de usar y eficiente energéticamente hablando. Su uso está extendiéndose cada vez más por toda Europa gracias a sus numerosas ventajas.

el pellet ha sido ampliamente utilizado en la industria para producir energía limpia y sostenible. Las plantas termoeléctricas que utilizan pellets son capaces de generar grandes cantidades de electricidad sin emitir grandes cantidades de dióxido de carbono u otros gases nocivos a la atmósfera. Esta tecnología ha permitido que muchas empresas reduzcan sus emisiones al mismo tiempo que producen energía limpia para satisfacer las necesidades energéticas del mundo moderno [8].

En síntesis, el uso de biocombustibles, como los pellets, ha evolucionado desde sus inicios en el siglo XIX hasta convertirse en una solución moderna y eficiente para la generación de energía limpia. Inicialmente utilizados para calefacción, los pellets ganaron relevancia durante las crisis energéticas del siglo XX y, gracias a avances tecnológicos, se han consolidado como una alternativa económica y sostenible a los combustibles fósiles. Hoy en día, su aplicación se extiende desde la calefacción doméstica hasta la producción de energía en plantas termoeléctricas, contribuyendo a la reducción de emisiones y a la transición hacia fuentes de energía renovable.

CAPÍTULO 2: MARCO METODOLÓGICO

En este capítulo se presentan los métodos utilizados durante el desarrollo conceptual de la planta de pelletizado. Iniciando presentando la metodología general del proyecto

2.1. METODOLOGÍA DEL PROYECTO

Para lograr un desarrollo óptimo, ordenado, eficiente y claro del proyecto es necesario plantear una metodología de trabajo compuesta de una serie de actividades generales y específicas en orden secuencial para dar una correcta finalización al proyecto.

2.1.1. FASE 1

Definir los requerimientos de la planta de aprovechamiento energético basado en análisis de referencia y experimentación.

Actividad 1.1: Búsqueda bibliográfica sobre los requerimientos de una plantas térmicas, producción de pellets, balances de masa y energía.

Actividad 1.2: Estimación de las condiciones de borde que intervienen en el proceso de pelletizado y el respectivo planteamiento de las ecuaciones de gobierno, definición de criterios y límites.

Actividad 1.3: Experimentar y verificar la producción de pellets con diferentes prototipos de materia prima.

Actividad 1.4: Una vez obtenido el pellet de bagazo, este debe ajustarse a las características que los clasifican. Para considerar la calidad de los pellets de biomasa, las normas como plantean y cuales deben ser sus dimensiones más importantes.

Entregable 1: Sumario de requerimientos de una planta de aprovechamiento energético, basada en análisis y experimentación. Esto incluirá la formulación de ecuaciones de gobierno, validación experimental y capacidad para ajustar la calidad de los pellets según normativas (Ver capítulo 4).

2.1.2. FASE 2

Estructura funcional de la planta piloto

Actividad 2.1: Proponer una configuración energética para la producción de pellets

Actividad 2.2: Pre-dimensionar equipos de producción para pellets.

Actividad 2.3: Verificar la viabilidad de la planta de peletizado pre-dimensionada para satisfacer las condiciones de producción.

Entregable 2: Propuesta de la estructura funcional de la planta, identificando el pre-dimensionamiento de equipos de producción y la verificación de la viabilidad de la planta pre-dimensionada para satisfacer las condiciones de producción (Ver capítulo 5).

2.1.3. FASE 3

Valoración tecnológica de las componentes funcionales de la estructura basado en parámetros técnicos y económicos.

Actividad 3.1: Elaboración de simulación del proceso de peletizado.

Actividad 3.2: Análisis preliminar de resultados

Actividad 3.3: Modificación del dimensionamiento a través de un proceso iterativo de la planta de peletizado.

Entregable 3: Modelo tecnológico de la configuración propuesta basada en el análisis de la información generada por las respectivas simulaciones del proceso de peletizado, un análisis preliminar de los resultados obtenidos y la modificación iterativa del dimensionamiento de la planta de peletizado para optimizar su rendimiento técnico y económico (Ver capítulo 6).

2.1.4. FASE 4

Estimación general de costos de la solución propuesta.

Actividad 4.1: Realizar análisis y estimación de costos por equipos de la planta peletizadora propuesta.

Actividad 4.2: Realizar análisis y discusión final de resultados.

Actividad 4.3: Redacción del documento de proyecto de grado

Entregable 4: Estimación de costos por equipos específicos de la planta, así como la realización de un análisis y discusión final de los resultados obtenidos (Ver capítulo 7).

Finalmente, la Figura 2.4 sintetiza la metodología descrita anteriormente para el proyecto.

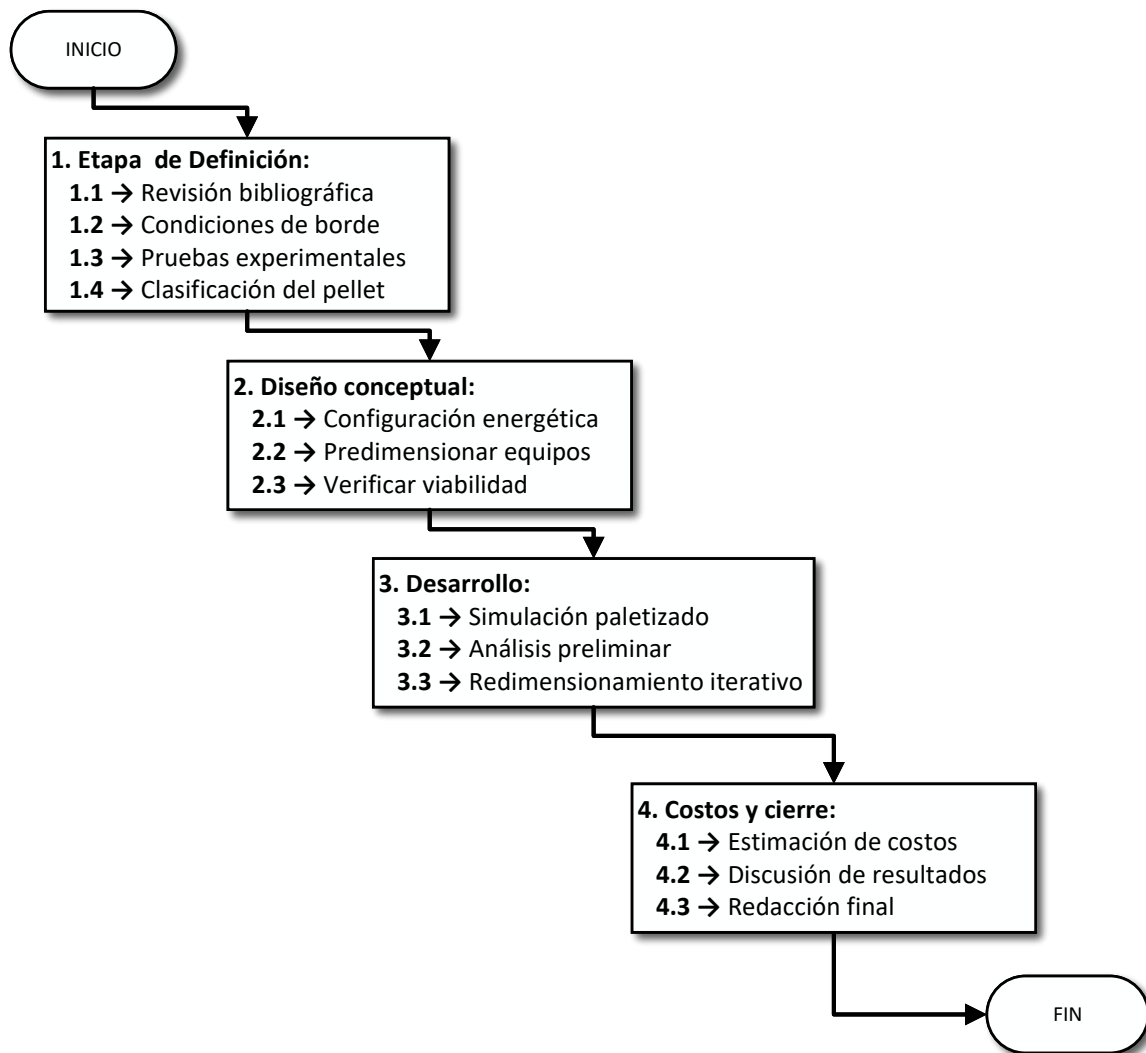


Figura 2.4: Metodología general del proyecto.

CAPÍTULO 3: MARCO TEÓRICO

Con la intención de contextualizar al lector a continuación se procede a realizar la descripción y definición de los temas principales que competen a la realización de este proyecto, tales como la materia prima, el producto planteado y la descripción formal de las expresiones formales que permiten soportar la solución planteada.

3.1. Bagazo

El bagazo es el producto resultante de la molienda de caña de azúcar en las industrias azucareras o trapiches, el cual se emplea fundamental como combustible en las calderas generadoras de vapor, destilación de alcohol, papel, concentración, entre otros (ver figura 2.3)[9]. Esta fibra orgánica consta de partículas de diversos tamaños que experimentan una descomposición rápida y a su vez posee diversas propiedades tales como una buena retención de humedad, adecuada aireación, baja densidad, pH ácido, un contenido variable de sales solubles y constituido principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina y representa aproximadamente entre el 25 y 50 % del total de materia procesada [10].



Figura 3.5: Bagazo [10]

El bagazo de caña de azúcar es un material higroscópico que absorbe o libera humedad dependiendo del estado higrotérmico del aire. El agua presente en su estructura fibrosa tiende a equilibrarse con las condiciones ambientales, principalmente la temperatura y la humedad relativa. Por lo tanto, para cada combinación de humedad relativa y temperatura del aire existe un contenido de humedad en el bagazo conocido como Humedad de Equilibrio Higroscópico (HEH), que representa el punto en el cual el bagazo no gana ni pierde humedad con respecto al ambiente.

3.2. Energías renovables

El crecimiento demográfico junto con el acelerado proceso de industrialización han intensificado la demanda energética; es decir el sistema eléctrico es fundamental para el desarrollo socio económico de un país [11], según la asociación española de la industria eléctrica (UNESA) las energías renovables son aquellas energías que utilizan recursos no agotables temporalmente, en conclusión se denomina energías renovables aquellas fuentes de energía que utilizan cualquier recurso natural de origen no fósil ni nuclear [12].

Este tipo de energía, además de ser considerada una fuente renovable, presenta un menor impacto ambiental en comparación con los combustibles fósiles como el petróleo y el carbón. Su utilización contribuye significativamente a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, lo que favorece el cumplimiento de los compromisos internacionales establecidos en el Protocolo de Kioto; las energías renovables más estudiadas son: la biomasa, la energía solar, la geotérmica, la eólica y la energía de mareas.

3.3. Biomasa

Se define como biomasa al conjunto de materia orgánica originada por un proceso biológico, en el contexto energético se denomina biomasa a una fuente de energía renovable que consiste en la utilización de la materia orgánica formada por vía biológica (ver figura 3.6) [13].

La biomasa es el tipo de materia en la que la radiación solar ha reducido el hidrógeno y el carbono mediante el proceso de la fotosíntesis, permitiendo así no solo el aprovechamiento de tipo químico-industrial si no también el energético [4].

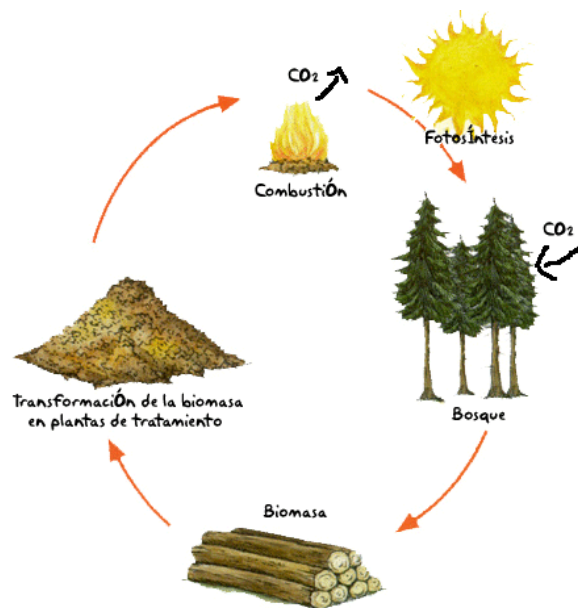


Figura 3.6: Proceso de generación de biomasa [12]

La combustión de biomasa no contribuye al aumento del efecto invernadero porque el carbono que

se libera forma parte de la atmósfera actual (es el que absorben y liberan continuamente las plantas durante su crecimiento) y no del subsuelo, capturado en épocas remotas, precisamente como el gas o el petróleo.

La energía que contiene la biomasa es energía solar almacenada a través de la fotosíntesis, proceso por el cual algunos organismos vivos, como las plantas, utilizan la energía solar para convertir los compuestos inorgánicos que asimilan (como el CO_2) en compuestos orgánicos [12].

Existen varios tipos de biomasa, según su procedencia, siendo unos más abundantes y presentes que otros, como:

3.3.1. Biomasa natural

Es aquel tipo de biomasa de origen biológico producido por entornos naturales como son los bosques. Son los restos de poda o tala controlada. Esta recogida implica el reciclaje de estos restos para el uso de calefacción, de lo contrario esto sería pasto de incendios. Como por ejemplo la leña.

3.3.2. Biomasa residual

Es aquella que procede de las acciones del hombre. De actividades agrícolas, ganaderas o la industria maderera. Estos restos en lugar de desecharlos son procesados para crear combustible así como se muestra en la figura 3.6; sus costos de producción son bajos y cuenta con alto poder calorífico, un ejemplo de este tipo de biomasa con los pellets, las briquetas, las cáscaras de almendra, y residuos agrícolas de la industria [14].



Figura 3.7: Biomosas [14]

El uso de la biomasa como recurso energético, en lugar de los combustibles fósiles, supone unas ventajas medioambientales, como son:

- Disminución de las emisiones de azufre y de partículas.
- Emisiones reducidas de contaminantes como CO , HC y NOX .

- Ciclo neutro de CO₂, sin contribución al efecto invernadero.
- Reducción del mantenimiento y de los peligros derivados del escape de gases tóxicos.
- Mejora socio-económica para las áreas rural

3.4. Pellets

El proceso de paletización se define como la aglomeración de una biomasa en partículas más grandes o pellets, mediante esfuerzos mecánicos, presión, calor y humedad. Los pellets son utilizados como biocombustible sólido realizado usualmente con biomásas lignocelulósicas como residuos de madera y agrícolas, de geometría cilíndrica, obtenido a partir de la extrusión de biomásas como virutas, aserrín, bagazo, entre otros como se puede observar en la figura 3.7.

La manufactura de estos puede comprender diferentes etapas de compresión, adición de calor y humedad de medio de vapor, agua o algún tipo de aglomerantes, zaranda y enfriamiento; buscando obtener las mejores propiedades respecto a la calidad del producto, medidas como la durabilidad mecánica, dureza, humedad, porcentaje de cenizas, poder calorífico, entre otros [15].

3.5. Ecuaciones

Para el diseño de una planta peletizadora es necesario utilizar algunas ecuaciones para facilitar su realización, de dicho modo todas las ecuaciones que se muestran a continuación han sido obtenidos del libro calderas a bagazo [16].

3.5.1. Balance de masa y energía.

El balance de masa y energía se refiere a la primera ley de termodinámica o la ley de la conservación de la energía. El tema de balance de masa y materia es un tema de ámbito general pero aquí se centrará especial mente a la aplicación de esta ley al proceso físico-químico que ocurren en sistemas de la industria azucarera, en este caso fundamentalmente el balance de masa y energía es la determinación cualitativa y cuantitativa de los requerimientos de materiales y de energía involucrados en el proceso industrial, en la cual es el primer paso para el diseño de plantas industriales, es también una herramienta para el control y diagnóstico de la operación de los procesos productivos [17].

En conclusión, un balance de masa o de energía es una secuencia de cálculos que permite llevar la cuenta de toda sustancia que interviene en el proceso de transformación, las sustancias pueden entrar, salir, reproducirse o consumirse en el proceso; por ejemplo el balance de masa y energía necesario para reducir la humedad del bagazo saliente de molinos con una humedad inicial de 50 % y a un 13 % de humedad final, se procede:

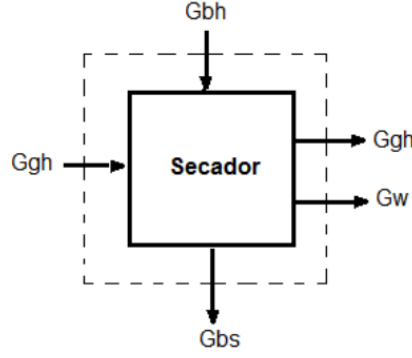


Figura 3.8: Balance de masa proceso de secado [16].

$$\text{Balance de masa: } G_{bh} + G_{gh} = G_{bs} + G_{gh} + G_w \quad (3.1)$$

Donde: G_{bh} , G_{bs} son los flujos de bagazo húmedo y seco respectivamente [kg/h], G_{gh} es el flujo de gases húmedos de combustión [kg/h], G_w es el flujo de agua evaporada [kg/h] [16].

3.6. Normativa estándar de calidad de pellets

La norma ISO 17225 es el estándar internacional para la comercialización de biocombustibles sólidos. Esta establece los valores mínimos de las propiedades físico-mecánicas y químicas de estos combustibles en aplicaciones domésticas, comerciales de prestación de servicios e industriales. En esta norma, se encuentran dos partes relevantes: la ISO 17225-2, que define los requisitos para los pellets fabricados a partir de biomasa de origen leñoso, y la ISO 17225-6, que establece los requisitos para los pellets de biomasa de origen no leñoso. Debido a que el bagazo es biomasa de origen no leñoso, se realizará la comparación de las propiedades obtenidas en las pruebas con respecto a las cifras establecidas en la ISO 17225-6, cuyas dos categorías se muestran en la Tabla 4.13 [6].

3.6.1. Finos

Los "finos" se refieren a la porción del producto final, tal como se recibe inicialmente, que pasa a través de una abertura de 3,11 mm durante un proceso de tamizaje conforme a la norma UNE-EN ISO 17831-1 así como se muestra en la sección 4.2[6].



Figura 3.9: Finos [6].

3.6.2. Durabilidad mecánica

La "durabilidad mecánica"(DU) se refiere a la resistencia de los combustibles densificados a la degradación en forma de finos como resultado de su manipulación durante el proceso de carga y transporte. Para determinar la durabilidad mecánica, se hace referencia a la norma UNE-EN ISO 17831-1 [6].



Figura 3.10: Durabilidad mecánica

3.6.3. Densidad a granel

La "densidad a granel"^{es} una propiedad que indica la cantidad de material que ocupa un volumen específico, establecida en kg/m³. En otras palabras, representa el grado de llenado de un recipiente con un producto. La determinación de la densidad a granel se llevó a cabo siguiendo las pautas establecidas en la norma UNE-EN-ISO 17828 [6].

3.6.4. Humedad

La "humedad" se refiere al contenido de agua presente en el biocombustible. Para determinar este parámetro, se siguió la normas ISO 18134-2 (2015) [6], que implica un proceso de secado a 105°C durante un período de tiempo establecido.

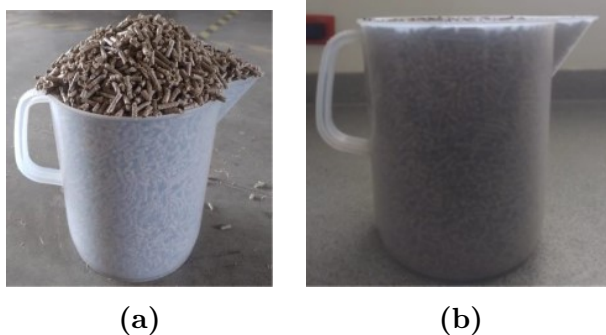


Figura 3.11: Caracterización densidad

3.6.5. Cenizas

El "porcentaje de cenizas" se refiere a la cantidad de materia sólida no combustible presente en la muestra. Este parámetro se determinó siguiendo la norma ISO 18122 y se expresa como el porcentaje de masa en residuos que quedan después de la calcinación a una temperatura de 575 ± 25°C, considerando la biomasa en base seca. Es importante destacar que estos análisis se llevaron a cabo por duplicado para asegurar la precisión de los resultados [6].

3.6.6. Poder calorífico

El "poder calorífico superior" se refiere a la cantidad de energía por unidad de masa que puede ser liberada y aprovechada durante una reacción química, como la combustión. Para determinar este valor en un combustible sólido en base seca, se utilizó un calorímetro o bomba adiabática, siguiendo la norma ISO 18125 [6]. Es importante destacar que estos análisis se llevaron a cabo en duplicado para garantizar la precisión de los resultados.

3.7. Modelado Funcional usando IDEF0

IDEF0 (Integration Definition for Function Modeling) es una herramienta de modelado funcional desarrollada originalmente por la Fuerza Aérea de los Estados Unidos para representar sistemas complejos de forma estructurada y jerárquica. Su aplicación se ha extendido ampliamente en el ámbito de la ingeniería, el análisis de procesos y el diseño de sistemas, debido a su capacidad para descomponer una función global en subfunciones interrelacionadas, identificando claramente sus entradas, salidas, controles y mecanismos.

IDEF0 permite representar de manera clara la relación entre los diferentes procesos, insumos y recursos dentro de la planta peletizadora, facilitando el análisis y la toma de decisiones en el diseño conceptual. Su estructura se compone de los siguientes elementos fundamentales:

- **Cajas:** Representan las **funciones principales** del sistema, descomponiendo el proceso en actividades específicas. Cada caja corresponde a una operación o conjunto de operaciones dentro de la planta.

- **Flechas de entrada:** Indican los insumos necesarios para que una función pueda operar. En el caso de la peletización, pueden representar materiales como bagazo de caña, agua, aditivos o energía térmica.
- **Flechas de salida:** Representan los productos o subproductos generados tras la ejecución de una función. En este contexto, incluyen pellets terminados, vapor residual, cenizas o partículas finas.
- **Flechas de control:** Definen las restricciones, normas o parámetros que rigen cada función. Estas pueden incluir estándares de calidad, especificaciones de humedad, temperatura de secado, o normativas como la ISO 17225-6.
- **Flechas de mecanismos:** Representan los elementos que ejecutan la función, tales como equipos (molinos, secadores, peletizadoras) o personal operativo.

La metodología IDEF0 permite descomponer el proceso en niveles jerárquicos, desde una vista general del sistema hasta la descripción detallada de cada función. Esta segmentación facilita la identificación de relaciones causa-efecto, optimización de procesos y evaluación de alternativas tecnológicas para mejorar la eficiencia del proceso.

CAPÍTULO 4: Requerimientos

En este capítulo se presenta el desarrollo del primer objetivo específico del proyecto, en el cual se definieron los requerimientos y especificaciones de la planta peletizadora de acuerdo con la metodología establecida. Es importante destacar que el éxito del diseño de la planta peletizadora depende de la adecuada definición y control de dos tipos fundamentales de parámetros: los parámetros de elaboración y los parámetros de evaluación de los pellets. Ambos tipos de parámetros son cruciales para asegurar tanto la eficiencia del proceso de producción como la calidad del producto final, teniendo en cuenta la estricta aplicación de la norma para producción y comercialización de pellets.

4.1. Requerimientos de elaboración de Pellets

La producción de pellets a partir de bagazo de caña de azúcar constituye un proceso técnico estructurado, compuesto por una serie de etapas secuenciales que abarcan desde la preparación del material hasta la obtención del producto final. En el siguiente esquema se representa de forma general el flujo operativo de la planta, incluyendo los equipos principales y el orden lógico de transformación del bagazo. Este diagrama cumple una función introductoria al permitir una comprensión global del sistema, identificando los puntos de transferencia de masa, las transiciones térmicas y los vínculos entre los componentes funcionales.

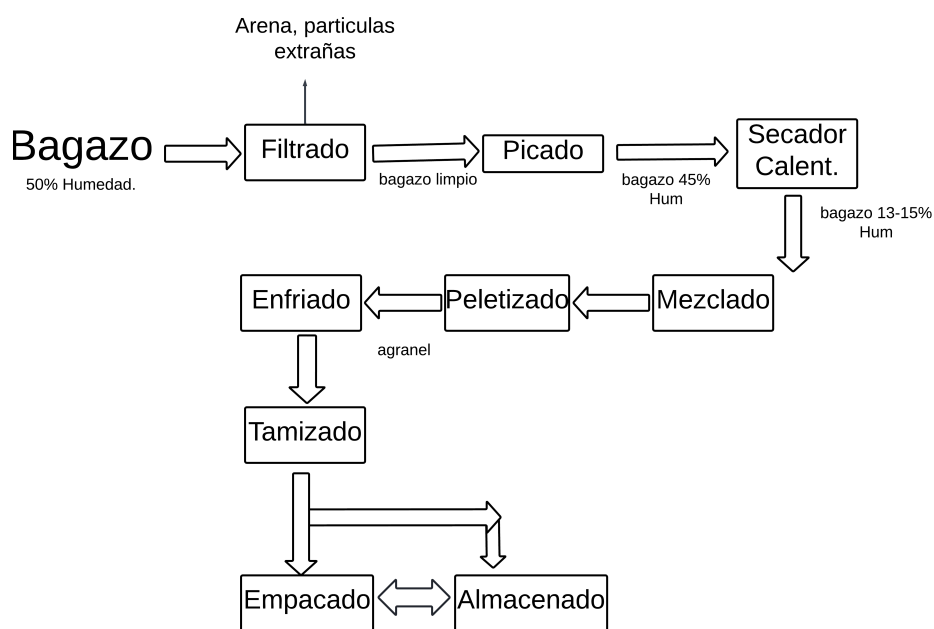


Figura 4.12: Proceso propuesto para la producción de Pellets a partir de bagazo de caña de azúcar. Autor: Propia

Para asegurar el cumplimiento de estos parámetros de elaboración, a continuación, se detalla el proceso necesario para la elaboración de pellets de caña de azúcar para el aprovechamiento energético, teniendo en cuenta el cumplimiento de las normas 17225 para la producción y comercialización de biocombustibles sólidos [6].

RE-1 Tamizadora: Debido a que el bagazo ha sido recogido en el campo, la probabilidad que vengan acompañados de arena (cenizas minerales) es muy alta. Dicha arena no puede ser parte integral del producto final (Pellet) porque el poder calorífico del mismo disminuye, además, los estándares de calidad de estos definen cantidades permisibles de estos componentes no deseados. La arena también es causante de abrasión en los equipos del proceso, especialmente en las Pelletizadoras donde aumenta la presión y fricción entre el bagazo y el acero de dichos equipos; además se encuentra partículas metálicas debido a los dientes de los molinos que al generar fricción con la picadora puede generar incendios por lo volátil que es el bagazo ya picado (bagacillo) y/o incrustación en la peletizadora. Por lo anterior, el bagazo debe pasar por un equipo rotativo o de vaivén (zaranda) que desprenda y separe la arena y partículas de la fibra.

RE-2 Picadora: Para aglutinar las fibras en Pellets, estas se deben picar lo más finamente posible (fibras de 1 cm de largo), este picado debe realizarse después de que el bagazo sea extraído de los molinos de la planta de elaboración, seguidamente después de los filtros. La efectividad del picado depende del tipo y cantidad de cuchillas que se decida instalar en las picadoras y del número de veces que un determinado volumen de bagazo pase por la picadora.

RE-3 Secadora: Si el bagazo picado proviene de material verde (húmedo), entonces será necesario que pasen por un proceso de secado. La humedad tendrá que disminuir a un máximo de entre 10 y 15 %. Esta humedad residual es ventajosa para la compresión en Pellets ya que tiene un efecto aglutinante. El producto resultante tendrá menos humedad porque en la compresión se pierde humedad por calor y por fricción.

RE-4 Mezcladora: El bagazo picado y seco (idealmente <15 % de humedad) debe prensarse en Pellets y debe quedar así permanentemente, para que esto sea posible se necesita mezclar el bagazo picado con un aglutinante que permita el enlace de las partículas de fibra. Los aglutinantes generalmente pueden ser preparados a base de almidón y agua o en el caso del bagazo de caña en algunos ámbitos se utiliza melaza de caña, especialmente importante si los Pellets tendrán un destino alimenticio (Concentrados para animales) y glicerina si lo Pellets tendrán un destino energético.

RE-5 Pelletizadora: Es la operación más importante de todas, el pelletizado no es más que la aplicación de presión en un recinto cerrado a la mezcla de bagazo con aglutinante, la cual es comprimida y luego cortada en partes pequeñas llamadas Pellets.

No obstante, para un análisis más detallado del funcionamiento interno del proceso, en el capítulo 5 se desarrollará el modelo funcional IDEF0. Este enfoque permitirá descomponer cada etapa en funciones específicas, definiendo con mayor precisión las entradas, salidas, controles y mecanismos involucrados, y facilitando así el análisis sistémico y la toma de decisiones en cuanto a diseño, operación y selección tecnológica.

4.2. Normas de Producción De Pellets

La norma ISO 17225 ofrece una guía general sobre los biocombustibles sólidos, definiendo términos técnicos y especificaciones generales para asegurar una comprensión adecuada de la norma. Esta guía abarca desde la fase de producción hasta el comercio eficiente y los acuerdos entre vendedor y comprador. Se incluyen conceptos que explican cómo la biomasa sólida puede ser utilizada como biocombustible, el cual puede ser convertido en energía eléctrica o calórica. La norma también detalla las diversas fuentes de origen de los biocombustibles sólidos, incluyendo la silvicultura y la arboricultura, la agricultura y horticultura, y la acuicultura. Además, se incorporan definiciones sobre tratamiento químico y aplicaciones comerciales.

Esta normativa incluye la clasificación de la materia prima de los biocombustibles sólidos, subrayando la obligatoriedad de indicar el origen y la fuente de todos los biocombustibles, los cuales pueden clasificarse como: biomasa leñosa, biomasa herbácea (no leñosa). Se considera que las mezclas de biomasa pueden generarse tanto de manera natural como intencional. Para los biocombustibles producidos a partir de bagazo tratada químicamente, es imperativo que no contengan compuestos orgánicos halogenados ni metales pesados en niveles superiores a los valores típicos del material virgen a los establecido.

La norma también describe las propiedades analizadas para la clasificación de los biocombustibles, que varían según la fuente y el origen del biocombustible, permitiendo una caracterización individual de cada clase. No obstante, hay parámetros físico-químicos que deben medirse obligatoriamente, independientemente de la fuente u origen del biocombustible. Estos parámetros incluyen: diámetro (D), longitud (L), humedad, contenido de cenizas, durabilidad mecánica, cantidad de finos, densidad aparente (BD) y poder cal.

La norma ISO 17225:2014 [ref] .Especificaciones y clases de combustibles"detalla las especificaciones que deben cumplir los combustibles de biomasa para ser clasificados. Esta norma se divide en siete partes:

- I. ISO 17225-1: Requisitos generales.
- II. ISO 17225-2: Clases de Pellet de madera, clasificándolos en A1, A2 o B.
- III. ISO 17225-3: Clases de briquetas de madera. Las clases que se consideran para las briquetas de madera son: A1, A2 y B.
- IV. ISO 17225-4: Clases de astillas de madera. Se exponen cuatro clases de astillas: A1, A2, B1 y B2.
- V. ISO 17225-5: Clases de leña de madera. La leña de madera se clasifica en A1, A2 o B.
- VI. ISO 17225-6: Clases de Pellet de origen no leñoso. En esta parte, los Pellet de origen no leñoso se clasifican en A o B.
- VII. ISO 17225-7: Clases de briquetas de origen no leñoso. Se consideran dos clases diferentes para las briquetas de origen no leñoso: A y B.

En el caso de los Pellet la norma ISO 17225-6 define dos calidades distintas así como se muestra en la siguiente imagen.

Propiedad	Unidad	ISO 17225-6 (A)	ISO 17225-6 (B)
Diametro	Mm	6 - 25 ± 1	
Humedad	%	≤ 12	≤ 15
Cenizas	%	≤ 6	≤ 10
Durabilidad mecanica	%	≥ 97,5	≥ 96
finos	%	≤ 2	≤ 3
Poder calorifico	kMJ/Kg	≥ 4,03	
Densidad	Kg/m3	≥ 600	

Figura 4.13: Normativa estándar de calidad de pellets [6].

4.3. Requerimientos Normativos

Los requerimientos normativos y las presiones de compactación de los pellets varían dependiendo de su aplicación, por ello es importante definir los parámetros geométricos de estos. A continuación, se muestran los requerimientos establecidos de acuerdo con la normativa ISO 17225-6, donde se determinan parámetros de interés como diámetro y longitud del pellet, densidad a granel, contenido de humedad y durabilidad mecánica. De acuerdo con la norma; estos parámetros son indicadores principales para la evaluación en la calidad de pellets y define sus rangos óptimos como se muestra a continuación [18].

RG-1 Finos: El porcentaje de "finos" se refieren a la porción del producto final, tal como se recibe inicialmente, que pasa a través de una abertura de 3,11 mm durante un proceso de tamizaje conforme a la norma UNE-EN ISO 18846 [18]. Para llevar a cabo la determinación de los finos, se requiere una muestra mínima de 5 kg en el caso de pellets con un diámetro entre 6 y 12 mm. Esta muestra se divide en fracciones de 500 gramos, las cuales se someten a un proceso de tamizaje utilizando un tamiz con un diámetro de 400 mm, o utilizando muestras más pequeñas en un tamiz de menor diámetro, con un mismo grado de llenado del área superficial. Durante este proceso, se realizan de 5 a 10 rotaciones con el producto en el tamiz con el objetivo de separar el material fino y evitar la generación de nuevos finos.

RG-2 Durabilidad Mecánica: La "durabilidad mecánica" (DU) se refiere a la resistencia de los combustibles densificados a la degradación en forma de finos como resultado de su manipulación durante el proceso de carga y transporte. Para determinar la durabilidad mecánica, se hace referencia a la norma UNE-EN ISO 17831-1 [18]. Según esta norma, realiza lo siguiente:

1. Se toma una muestra de 500 gramos de pellets que previamente han sido tamizados a través de una malla de 3,15 mm para eliminar el material fino.
2. Los pellets que han quedado retenidos en el tamiz se colocan en un compartimiento rectangular cerrado dentro del equipo de durabilidad mecánica (ver Figura 3.9).

3. Estos pellets son sometidos a 500 giros a una velocidad de 50 rpm en el compartimiento. Durante este proceso, los pellets experimentan cargas de impacto y abrasión.
4. Al concluir los 500 giros, se retira la muestra y se vuelve a tamizar utilizando la misma malla para determinar la cantidad de pellets que han quedado retenidos. Esta cantidad representa el producto que no ha sufrido deterioro y no se ha convertido en material fino.
5. El tamizaje posterior se realiza siguiendo las pautas establecidas por la norma UNE-EN ISO 18846 [18] para la determinación de la fracción de material fino.

RG-3 Densidad a granel: La "densidad a granel" es una propiedad que indica la cantidad de material que ocupa un volumen específico, establecida en kg/m³. En otras palabras, representa el grado de llenado de un recipiente con un producto. La determinación de la densidad a granel se llevó a cabo siguiendo las pautas establecidas en la norma UNE-EN-ISO 17828 [18]. Para llevar a cabo esta determinación, se utilizó un recipiente con un volumen de 5470mL. El procedimiento consistió en llenar el recipiente con pellets y luego someterlo a tres caídas desde una altura de 15 cm sobre una superficie de madera. Esto simula el asentamiento del material durante el transporte. A continuación, el recipiente se llenó por encima del borde en forma y se procedió a nivelar el contenido, como se ilustra en la siguiente Figura 3.9a.

RG-4 Humedad: La "humedad" se refiere al contenido de agua presente en el biocombustible.

El agua tiene una gran importancia en el proceso de peletizado, se puede decir que es uno de los factores que influyen en gran medida en la calidad de los pellets. El agua contenida dentro de la biomasa actúa como aglomerante y como lubricante. El agua también ayuda al proceso de adhesión cuando se tienen componentes solubles como azúcares, proteínas o almidones. El rango adecuado de humedad para peletizado dependerá en general de la biomasa, a humedades superiores de 20 % el proceso de peletizado se dificulta, probablemente se debe a la incomprensibilidad del agua. Si la materia prima no tiene una buena capacidad de absorción de humedad durante el proceso de condicionamiento el agua puede permanecer en la superficie actuando como un lubricante entre partículas. Esto ocasiona que durante el proceso de peletizado el centro del material que pasa por el dado extruya de manera más rápida al que está en contacto con las paredes del canal formando lo que se conoce como pellets con forma de árbol de navidad lo cual reduce la durabilidad del pellet.[18]

RG-5 Cenizas: El "porcentaje de cenizas" se refiere a la cantidad de materia sólida no combustible presente en la muestra. Este parámetro se determinó siguiendo la norma ASTM E1755 y se expresa como el porcentaje de masa en residuos que quedan después de la calcinación a una temperatura de 575 ± 25°C, considerando la biomasa en base seca. Es importante destacar que estos análisis se llevaron a cabo por duplicado para asegurar la precisión de los resultados [19].

RG-6 Poder Calorífico: El "poder calorífico superior" se refiere a la cantidad de energía por unidad de masa que puede ser liberada y aprovechada durante una reacción química, como la combustión. Para determinar este valor en un combustible sólido en base seca, se utilizó un calorímetro o bomba adiabática, siguiendo las normas ASTM E1757-01 y ASTM D5865-13 [19]. Es importante destacar que estos análisis se llevaron a cabo en duplicado para garantizar la precisión de los resultados.

CAPÍTULO 5: Arquitectura funcional de la planta piloto basada en un modelo funcional IDEF0

En este capítulo se desarrolla la especificación de la arquitectura funcional de la planta piloto de pelletizado de bagazo de caña de azúcar, en cumplimiento del segundo objetivo de esta investigación. Para ello, el abordaje establecido en la sección 2.1.2, en la cual es una herramienta de modelado funcional ampliamente utilizada en ingeniería de sistemas y procesos industriales.

5.1. Aplicación del modelo IDEF0 en el diseño funcional de la planta

Una vez establecida la base teórica y metodológica de la herramienta IDEF0 en el marco conceptual de esta tesis, en esta sección se presenta su aplicación directa al diseño funcional de la planta piloto de producción de pellets a partir de bagazo de caña de azúcar. El objetivo principal es representar el comportamiento funcional del sistema desde una perspectiva lógica y jerárquica, descomponiendo su operación global en funciones específicas, con sus respectivas entradas, salidas, controles y mecanismos.

La implementación del modelo IDEF0 permite visualizar con claridad cómo interactúan las distintas unidades de proceso y cómo se articulan los flujos de materiales y energía a lo largo de la línea de producción. Esta representación funcional no se limita a ilustrar el proceso, sino que permite identificar puntos críticos de control, relaciones de dependencia entre funciones, futuros mantenimientos, posibles mejoras, y zonas en las que la selección tecnológica influye de manera determinante sobre la eficiencia operativa.

Además, esta herramienta facilita el análisis sistémico del diseño conceptual, permitiendo validar la coherencia entre los requerimientos técnicos del proceso y los equipos seleccionados en etapas anteriores. A medida que se avanza en los distintos niveles de descomposición (A0, A1, A2, A3), se profundiza el entendimiento de cada etapa del proceso, lo que a su vez respalda el análisis técnico y económico desarrollado en los capítulos siguientes.

5.2. APLICACIÓN DE IDEF0 EN LA PLANTA PILOTO

A continuación, se presentara una descripción funcional de la planta piloto para la generación de pellets usando IDEF0 mediante refinamiento sucesivos.

5.2.1. Diagrama de Nivel A-0: Funciones Generales

El diagrama A-0 es el nivel más alto de descomposición funcional en la metodología IDEF0 y representa el sistema en su conjunto dentro de un solo bloque. En el caso del diseño conceptual de la planta peletizadora, este diagrama ilustra la conversión del bagazo de caña de azúcar en pellets, destacando las principales interacciones del proceso.

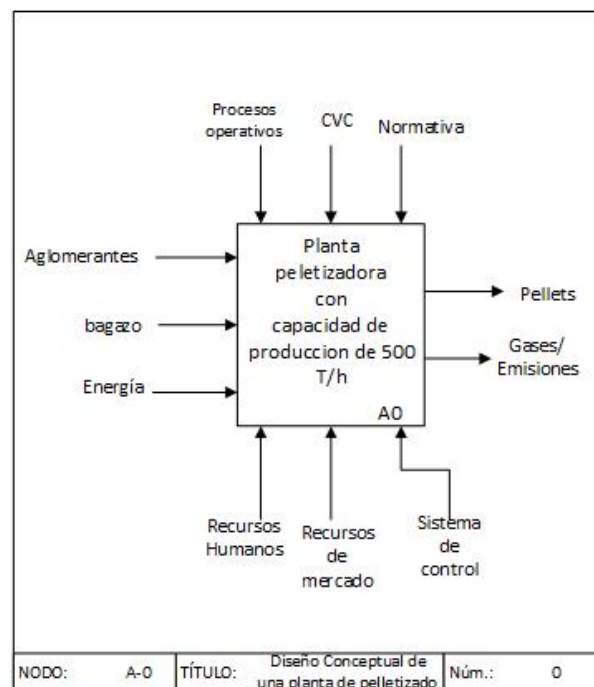


Figura 5.14: Nodo A-0, Matriz IDEF0. Autor: Propio.

El diagrama A-0 proporciona una visión clara y estructurada del funcionamiento de la planta, permitiendo a los diseñadores y operadores identificar los elementos esenciales del sistema. Además, sirve como base para desglosar el proceso en niveles más detallados (A0, A1, etc.) y analizar cada etapa del pelletizado con mayor profundidad.

Por lo tanto, el diagrama A-0 se compone de una única caja funcional, que representa la operación global del sistema. Esta caja está conectada por diferentes flechas que indican los elementos clave del proceso.

- **Entradas:** Representan los materiales y recursos necesarios para la producción de pellets, como el bagazo de caña, agua, aditivos y energía térmica.
- **Salidas:** Corresponden a los productos finales y subproductos del proceso, tales como pellets de biomasa, vapor residual, partículas metálicas y/o piedras y finos.

- **Controles:** Incluyen los parámetros de calidad, las normativas y las restricciones operativas, tales como la norma ISO 17225-6, que establece especificaciones de humedad, temperatura y densidad del pellet. Asimismo, se contempla el rol de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC), ente corporativo descentralizado de carácter público, encargado de vigilar y controlar el impacto ambiental asociado a las actividades del ingenio.
- **Mecanismos:** Representan los equipos y recursos humanos encargados de ejecutar el proceso, como secadores, molinos, peletizadoras y operadores.

5.2.2. Diagrama de Nivel A0: Descomposición Funcional del Sistema

El Diagrama A0 constituye el primer nivel de descomposición del sistema modelado mediante la metodología IDEF0. En este nivel, la función general representada en el Diagrama A-0 se desglosa en subprocesos principales, permitiendo una mayor comprensión de la estructura operativa de la planta peletizadora.

Estructura y Componentes del Diagrama A0

El Diagrama A0 está compuesto por múltiples cajas funcionales, cada una representando una etapa crítica dentro del proceso de producción de pellets. Estas funciones están interconectadas mediante flujos de entradas, salidas, controles y mecanismos, según la metodología IDEF0.

La estructura funcional representada en el Diagrama A0 se descompone en cuatro bloques principales que reflejan las etapas críticas del proceso productivo: preparación del material, preparación de la mezcla, compactación y almacenamiento.

La función **A1 - Preparar material** agrupa todas las operaciones destinadas al acondicionamiento del bagazo crudo, incluyendo la eliminación de impurezas y el secado térmico. Esta etapa es esencial para reducir la humedad del bagazo hasta niveles óptimos (12-15 %) y garantizar condiciones estables para la etapa de mezcla y compactación.

La función **A2 - Preparar mezcla** integra el bagazo seco con aditivos como miel B, glicerina y agua, en proporciones controladas. Este proceso busca mejorar la cohesión del material, facilitar su peletización y reducir la presencia de finos, garantizando una mezcla homogénea y fluida.

En la función **A3 - Compactación**, el material mezclado es introducido en la peletizadora, donde se somete a presión y temperatura para formar pellets cilíndricos. Aquí se definen las propiedades físicas del producto final, tales como su tamaño, durabilidad, densidad y contenido de humedad, en cumplimiento con la norma ISO 17225-6.

Finalmente, la función **A4 - Almacenamiento** contempla el enfriamiento de los pellets, su clasificación y separación de finos, y su posterior disposición en silos o empaques. Esta etapa permite estabilizar el producto, preservar su calidad y prepararlo para su distribución o uso final.

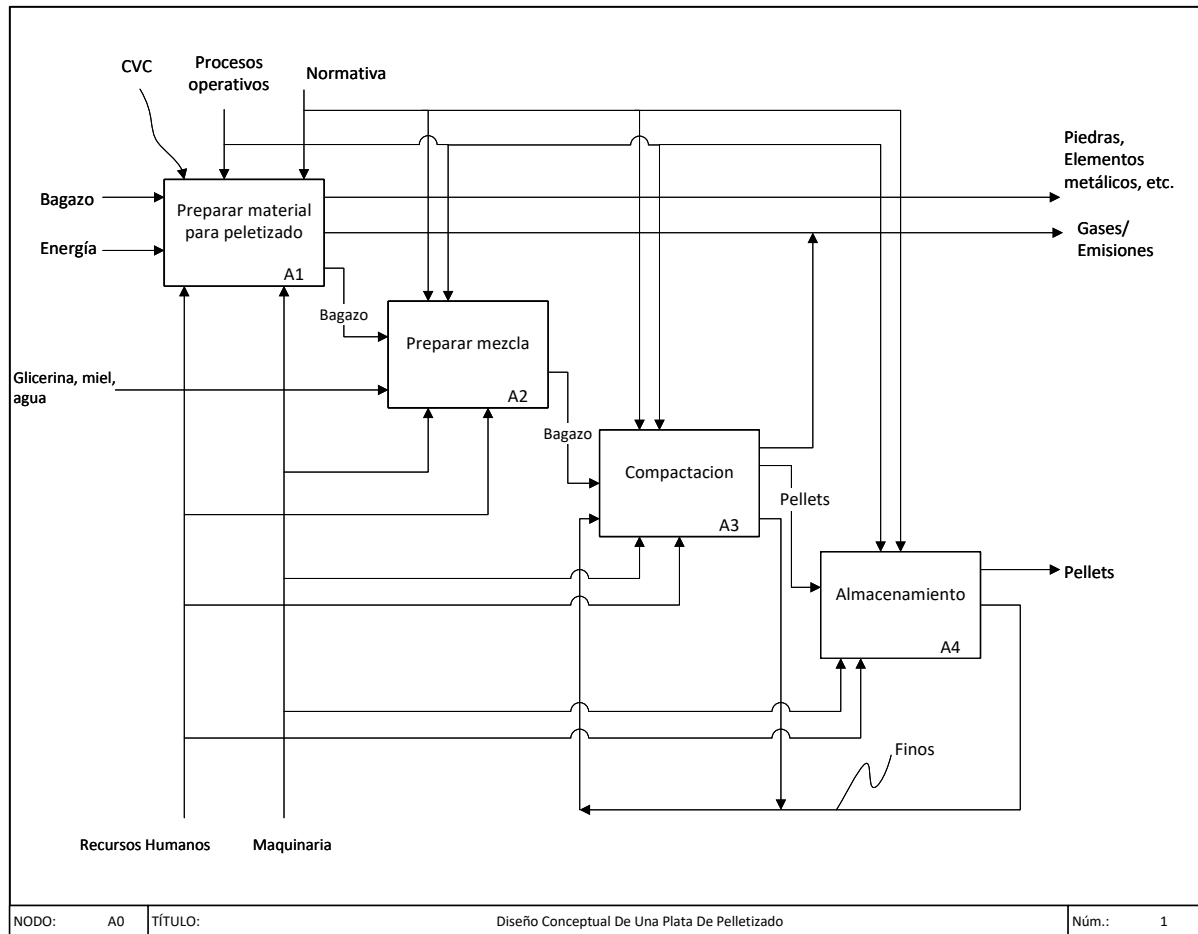


Figura 5.15: Nodo A0, Descomposición funcional del sistema. Autor: Propio.

5.2.3. Diagrama A1: Preparación del Material para Peletización

El Diagrama A1 representa la descomposición funcional del proceso de preparación del bagazo de caña de azúcar, definido previamente en el Diagrama A0 como una de las funciones principales de la planta pelletizadora. En este nivel, se detallan las operaciones necesarias para acondicionar el material antes de la etapa de compactación, garantizando que cumpla con los requisitos físicos y energéticos establecidos por las normas técnicas de pelletizado.

Funciones en el Diagrama A1

Las funciones modeladas en este nivel permiten transformar el bagazo crudo en un material apto para la peletización. Estas incluyen:

- **Secado del bagazo:** Reducción del contenido de humedad del bagazo hasta valores óptimos

(13 y 15 %), con el fin de cumplir los parámetros de calidad exigidos en la norma ISO 17225-6 para pellets de biomasa.

- **Filtrado de bagazo:** Eliminación de impurezas físicas como piedras, metales, restos vegetales no deseados u otros elementos que puedan afectar la operación de los equipos o la calidad del producto final
- **Picado o reducción de tamaño:** Fragmentación del bagazo a un tamaño de partícula adecuado para mejorar la eficiencia del secado y facilitar el posterior proceso de compactación.

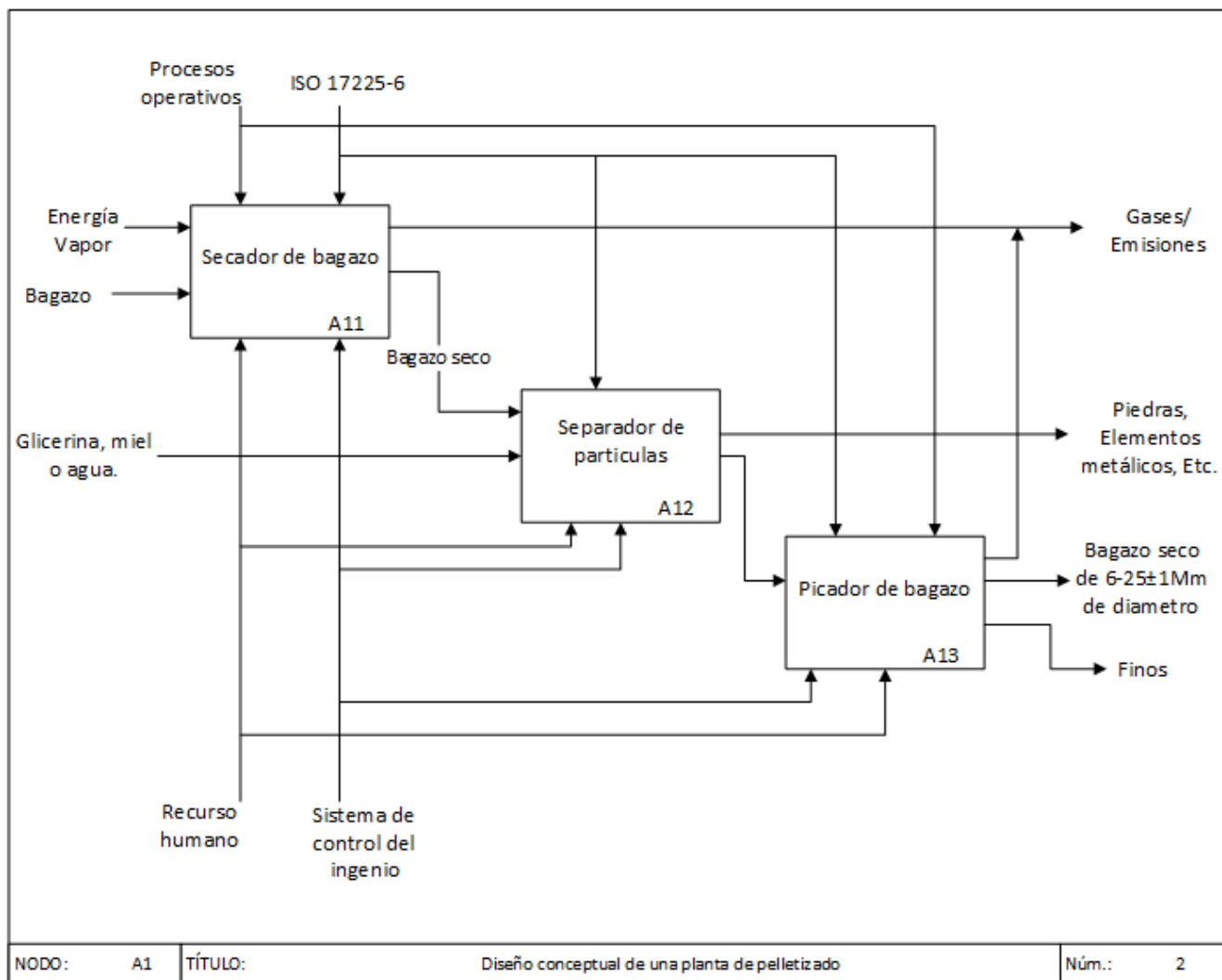


Figura 5.16: Nodo A1, Descomposición funcional para la preparación del material. Autor: Propio.

El modelado funcional a nivel A1 permite identificar con claridad las interacciones entre operaciones previas a la pelletización, los recursos requeridos, y los controles necesarios para garantizar la estabilidad del proceso. Además, proporciona una base para la selección de tecnologías específicas (filtros, molinos, secadores), el dimensionamiento de equipos y la evaluación de eficiencia energética.

5.2.4. Diagrama A2: Preparación de mezcla

En el marco del modelado funcional mediante IDEF0, la función A2 corresponde a la preparación de la mezcla, una etapa clave en la obtención de pellets de alta calidad. Este proceso contempla la incorporación de aditivos naturales como miel, agua y glicerina al bagazo de caña de azúcar, con el objetivo de mejorar las propiedades de cohesión y facilitar la posterior compactación.

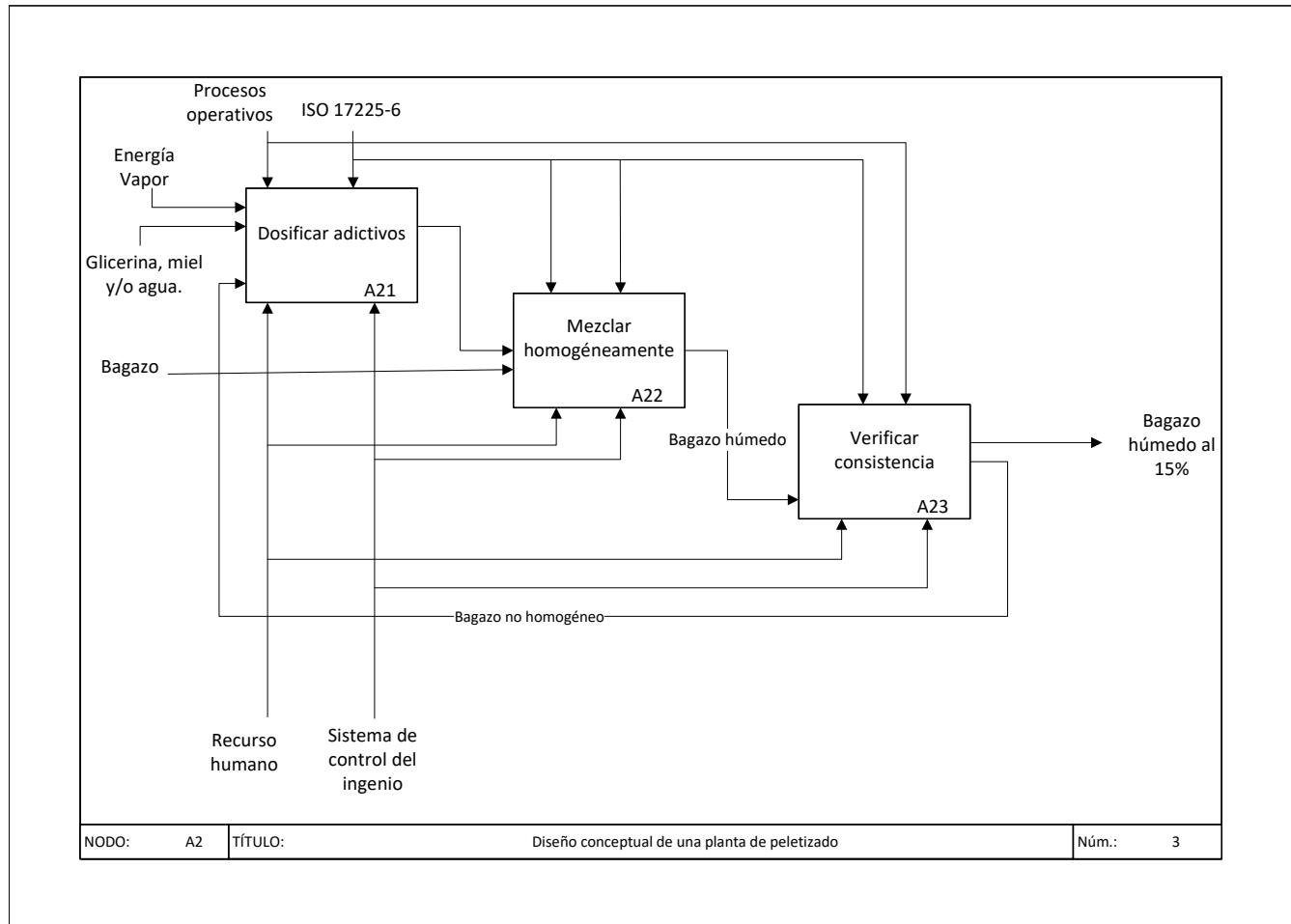


Figura 5.17: Nodo A2, Descomposición funcional para la preparación de la mezcla.

La preparación de la mezcla comprende una serie de actividades específicas que aseguran la adecuada formulación del material previo a la compactación:

- **Dosificar aditivos:** Se realiza la medición precisa de los aditivos seleccionados (miel, agua y glicerina) en proporciones determinadas experimentalmente. La dosificación controlada es fundamental para garantizar la humedad y plasticidad adecuadas de la mezcla y por ultimo
- **mezclar homogéneamente:** El material se somete a un proceso de mezclado que asegura la homogeneidad de la mezcla. Una distribución uniforme de los aditivos mejora la cohesión entre las partículas y facilita el proceso de peletización.
- **Verificar consistencia:** Se inspecciona la mezcla obtenida para confirmar que cumple con los parámetros deseados de humedad y consistencia. De ser necesario, se realizan ajustes en

la cantidad de aditivos.

Estas actividades permiten garantizar que el material mezclado tenga las características físicas necesarias para el proceso de compactación (A3), asegurando una mejor calidad en el pellet final.

5.2.5. Diagrama A3: Compactación

La Figura 5.18 presenta el nivel A3 del modelo funcional IDEF0, correspondiente al diseño conceptual de la etapa final del proceso de pelletizado. En este nivel se descompone la función global de la planta en tres subfunciones operativas: peletización (A31), tamizado de pellets (A32) y enfriamiento final (A33). Cada una de estas actividades se modela con sus respectivas entradas, salidas, controles y mecanismos, siguiendo la estructura metodológica del estándar IDEF0.

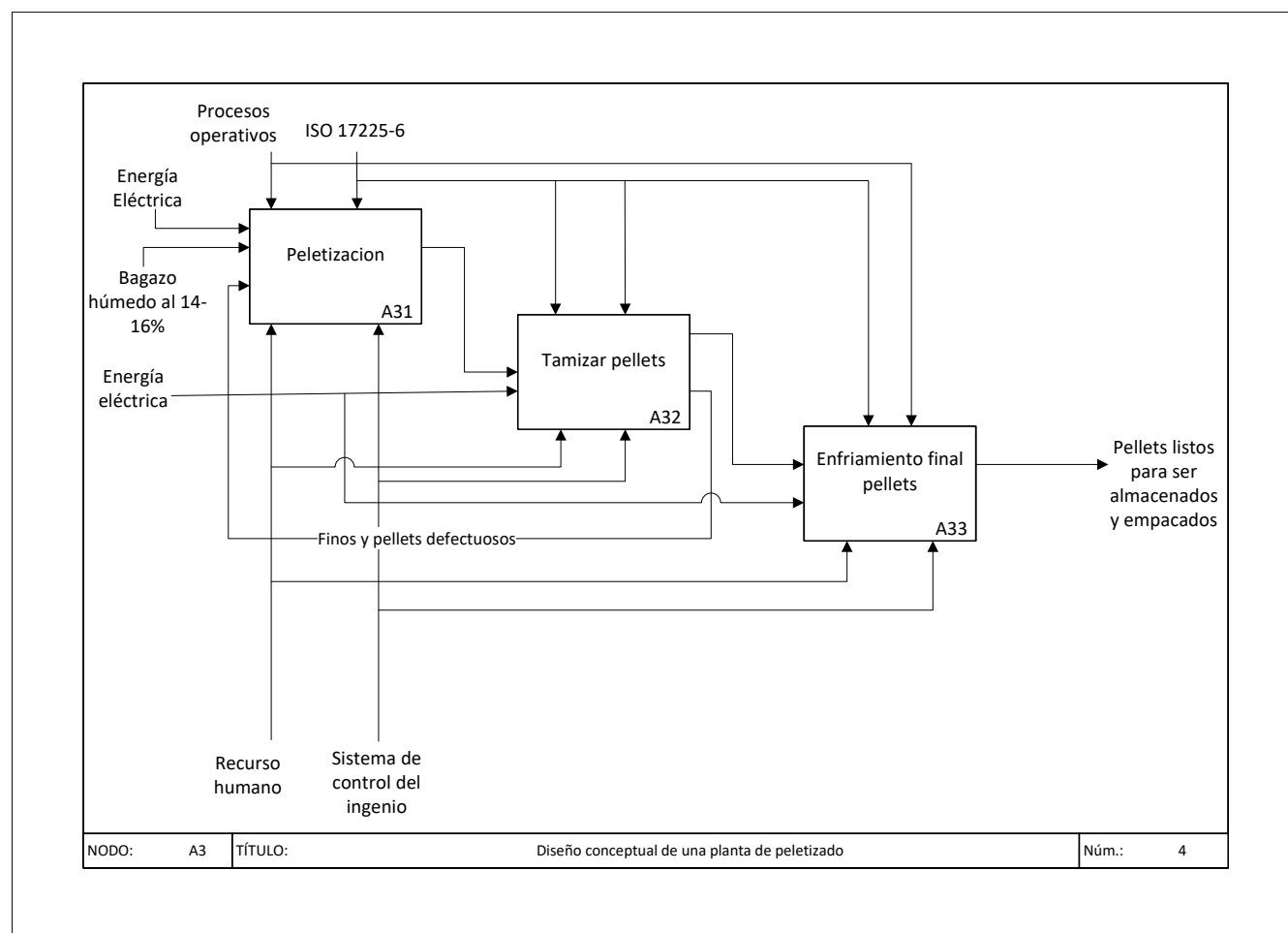


Figura 5.18: Nodo A3, Compactación de la mezcla.

La función A31 - Peletización recibe como entrada el bagazo seco acondicionado con un contenido de humedad entre 14 y 16 %. Esta etapa utiliza energía eléctrica y está regida por los parámetros operativos del sistema y los requisitos de calidad definidos por la norma ISO 17225-6. La salida de esta actividad incluye pellets formados, así como un porcentaje de finos y unidades defectuosas que no cumplen con las especificaciones de tamaño, resistencia o forma. El proceso es asistido por recurso humano y sistemas de control automático del ingenio.

La función A32 - Tamizar pellets se encarga de separar los productos no conformes (finos y pellets mal compactados), que se recirculan al sistema o son gestionados como subproducto. Esta etapa también requiere energía eléctrica y está sujeta a los mismos controles normativos que rigen el proceso anterior. Su propósito es garantizar que solo los pellets que cumplen con los estándares mecánicos y dimensionales pasen a la siguiente fase.

Finalmente, la función A33 - Enfriamiento final de pellets estabiliza térmicamente el producto, reduciendo su temperatura y humedad superficial para garantizar su almacenamiento, manipulación y empaque sin degradación estructural. Cabe resaltar que el pellet, al salir de la compactadora, presenta una temperatura aproximada de 70 °C, por lo que su manipulación inmediata resulta compleja. Se requiere un enfriamiento previo al empaclado para evitar deformaciones en su geometría o defectos en la empaquetadura, asegurando así la integridad física del producto final. Esta operación se soporta en energía eléctrica y condiciones definidas por los procesos internos y las buenas prácticas de manufactura. La salida de esta actividad corresponde a pellets terminados listos para ser almacenados o empacados.

Este modelo funcional permite visualizar de manera clara la interacción entre procesos, controles y recursos, y sirve como base para la definición de requerimientos técnicos en la selección de equipos, así como para el desarrollo posterior de los diagramas de procesos y la estimación de costos.

5.2.6. Diagrama A4: Almacenamiento

En el modelo funcional IDEF0, la función A4 representa el almacenamiento del pellet una vez finalizado el proceso de compactación. Esta etapa no solo implica el resguardo físico del producto, sino también su clasificación según las presentaciones establecidas para su comercialización o distribución. Se contemplan tres formas de almacenamiento:

- **Big Bag (Tonelada):** Utilizado principalmente para almacenamiento interno o venta en grandes volúmenes o Material de Exportación.
- **Saco de 70 Kg:** Presentación industrial para clientes que requieren cantidades intermedias.
- **Saco 50 Kg:** Presentación doméstica o comercial minorista.

Esta función garantiza que los pellets se conserven en condiciones óptimas de humedad y limpieza, y que su distribución posterior se realice de manera eficiente según los requerimientos logísticos y comerciales.

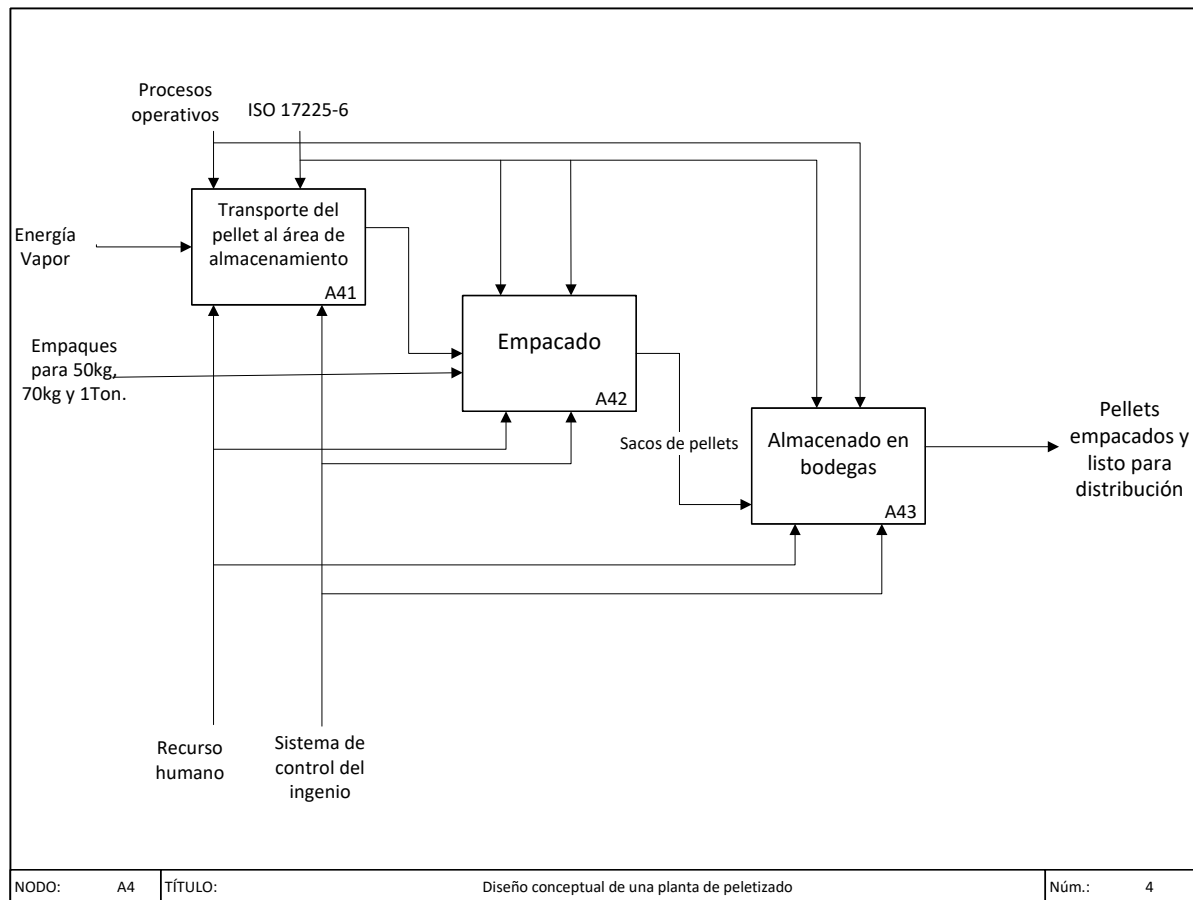


Figura 5.19: Nodo A4, Descomposición funcional para la disposicion final del proceso de peletizado.

CAPÍTULO 6: Determinación por valoración Tecnológicas Basadas en requerimientos Funcionales

Este capítulo presenta el desarrollo del tercer objetivo específico, enfocado en la determinación tecnológica de los componentes funcionales de la planta de peletizado, con base en parámetros técnicos previamente definidos.

La selección tecnológica de los equipos que componen la planta de peletizado requiere una fundamentación rigurosa que integre criterios termodinámicos, características del material a procesar y condiciones de operación específicas del entorno industrial. En este capítulo se presentan los estudios técnicos realizados para sustentar dicha selección, particularmente mediante el desarrollo de balances de masa y energía que, aunque complementarios, responden a enfoques metodológicos distintos y cumplen funciones específicas en la caracterización del proceso.

El balance de masa tiene como propósito establecer cuantitativamente la relación entre la cantidad de bagazo húmedo que ingresa al sistema, el contenido de humedad inicial y la masa de agua que debe ser removida para alcanzar la especificación final del pellet. A partir de la capacidad nominal de producción de pellets (500 kg/h), se calcularon retroactivamente las masas de entrada requeridas de bagazo húmedo, considerando la reducción de humedad desde un valor típico del 50 % hasta un rango objetivo del 12 y 15 %. Este análisis es esencial para dimensionar el sistema de secado, calcular la capacidad operativa de los equipos y definir el flujo másico de sólidos en el proceso.

Complementariamente, se determinó la disponibilidad real de bagazo en el ingenio a partir de un análisis cruzado que integró:

- los balances de masa internos del proceso de molienda,
- datos de producción diaria y horaria de caña y bagazo
- registros directos de campo obtenidos del sistema de control automático (PLC) del Ingenio Riopaila Castilla.

Los análisis se desarrollaron bajo condiciones de borde establecidas por el Ingenio Riopaila Castilla, con especial énfasis en la disponibilidad de vapor de escape para procesos auxiliares y en la energía eléctrica utilizable sin afectar la operación existente. Estos parámetros resultaron determinantes para evaluar la viabilidad térmica del sistema propuesto, garantizando que no se comprometiera ni la producción de azúcar ni la cogeneración eléctrica del complejo.

6.1. Balance de masa

A continuación, se presenta el desarrollo detallado de los balances de masa que sustentan el selección de los equipos térmicos del proceso, con énfasis en los cálculos realizados, las fórmulas aplicadas y las condiciones de borde empleadas. El análisis se inicia desde el secador, equipo clave dentro del sistema, ya que su rendimiento determina tanto la calidad final del pellet como la demanda térmica general. Desde este punto, se establece la relación entre la disponibilidad de bagazo en planta, la cantidad de agua a eliminar para alcanzar la humedad final requerida, y el vapor disponible para su aprovechamiento térmico.

El balance de masa se enfocó en determinar la cantidad de bagazo húmedo que debe ingresar al sistema para obtener una producción constante de 500 kg/h de pellet con una humedad final del 12 - 15 %. Para ello, se partió de la disponibilidad operativa de bagazo proporcionada por el Ingenio Riopaila Castilla, la cual fue estimada principalmente mediante el principio de la conservación de la materia iniciando con el balance general de consumo de bagazo en toda la planta de producción.

Como punto de partida, se elaboró un esquema del flujo de bagazo dentro de la planta (ver figura 6.20), lo cual permitió identificar los principales destinos del bagazo generado y estimar la fracción potencialmente disponible para el proceso de peletización.

Donde :

- T_v : toneladas de vapor
- T_b : toneladas de bagazo
- T_p : toneladas de pellet.

Una vez definidas las variables clave, se consideraron tres condiciones de borde fundamentales para determinar la disponibilidad real de bagazo sin comprometer el proceso industrial del ingenio:

- La cantidad total de caña molida al año
- El bagazo necesario para cumplir con 60000 Ton/Año de bagazo desmedulado.
- El bagazo necesario para sostener una producción continua de 500 kg/h de pellet (calculado mediante la ecuación 6.2).

Con base en lo anterior, se procedió a unificar todas las cantidades a una misma unidad toneladas por hora (T/h), lo que facilita la comparación directa de datos y permite realizar un análisis coherente de la materia prima disponible para el proceso.

$$M_b = \frac{M_p \cdot (1 - H_p)}{1 - H_b} \quad (6.2)$$

Donde M_b es la cantidad de bagazo necesaria para producir una cantidad de pellets (M_p) y H_b , H_p hacen referencia a la humedad de bagazo y humedad requerida del pellet, respectivamente.

$$M_b = \frac{0,5 \cdot (1 - 0,13)}{1 - 0,50} = \frac{0,5 \cdot 0,87}{0,50} = 0,87 \frac{T}{h}$$

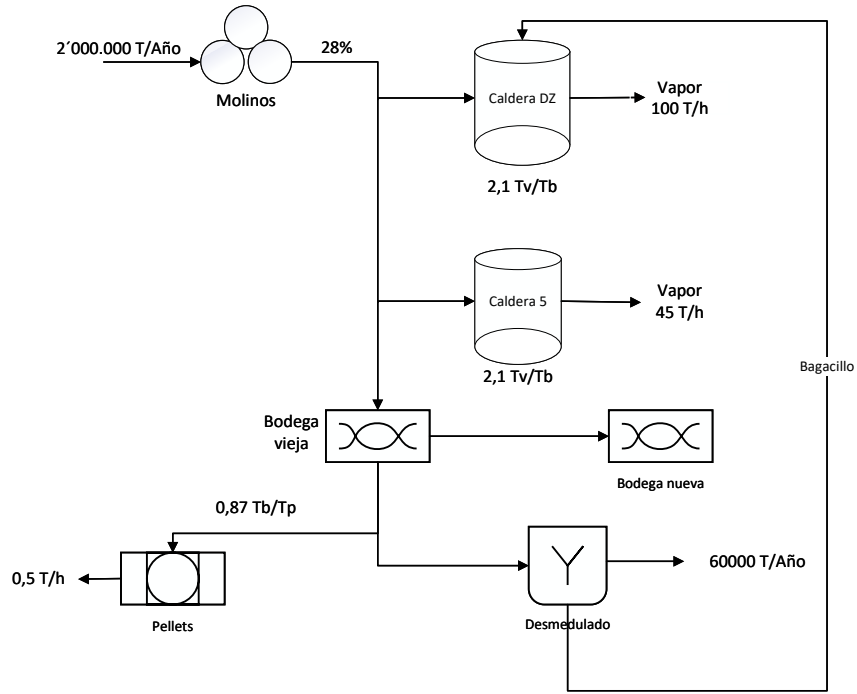


Figura 6.20: Balance de materia de la capacidad de bagazo del ingenio.

Para el análisis de capacidad del ingenio, las magnitudes anuales de molienda y de bagazo desmedulado se expresan en base horaria con el fin de ser integradas en los balances de masa. Este procedimiento se fundamenta en la conversión del año productivo, equivalente a 270 días de operación continua, en 24 horas efectivas de trabajo. De esta manera, la molienda anual de 2,0 millones de toneladas de caña se transforma en una capacidad promedio de 308,6 T/h, mientras que el volumen de bagazo desmedulado, estimado en 60 000 toneladas por año, corresponde a 9,26 T/h. A partir de este mismo criterio, el bagazo total derivado de la molienda equivale al 28 % de la caña procesada, lo que representa 86,4 T/h.

$$\frac{2,000,000 \text{ T}}{1 \text{ AñoPr}} \cdot \frac{1 \text{ AñoPr}}{270 \text{ días}} \cdot \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ h}} = 308,6 \frac{T}{h} \quad (6.3)$$

$$\frac{60\,000 \text{ T}}{270 \cdot 24 \text{ h}} = 9,26 \frac{T}{h}$$

A partir de este mismo criterio, el bagazo total derivado de la molienda equivale al 28 % de la caña procesada, lo que representa 86,4 T/h. De ese bagazo, el flujo que ingresa al proceso de desmedulado genera un subproducto adicional: el bagacillo, que corresponde aproximadamente al 35 % del material procesado en esta etapa y equivale a 3,24 T/h. Este bagacillo se destina directamente a la alimentación de la caldera DZ, constituyendo un insumo energético fundamental para la generación de vapor.

$$\text{Bagazo} = 308,8 \frac{T}{h} \times 0,28 = 86,46 \frac{T}{h} \quad (6.4)$$

$$\text{Bagacillo} = 9,26 \frac{T}{h} \times 0,35 = 3,24 \frac{T}{h}$$

De esta forma, al unificar los criterios de conversión y expresar tanto la molienda como el bagazo desmedulado en base horaria, se dispone de un marco coherente para el desarrollo del balance de materia. En consecuencia, el análisis se inicia en el nodo de desmedulado de bagazo, dado que constituye el punto con mayor claridad en la información disponible y permite establecer con precisión los flujos de entrada y salida que estructuran el sistema así como se muestra en la siguiente figura.

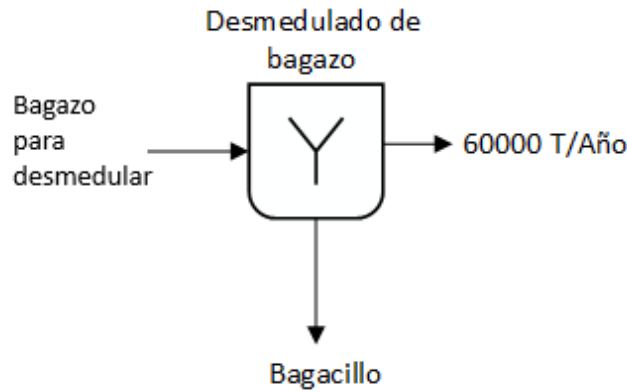


Figura 6.21: Nodo. Desmedulado de bagazo condición inicial

En la Figura 6.21 se presenta el nodo correspondiente al desmedulado de bagazo, donde se esquematiza el flujo de entrada y sus productos de salida. El balance de masa en este proceso contempla que el bagazo destinado al ser desmedulado se divide en dos corrientes: por un lado, el bagacillo, que corresponde aproximadamente al 35 % del material procesado en esta etapa, y por otro, el bagazo desmedulado, equivalente al 65 % restante.

$$\text{Bagazo para desmedular} = \text{Bagacillo} + \text{Bagazo desmedulado} \quad (6.5)$$

$$\text{Bagazo para desmedular} = 9,26 \frac{T}{h} + 3,24 \frac{T}{h} = 12,5 \frac{T}{h}$$

De esta forma, el balance permite establecer la proporción entre el bagazo total procesado, la fracción destinada a bagacillo para la caldera y el bagazo efectivamente desmedulado. Con este criterio, el análisis prosigue en el siguiente nodo del sistema: la caldera DZ, la cual debe garantizar una generación continua de $100 \frac{T_v}{h}$, a partir de la relacion de conversion establecida de $2,1 \frac{T_v}{T_b}$

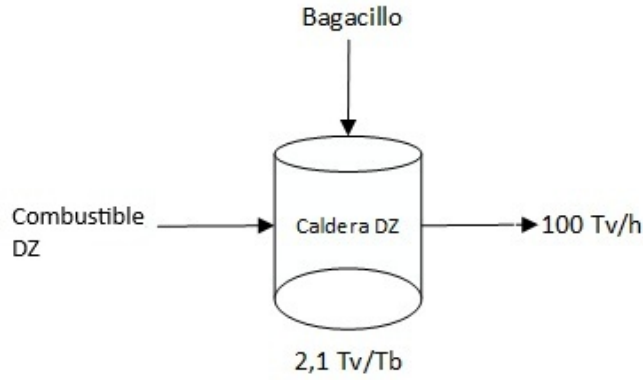


Figura 6.22: Nodo. Caldera DZ

En la Figura 6.22 se representa el nodo de la caldera DZ, cuya función principal es transformar el bagacillo en energía térmica mediante la generación de vapor. Para cuantificar este proceso, se adopta como referencia la relación de conversión de $2,1 \frac{T_v}{T_b}$, la cual establece la cantidad de vapor producido por cada tonelada de bagazo alimentado.

Bajo esta condición, la producción de vapor requerida, equivalente a $100 \frac{T_v}{h}$, se traduce en una demanda de combustible de:

$$\text{Vapor generado (Tv/h)} = \frac{100 \frac{T_v}{h}}{2,1 \frac{T_v}{T_b}} = 47,62 \frac{T_b}{h}$$

De acuerdo con el balance establecido, el bagacillo disponible aporta $3,24 \frac{T}{h}$, por lo que el requerimiento neto de combustión de la caldera se ajusta a:

$$\text{Vapor generado (Tv/h)} = \text{Combustible DZ} + \text{Bagacillo alimentador} \quad (6.6)$$

$$\text{Combustible DZ} = 47,62 \frac{T}{h} - 3,24 = 44,4 \frac{T}{h}$$

Este resultado determina la fracción de bagazo necesaria para garantizar el suministro continuo de vapor de la caldera DZ. A partir de este punto, el análisis prosigue con la caldera 5, la cual representa una segunda demanda crítica dentro del esquema energético del ingenio.

A partir de la demanda de vapor que presenta esta caldera, y manteniendo el mismo criterio de conversión utilizado previamente ($\frac{T_v}{T_b} = 2,1$), se calcula la cantidad de bagazo requerida para su funcionamiento siendo **Bagazo Cald 5** = $21,43 \frac{T}{h}$. Posteriormente, con base en la sumatoria del consumo total de bagazo en ambas calderas y el bagazo ya comprometido en otros procesos (como el bagacillo y la peletización), se determina la **cantidad de bagazo sobrante** en planta. Este valor representa la fracción disponible para otros usos o para expansión del proceso de pelletizado, sin comprometer la operación de las unidades térmicas existentes; por lo tanto:

$$\text{Bagazo necesario total} = 44,4 \frac{T}{h} + 21,43 = 65,83 \frac{T}{h}$$

$$\text{Bagazo sobrante} = \text{Bagazo} - \text{Bagazo necesario total} \quad (6.7)$$

$$\text{Bagazo sobrante} = 86,42 \frac{T}{h} - 65,83 = 20,6 \frac{T}{h}$$

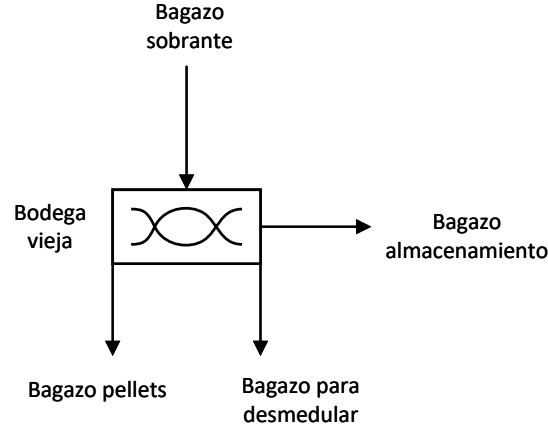


Figura 6.23: Nodo. Bodega antigua de bagazo

En la Figura 6.23 se presenta el nodo correspondiente a las bodegas de bagazo, las cuales cumplen la función de centro de acopio y distribución dentro del sistema energético del ingenio. En este punto se concentra el flujo de bagazo proveniente tanto del proceso de molienda como de la desmedulación, almacenándose en dos unidades principales: la bodega vieja y la bodega nueva. Desde estas instalaciones se gestiona la disponibilidad de bagazo para atender las distintas demandas operativas, incluyendo la alimentación de las calderas y el suministro hacia procesos auxiliares como la producción de pellets.

De esta manera, el nodo de bodegas constituye un eslabón estratégico en el balance de masa, al garantizar tanto el almacenamiento temporal como la distribución equilibrada del bagazo según las necesidades energéticas y productivas de la planta.

$$\text{Bagazo sobrante} = \text{Bagazo pellet} + \text{Bagazo para desmedular} + \text{Bagazo almacenamiento} \quad (6.8)$$

Despejando el bagazo destinado a almacenamiento, se obtiene la fracción de bagazo excedente una vez cubiertas las demandas de la planta. Este material se conserva en la bodega nueva para su uso en periodos futuros (venta o consumo interno):

$$\text{Bagazo almacenamiento} = \text{Bagazo sobrante} - \text{Bagazo para desmedular} - \text{Bagazo pellet}$$

$$\text{Bagazo almacenamiento} = 20,6 \frac{T}{h} - 0,87 \frac{T}{h} - 12,5 \frac{T}{h} = 7,23 \frac{T}{h}$$

Una vez determinada la disponibilidad real de bagazo en la planta, se procede a desarrollar el balance de masa correspondiente al secador, equipo fundamental en el proceso de peletización, ya que de su eficiencia depende directamente la calidad del producto final y el consumo térmico del sistema.

Se requiere que el bagazo ingrese con un determinado contenido de humedad a la peletizadora para optimizar el proceso de la compactación y así obtener mayor durabilidad mecánica, mejorando así el aprovechamiento del combustible. Para reducir y mantener controlada la humedad del combustible, una de las soluciones propuestas ha sido usar secadores de bagazo, empleando como fuentes térmicas posibles el vapor sobre calentado o escape y energía eléctrica tanto para el secador como para los demás equipos de la planta de peletizado.

Para el secado con energía derivada del interior del sistema, los balances de la caldera y del secador están relacionados entre sí. En el caso del secado con vapor sobrecalentado de la caldera, simplemente hay que tener en cuenta que el caudal de vapor entregado por el sistema está disminuido en la cantidad de vapor necesario para el secado.

en la figura 3.8 se esquematiza el secador, con su superficie de control y los flujos de bagazo, gases y agua evaporada en el equipo, para el planteando de los balances así como la ecuación 3.1:

$$\text{Balance de masa: } G_{bh} + G_{gh} = G_{bs} + G_{gh} + G_w \quad (3.1)$$

La ecuación 6.2 nos indica la cantidad de bagazo que debe de ser secado por hora para poder cumplir con la producción estipulada de 500 Kg/h de pellets este valor obtenido sera nuestro G_{bh} (Flujo de bagazo húmedo)

Por lo tanto, $G_{bh} = 500 \frac{\text{Kg}}{\text{h}}$ la humedad del bagazo antes y después del secado corresponde a $w_1 = 50\%$ el valor determinado a partir de los datos de laboratorio y $w_2 = 13\%$ valor estimado como la condición ideal requerida para garantizar un bagazo apto para el proceso de pelletizado y la obtención de pellets de alta calidad, el bagazo seco y el agua evaporada emergentes del secador serían:

$$\text{Bagazo seco: } G_{bs} = 500 \cdot \frac{(1 - w_1)}{(1 - w_2)} = 287,36 \text{ [kg/h]} \quad (6.9)$$

$$\text{Agua evaporada: } G_w = G_{bh} - G_{bs} = 500 - 287,36 = 212,64 \text{ [kg/h]} \quad (6.10)$$

6.2. Balance de vapor

A continuación, se presenta el esquema general de consumo de vapor asociado a las distintas etapas del proceso productivo, con el fin de identificar los principales puntos de demanda térmica y evaluar el potencial de aprovechamiento del vapor disponible para el secado del bagazo en la

planta de peletización. Este análisis es fundamental para establecer un balance energético riguroso, considerando que el vapor constituye el principal vector térmico dentro del sistema.

Para la construcción del esquema, se utilizaron datos operativos obtenidos directamente del sistema de control distribuido (PLC) de la planta, lo que garantiza la fidelidad de la información en cuanto a caudales, presiones y temperaturas reales de operación. Estos valores representan el comportamiento dinámico del proceso bajo condiciones normales de carga, permitiendo dimensionar con mayor precisión los requerimientos energéticos específicos de cada subsistema.

El diagrama resultante permite visualizar de manera integral la red de distribución de vapor, identificando tanto los consumos prioritarios (como evaporadores, turbogeneradores, molinos, etc.) como los puntos donde puede existir una oportunidad de recuperación o re direccionamiento de excedentes térmicos. Este enfoque integral es clave para garantizar la compatibilidad del proceso de secado del bagazo con el régimen operativo actual de la planta, sin comprometer la eficiencia ni la estabilidad de la producción.

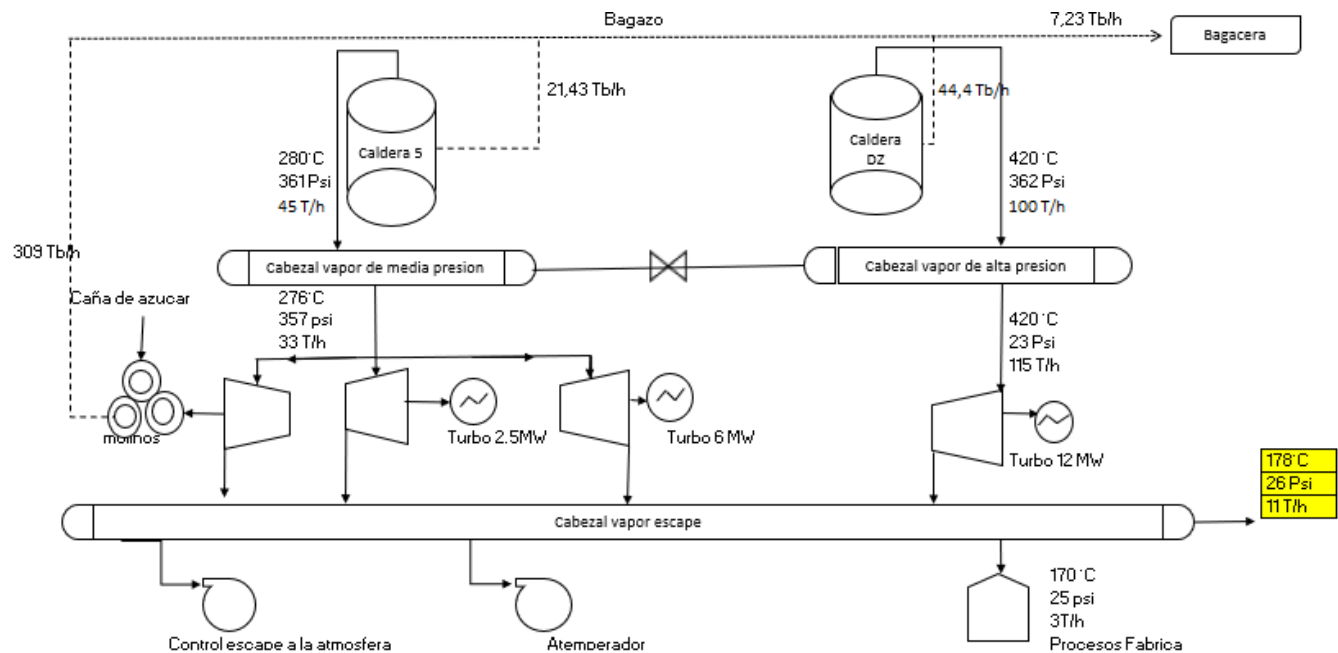


Figura 6.24: Balance y distribución de vapor. Autor: Propio.

La Figura 6.24 resume el recorrido completo del vapor dentro del sistema, desde su generación en las calderas hasta su aprovechamiento en los distintos procesos industriales. Este esquema permite identificar claramente cuánta energía está siendo utilizada y en qué etapas, lo cual es fundamental para determinar si existe vapor disponible que pueda ser redireccionado al secador de bagazo en la planta de peletizado sin afectar la operación de la planta; teniendo en cuenta que actualmente se encuentra en funcionamiento 2 turbo generadores y los otros 2 se encuentran standby (turbo de 2.5MW y turbo de 6MW) de emergencia.

La distribución del vapor en el ingenio se encuentra estandarizada en función de los requerimientos del proceso, dado que la planta también opera como cogeneradora de energía tanto para autoconsumo como para venta. En este contexto, el vapor producido por la Caldera 5 se destina principalmente al accionamiento de los molinos y a diversas etapas del proceso azucarero, como los

filtros tromel, evaporadores, tachos y otros equipos que requieren suministro continuo de vapor. Por su parte, el vapor generado por la Caldera DZ es aprovechado por el turbogenerador de 12MW, dedicado a la cogeneración eléctrica.

6.3. Consumo Energético

Una vez caracterizado el sistema de distribución de vapor, se procede a analizar la generación de energía eléctrica en el ingenio, con el propósito de evaluar si la demanda energética de la planta de peletización puede ser cubierta mediante el suministro interno. Este análisis resulta clave para garantizar la autonomía operativa del sistema sin generar sobrecargas en la red existente ni comprometer el consumo energético general de la planta.

La información utilizada para este estudio fue obtenida directamente del sistema de control (PLC) del ingenio, el cual permite llevar un registro detallado hora a hora de la generación, consumo y venta de energía eléctrica. Los datos fueron recolectados y organizados en una hoja de cálculo en formato Excel, que consolida los valores históricos y operativos necesarios para estimar la disponibilidad neta de energía. A partir de esta base, se establece la capacidad real del sistema para soportar el consumo adicional asociado al funcionamiento continuo de la planta de pellets.

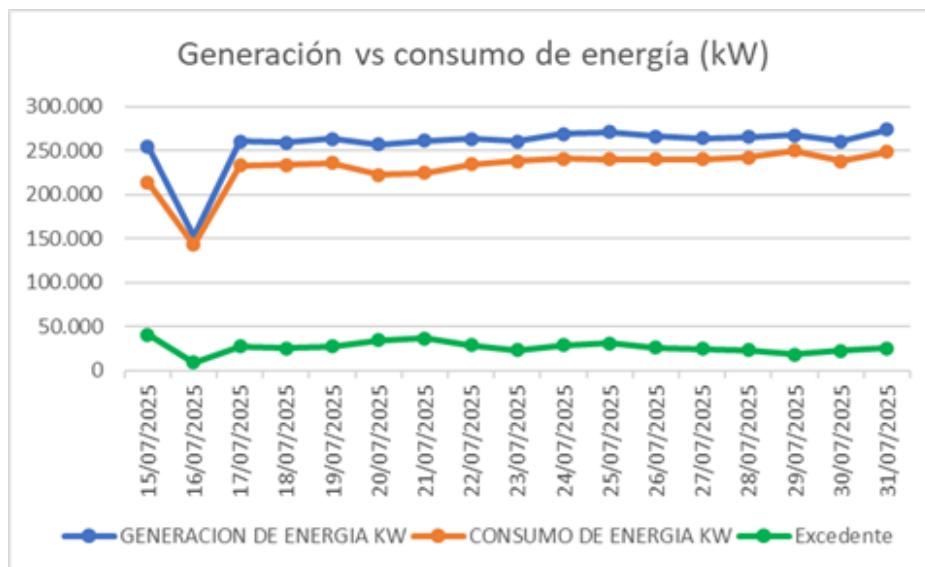


Figura 6.25: Consumo energético del ingenio.

6.4. Selección tecnológica de los componentes funcionales

Con base en los resultados obtenidos sobre la disponibilidad de bagazo, así como en los balances de masa, energía térmica y eléctrica, se procedió a la selección tecnológica de los principales equipos funcionales del sistema, siempre y cuando se cumplieran los requisitos establecidos por las normas de producción y exportación, como se indica en la sección 4.2. Esta selección se fundamentó en criterios técnicos y económicos, evaluados mediante matrices de decisión desarrolladas para cada componente.

6.4.1. Secador de bagazo

El secador constituye uno de los componentes térmicos más críticos en la línea de peletización, ya que de su rendimiento depende tanto la calidad final del pellet como la eficiencia del proceso global. Su función principal es reducir la humedad del bagazo desde valores del orden del 48 -52 % hasta un rango final entre 12 % y 15 %, conforme a las especificaciones técnicas de la norma ISO 17225-6 [18].

A partir de los resultados obtenidos en los balances de masa y energía en particular el balance térmico del secado desarrollado en la sección 6.1 y 6.2 se establecieron las condiciones de borde para la selección de esta unidad. Entre ellas se destaca la disponibilidad de vapor saturado como fuente térmica principal, lo que permitió delimitar las alternativas tecnológicas a sistemas compatibles con este vector energético.

Para la toma de decisión se consideraron múltiples criterios de evaluación, tanto técnicos como económicos. Dentro de los criterios técnicos se incluyeron: capacidad de evaporación (kg/h), temperatura de operación, compatibilidad con biomasa fibrosa y requerimientos energéticos. En cuanto a los criterios económicos, se contemplaron: costo de adquisición, consumo específico, mantenimiento estimado, y dimensiones generales. La ponderación relativa de cada criterio se definió con base en su impacto sobre el proceso y sobre los costos de inversión y operación.

En este contexto, se evaluaron tres alternativas tecnológicas disponibles en el mercado para aplicaciones con biomasa de características similares al bagazo de caña. La primera corresponde a un secador rotativo de tambor directo de la marca Dingli Group, equipado con un sistema de control PLC y capaz de operar con calefacción mediante gas, electricidad, vapor, biomasa o carbón. La segunda alternativa es un secador de banda marca Alvan Blanch, referencia PCD19400, que incorpora un sistema PLC y emplea biogás, vapor residual o gases calientes como fuentes de energía térmica. Finalmente, se analizó un secador rotativo tipo tromel de la marca Zhengzhou Jiutian Technology Machinery, modelo DLHG-2010, diseñado con calentamiento interno a vapor, transmisión por engranajes e intercambiador de calor integrado.

A continuación, se presenta la matriz de decisión construida para este componente, en la cual se compararon distintas tecnologías de secado disponibles en el mercado para aplicaciones con biomasa de características similares al bagazo de caña.

Parametros de selección secador								
Tecnologia	Agua evaporada (kg/h)	humedad inicial (%)	humedad final (%)	Vapor requerido (T/h)	potencia electrica (Kw)	Cantidad de bagazo a secar (T/h)	precio	Dimensiones (m)
Secador rotativo de tambor directo	620	50%	12±1%	0.7	30	0±0.1	USD \$75600	15×6
Secador de banda	1950	65%	12±1%	0	35	1	USD \$75000	20×7,5
Secador rotativo (Tromel)	760	48±5%	11±1%	1.1	22	1	USD \$ 73000	9×2

Cuadro 6.1: Matriz de selección secador de bagazo.

Como se observa en la Tabla 6.1, presenta los parámetros técnicos y económicos de las alternativas de secado evaluadas, lo que permite establecer una primera comparación entre su capacidad de evaporación, requerimientos energéticos, dimensiones y costos de inversión.

Matriz de decisión secador									
Tecnologia	Agua evaporada (kg/h)	humedad inicial (%)	humedad final (%)	Vapor requerido (T/h)	potencia electrica (Kw)	Cantidad de bagazo a secar (T/h)	precio	Dimensiones (m)	Valoracion
Secador rotativo de tambor directo	5	4	4	5	4,5	5	3,5	3,5	4,3125
Secador de banda	5	5	4	4,5	4	5	4	3	4,3125
Secador rotativo (Tromel)	5	5	5	4	5	5	5	5	4,875

Cuadro 6.2: Matriz de decisión secador de bagazo.

Anteriormente, en la Tabla 6.2 se incluye la matriz de decisión cuantitativa, en la cual se ponderaron criterios técnicos (capacidad de evaporación, demanda de vapor, potencia eléctrica y compatibilidad con biomasa fibrosa) y económicos (costo de inversión, mantenimiento y dimensiones). Como resultado de este análisis, la alternativa seleccionada fue el secador rotativo tipo tromel. Este equipo emplea un sistema de calentamiento interno a vapor, con tambor giratorio e intercambiador de calor tipo casco y tubos, lo que asegura un secado uniforme y estable en el rango de humedad requerido (12 - 15 %). Además, combina una eficiencia térmica adecuada con un consumo energético moderado y un costo de inversión competitivo, integrándose de manera coherente a las condiciones de borde definidas en el balance energético del proceso.



Figura 6.26: Secador de bagazo DLHG-2010.

6.4.2. Picador de bagazo

Como parte del pretratamiento del bagazo, se requiere reducir el tamaño de las partículas antes del secado y peletizado. Esta operación es fundamental para garantizar una adecuada homogeneidad del material, mejorar la eficiencia térmica del secador y asegurar un rendimiento óptimo en la compactación durante la formación del pellet. En este sentido, se evaluaron distintas tecnologías de desfibrado de bagazo, enfocadas en su capacidad de procesamiento, eficiencia de reducción de tamaño, consumo energético y viabilidad económica.

Para ello, se consideraron tres equipos comerciales diseñados específicamente para la trituración de residuos lignocelulósicos como paja, tusa de maíz o bagazo de caña de azúcar. El primero corresponde a una desfibradora de bagazo tipo martillo de doble etapa, marca RICH modelo 600, equipada con un sistema de enclavamiento de seguridad para mantenimiento y fabricada en acero inoxidable y acero al manganeso. El segundo equipo es una picadora de doble etapa marca Yinging, modelo FSY-2600-600, con capacidad para trabajar con motores de alta potencia y adecuada para múltiples aplicaciones industriales, como fábricas de papel, biocombustibles y fertilizantes orgánicos. Finalmente, se evaluó una trituradora de bagazo marca RICH, modelo HCS-MA-III, que incorpora un eje de martillo robusto y un diseño de rotor resistente al desgaste, optimizado para condiciones de trabajo exigentes.

Parametros de selección picadora							
Especificacion	potencia electrica (Kw)	Cantidad de bagazo a picar (T/h)	Tamaño final del (mm)	Eficiencia energetica (Kw/T)	Material martillos	precio	Dimensiones (m)
Desfibradora de bagazo	48,3	2±0.5	6±1	25	Acero al maganeso n°65 y tusteno	USD \$ 6900	1.5 x 4
Picadora de bagazo	30	1 a 2	6±1	30-15	acero aleado y tusteno	USD \$ 2800	2 X 1,5 X 2.8
Triturado de bagazo	45	1.5 - 2	5±1	30-22.5	Acero al maganeso n°65 mas proceso de temple y tusteno	USD \$ 8710	1.5 X 3 X 1.5

Cuadro 6.3: Matriz de selección secador de bagazo.

A partir de los parámetros técnicos recopilados, se construyó una matriz de decisión que permite comparar cuantitativamente las opciones disponibles. Esta matriz considera variables clave como potencia eléctrica, capacidad de procesamiento, eficiencia energética, tamaño final del bagazo, costo y materiales de fabricación, asignando puntajes que reflejan el desempeño relativo de cada equipo frente a los requerimientos del proceso. La combinación de estos criterios facilita una evaluación integral que no solo contempla el rendimiento operativo, sino también la viabilidad económica y la compatibilidad estructural con el diseño de la planta.

Matriz de decisión picadora								
Tecnologia	potencia electrica (Kw)	Cantidad de bagazo a picar	Tamaño final del (mm)	Eficiencia energetica (Kw/T)	Material martillos	precio	Dimensiones (m)	Valoracion
Desfibradora de bagazo	3	5	5	5	5	4	4	4,42857143
Picadora de bagazo	5	5	5	4,5	5	5	4,5	4,85714286
Triturado de bagazo	4,5	4,5	4,5	4	5	3	4,5	4,28571429

Figura 6.27: Matriz de decisión picador de bagazo.

Con base en los resultados obtenidos en la matriz de decisión, se seleccionó la desfibradora Mixxin Machinery modelo FSJ-2x600x600 como la opción más adecuada para el pretratamiento del bagazo. Este equipo destaca por su alta capacidad de procesamiento (2 t/h), bajo consumo energético (30 kW), dimensiones compactas y excelente relación costo-beneficio. Además, su sistema de corte con 140 martillos tratados térmicamente y su diseño estructural robusto permiten una integración eficiente en la línea de producción. Por tanto, se considera que esta picadora cumple con los criterios técnicos, económicos y operativos establecidos, consolidándose como la alternativa óptima para la valorización del bagazo previo al proceso de pelletizado.



Figura 6.28: Picador de bagazo FSJ-2X600x600

6.4.3. Mezcladora

Como parte del acondicionamiento del bagazo previo al proceso de pelletizado, se requiere una etapa de mezclado que garantice la homogeneidad del material y la correcta incorporación de aditivos. Esta operación es clave para asegurar la consistencia del pellet, mejorar la eficiencia en la compactación y estabilizar las propiedades físico-químicas del producto final.

Para ello, se evaluaron tres alternativas comerciales de mezcladoras: la primera es una mezcladora espiral, fabricada en acero al carbono con recubrimiento de pintura, que ofrece una alta homogeneidad (95 %) y una capacidad de mezcla de 3t/h, con un consumo energético de 2.5kW/t. La segunda opción corresponde a una mezcladora de cinta, con características similares en potencia y capacidad, pero con una homogeneidad ligeramente inferior (90 %). Finalmente, se consideró una mezcladora de doble eje, también en acero al carbono, que destaca por su mayor capacidad de mezcla (2,5 t/h), eficiencia energética superior (1.5kW/t) y alto nivel de homogeneidad (95 %), aunque con un costo más elevado.

Parametros de selección mezcladora							
Especificacion	potencia electrica (Kw)	Homogeneidad (%)	Material	Dimensiones (m)	Capacidad mezcla (t/h)	Eficiencia energetica (Kw/T)	precio
Mezclador espiral	7,5	95%	acero al carbono con un grosor de 8mm en las palas espirales	6.2 X 1X 1	3	2,5	USD \$ 3900
Mezclador doble cinta	7,5	99%	Acero al carbono	2.6 X 1 X 1.43	3	2,5	USD \$ 5640
Mezclador tipo paleta	15	95%	Acero al carbono	2.3 X 1.55 X 2	2,5	6	USD \$ 2800

Cuadro 6.4: Matriz de selección para la selección de la mezcladora de bagazo.

Con base en los parámetros técnicos recopilados, se construyó una matriz de decisión que permite evaluar de forma ponderada las alternativas disponibles. Esta matriz considera criterios operativos y funcionales como volumen útil, tiempo de mezclado, facilidad de limpieza, variación en la mezcla, confiabilidad y compatibilidad con la fuente de alimentación. A cada criterio se le asignó un peso

relativo según su importancia en el proceso, y se calificaron los equipos en función de su desempeño. Esta metodología facilita una selección objetiva, alineada con los requerimientos técnicos y operativos del sistema de pelletizado.

Parametros de selección mezcladora								
Especificacion	potencia electrica (Kw)	Homogeneidad (%)	Material	Dimensiones (m)	Capacidad mezcla (t/h)	Eficiencia energetica (Kw/T)	precio	Valoracion
espiral	5	4	5	4	5	5	4	4,571428571
Mezclador doble cinta	5	5	5	5	4,5	5	3	4,642857143
Mezclador tipo paleta	3	4	5	3	4,5	3	5	3,928571429

Cuadro 6.5: Matriz de decisión para la selección de la mezcladora de bagazo.

De acuerdo con los resultados obtenidos en la matriz de decisión la tabla 6.5, se seleccionó la mezcladora horizontal de doble cinta modelo MX-MX2350 de la empresa Mingxin como la opción más adecuada. Este equipo obtuvo la máxima puntuación en todos los criterios evaluados, destacando por su confiabilidad, eficiencia operativa y compatibilidad estructural con el sistema de procesamiento. Su diseño permite una mezcla homogénea del bagazo con los aditivos, optimizando la calidad del pellet final. Además, su configuración facilita el mantenimiento y la limpieza, lo que contribuye a la continuidad operativa y al cumplimiento de los estándares de producción.



Figura 6.29: Mezclador de bagazo y adictivo doble cinta MX-MX2350

6.4.4. Peletizadora

En la etapa final del proceso de valorización del bagazo, la peletización permite transformar la biomasa en un producto compacto, homogéneo y estandarizado conforme a la norma ISO 17225-6. Esta operación define propiedades clave del pellet como tamaño, densidad, resistencia mecánica y durabilidad, esenciales para su almacenamiento y comercialización como biocombustible.

Para ello, se evaluaron tres tecnologías de peletizadoras. La primera es una peletizadora de matriz anular, modelo MX-560 de la marca Mingxin, diseñada para compactar biomasa fibrosa como el

bagazo, equipada con bomba de aceite y gabinete eléctrico. La segunda opción corresponde a una peletizadora horizontal de engranajes, modelo M2LH420 de la marca RICHI, con alimentación forzada por doble tornillo, motor Siemens, control por variador de frecuencia y matriz de acero aleado 42CrMo, destacando por su eficiencia 98 % y sistema de protección por pasador de seguridad. Finalmente, se consideró una peletizadora de matriz anular con engranajes, modelo KLJ-420, con transmisión por engranajes de acero aleado, rodamientos y ejes forjados, y una matriz de liberación rápida, diseñada para biomasa de alta densidad.

Parametros de selección peletizadora							
Tecnologia	Diametro del pellet (mm)	humedad final pellet (%)	potencia electrica (Kw)	Capacidad a procesar (T/h)	Eficiencia energetica (Kw/T)	Dimensiones (m)	precio
Peletizadora anular	4-12mm	15-20	90	1-1,5	90-60	2.6 X 1 X 2.4	USD \$15400
Peletizadora horizontal de engranajes	2-20mm	12-18%	90	1	90	2.6 X 1 X 2.4	USD \$28800
Peletizadora anular	8-12mm	12-15%	94,5	0,9-1,1	105-86	2.9 X 1.1 X 2.3	USD \$14800

Cuadro 6.6: Matriz de decisión para la peletizadora de bagazo.

Con base en las características técnicas de cada tecnología, se construyó una matriz de decisión que permite evaluar el desempeño de las peletizadoras en función de parámetros operativos como temperatura de trabajo, humedad del material, tamaño de partícula y densidad aparente. Estos criterios fueron ponderados según su impacto en la calidad del pellet y la eficiencia del proceso, permitiendo una comparación objetiva entre las alternativas disponibles. La integración de esta matriz con los parámetros técnicos facilita una selección fundamentada, alineada con los requerimientos normativos y productivos del sistema.

Parametros de selección peletizadora								
Tecnologia	Diametro del pellet (mm)	humedad final pellet (%)	potencia electrica (Kw)	Capacidad a procesar (T/h)	Eficiencia energetica (Kw/T)	Dimensiones (m)	precio	Valoracion
Peletizadora anular	3	4	5	5	5	5	4,5	4,5
Peletizadora horizontal de engranajes	5	4,5	5	5	4,5	5	3	4,57
Peletizadora anular	1	4	4,5	5	4	4	5	3,93

Figura 6.30: Matriz selección peletizadora.

De acuerdo con los resultados obtenidos en la evaluación técnica y la matriz de decisión, se seleccionó la peletizadora horizontal de engranajes modelo M2LH420 de la marca RICHI como la opción más adecuada para el proceso de compactación del bagazo. Este equipo combina alta eficiencia energética (98 %), robustez estructural, alimentación forzada y control de velocidad, lo que garantiza una producción estable y pellets de alta calidad. Su sistema de protección mecánica y su configuración de matriz en acero aleado aseguran durabilidad y confiabilidad operativa. Por

tanto, se considera que esta tecnología cumple con los criterios técnicos, normativos y económicos establecidos, consolidándose como la alternativa óptima para la etapa de peletizado.



Figura 6.31: Peletizadora de biomasa MZLH420

6.4.5. Tamizadora

Para la etapa de clasificación final del pellet, se evaluaron tres tecnologías de tamizado con el objetivo de garantizar la calidad del producto y minimizar pérdidas por finos. La primera opción corresponde a una criba vibratoria marca RICHI, modelo SFJZ63CE1, con sistema de rebote y estructura optimizada para reducir el desgaste. La segunda es una tamizadora rotativa modelo RT805 de Mingxin, con tambor de cribado de 800CE1500mm. Finalmente, se consideró una tamizadora cilíndrica marca DINGLI, modelo TS150, con criba de una sola capa, carcasa completamente sellada y sistema de impulso de 1.5mm, destacando por su eficiencia y bajo nivel de contaminación.

Parametros de selección tamizadora					
Tecnologia	Capacidad a procesar (T/h)	potencia electrica (Kw)	Dimensiones (m)	Eficiencia energetica (Kw/T)	Precio
Tamiz vibratorio	2	0,25	2,2 X 1,5 X 2,5	0,125	USD \$1950
Tamizadora rotativa	2	3	2 X 1 X 1,85	1,5	USD \$1501
Tamizadora rotativa	1,5-2,5	3	1,5 X 1 X 3	1,2-2	USD \$3200

Cuadro 6.7: Matriz de decisión para la tamizadora de pellets.

Con base en las especificaciones técnicas de cada alternativa, se construyó una matriz de decisión que permite comparar su desempeño en función de criterios como eficiencia de separación, facilidad de mantenimiento, robustez estructural y compatibilidad con el sistema de producción. Esta herramienta complementa la evaluación técnica y facilita una selección objetiva, alineada con los requerimientos operativos y de calidad establecidos en el proceso de peletizado.

Parametros de selección tamizadora						
Tecnologia	Capacidad a procesar (T/h)	potencia electrica (Kw)	Dimensiones (m)	Eficiencia energetica (Kw/T)	Precio	Valoracion
Tamiz vibratorio	5	5	3	5	3	4,2
Tamizadora rotativa	5	3	5	2	5	4
Tamizadora rotativa	5	3	4	2	1	3

Cuadro 6.8: Matriz de selección para la tamizadora de pellets.

De acuerdo con los resultados de la matriz de decisión, se seleccionó la criba vibratoria RICHI modelo SFJZ63CE1 como la alternativa más adecuada para la etapa de clasificación. Este equipo destaca por su diseño compacto y por su alta eficiencia en la separación de finos, lo que permite mantener la uniformidad del pellet y reducir las pérdidas de material. Asimismo, su capacidad de reprocesamiento favorece la reincorporación de partículas fuera de especificación, incrementando el aprovechamiento de la biomasa. Finalmente, la incorporación de un sistema elástico con rebote controlado contribuye a disminuir el desgaste mecánico, prolongando la vida útil de los componentes y garantizando un rendimiento operativo estable y eficiente en el tiempo.



Figura 6.32: Tamizadora de pellets TS150.

6.4.6. Empacadora

Para la etapa final del proceso, se evaluaron tres tecnologías de empacado automatizado, todas con sistemas PLC integrados. La primera opción, modelo DSC-500M, cuenta con microcontrolador, transporte ajustable y sellado continuo, con capacidad de 6-8 bolsas/min y precisión del 0,2 %. La segunda, modelo ID880, incorpora sistema de pesaje de alta precisión (0,2 %) y capacidad de 5-8 bolsas/min. La tercera, modelo ID500, ofrece pesaje y sellado automático con capacidad de 5-10 bolsas/min; Asi como s

Parametros de selección empacadora							
Tecnologia	Bolsas (kg)	Precision (%)	Capacidad empaque (bolsas/min)	potencia electrica (Kw)	Dimensiones (m)	Eficiencia energetica (Kw/Bolsa)	Precio
Empacadora PLC DSC-500M	50 -10	± 0,2	6 - 8.	1	2.5 X 2 X 1.5	0.125-0.16	USD \$ 4500
Empacadora PLC ID880	15-25	± 0,2	5 - 8.0	5	2 X 2 X 1	0,6-1	USD \$ 3499
Empacadora PLC ID500	50 -10	± 0,1	13-15	3	2.5 X 1 X 1	0,2	USD \$ 3500

Cuadro 6.9: Matriz de decisión para la empacadora de pellets.

Para complementar la evaluación técnica, se aplicó un análisis comparativo centrado en variables operativas clave como precisión de dosificación, capacidad de empaque, consumo energético por unidad y compatibilidad dimensional con el sistema de producción. Este enfoque permitió identificar la tecnología que mejor se adapta a los requerimientos de automatización, eficiencia y confiabilidad en la etapa final del proceso.

Parametros de selección empacadora								
Tecnologia	Bolsas (kg)	Precision (%)	Capacidad empaque (bolsas/min)	potencia electrica (Kw)	Dimensiones (m)	Eficiencia energetica (Kw/Bolsa)	Precio	Valoracion
Empacadora PLC DSC-500M	5	3	1	5	1	5	1	3
Empacadora PLC ID880	3	3	1	1	3	1	5	2,43
Empacadora PLC ID500	5	5	5	3	5	4	4	4,4

Cuadro 6.10: Matriz de selección para la empacadora de pellets.

Tras el análisis comparativo, se seleccionó la empacadora modelo ID500 como la opción más equilibrada. Su sistema automático de pesaje y sellado, alta precisión (0,2%), capacidad media de producción (5-10 bolsas/min) y eficiencia energética (0.25kW/bolsa) la convierten en una solución robusta, precisa y compatible con los requerimientos de empaque para pellet de bagazo.



Figura 6.33: Empacadora de pellets DSC-50W.

6.5. Matriz de cumplimiento

En la siguiente tabla se presenta una matriz de cumplimiento en la cual se presenta cada uno de los requerimientos planteados para el proyecto. Explicando la solución que se tomó para cada uno de estos y su estado actual en el proyecto.

Código	Descripción del requerimiento	Estado	Solución implementada
RE-1	Remueve arena y partículas finas del bagazo para evitar desgaste en equipos, prevenir incendios y cumplir con estándares de calidad del pellet.	Cumplido	Se seleccionó la tamizadora rotativa modelo TS150, 3 kW, para separación eficiente de impurezas y metales.
RE-2	Reducir el tamaño del bagazo a fibras 1 cm para facilitar la compactación en la peletizadora.	Cumplido	Se seleccionó la Picadora RICHI SPH-300, 37 kW, rotor de cuchillas múltiples. Seleccionada por su eficiencia y compatibilidad con bagazo y diámetro final de picado.
RE-3	Reducir la humedad del bagazo picado hasta un 1015 % para asegurar la eficiencia del prensado en la peletizadora.	Cumplido	Secadora rotativa triple paso modelo RICHI HGJ-1.2E10, seleccionada por su alta capacidad de evaporación y eficiencia térmica.
RE-4	Mezclar el bagazo seco con un aglutinante (glicerina, miel) para asegurar la cohesión de las fibras durante el prensado.	Cumplido	Mezcladora de doble cinta horizontal, seleccionada por su capacidad de homogeneizar materiales fibrosos con alta eficiencia.
RE-5	Compactar la mezcla de bagazo y aglutinante mediante presión controlada, formando pellets cilíndricos uniformes.	Cumplido	Peletizadora RICHI MZLH420, seleccionada por su alta eficiencia de compactación (298 %), alimentación forzada y resistencia al desgaste.
RG-1	Minimizar el contenido de finos en el producto final, asegurando que no supere los límites establecidos por la norma UNE-EN ISO 18846.	Cumplido	El cumplimiento del parámetro se logra gracias a la eficiencia de compactación de la peletizadora RICHI MZLH420 (298 %) y la acción de cribado de la tamizadora rotativa.
RG-2	Garantizar una alta durabilidad mecánica de los pellets, según la norma UNE-EN ISO 17831-1.	Cumplido	La compactación eficiente en la peletizadora RICHI MZLH420 permitió obtener pellets con una durabilidad mecánica superior al 97 %, cumpliendo estándares internacionales.
RG-3	Asegurar una densidad a granel adecuada del pellet, conforme a la norma UNE-EN ISO 17828.	Cumplido	Se seleccionó la peletizadora RICHI MZLH420 y al acondicionamiento óptimo del bagazo, se logró una densidad a granel superior a 600 kg/m ³ .
RG-4	Controlar la humedad del bagazo dentro del rango óptimo (1015 %).	Cumplido	Se seleccionó un sistema de secado térmico que reduce la humedad desde 50 % hasta 13 %, mejorando la eficiencia del pelletizado.
RG-5	Controlar el porcentaje de cenizas no combustibles en el pellet, según la norma ASTM E1755.	Cumplido	Se incorporó una tamizadora vibratoria al inicio y final del proceso para eliminar impurezas minerales, reduciendo el contenido de cenizas.
RG-6	Garantizar un poder calorífico superior (PCS) adecuado en los pellets, según norma ASTM E1757-01 y D5865-13.	Cumplido	El PCS se logró mediante una correcta selección del proceso de secado, peletización y el uso de aglutinantes como glicerina y miel B.

Cuadro 6.11: Matriz de cumplimiento.

6.6. Representación gráfica de la solución propuesta.

6.6.1. Matriz IDEF0 de la solución propuesta

Una vez concluido el proceso de análisis técnico y económico para la selección de los equipos funcionales del sistema, y validada su correspondencia con los requerimientos operacionales y normativos establecidos, se procede a representar la solución tecnológica integral mediante una actualización del modelo funcional IDEF0 así como se mostró en el capítulo 5 . Esta representación incorpora directamente los equipos seleccionados en cada función principal del proceso, lo cual permite visualizar cómo la configuración final del sistema se articula con la lógica funcional previamente definida.

De este modo, la representación funcional final no solo permite verificar la coherencia entre los objetivos operativos y la estructura del sistema, sino que además valida la pertinencia de los equipos definidos a partir de criterios técnico-funcionales, consolidando una solución tecnológica alineada con las condiciones reales del ingenio y los requisitos del proceso de pelletizado.

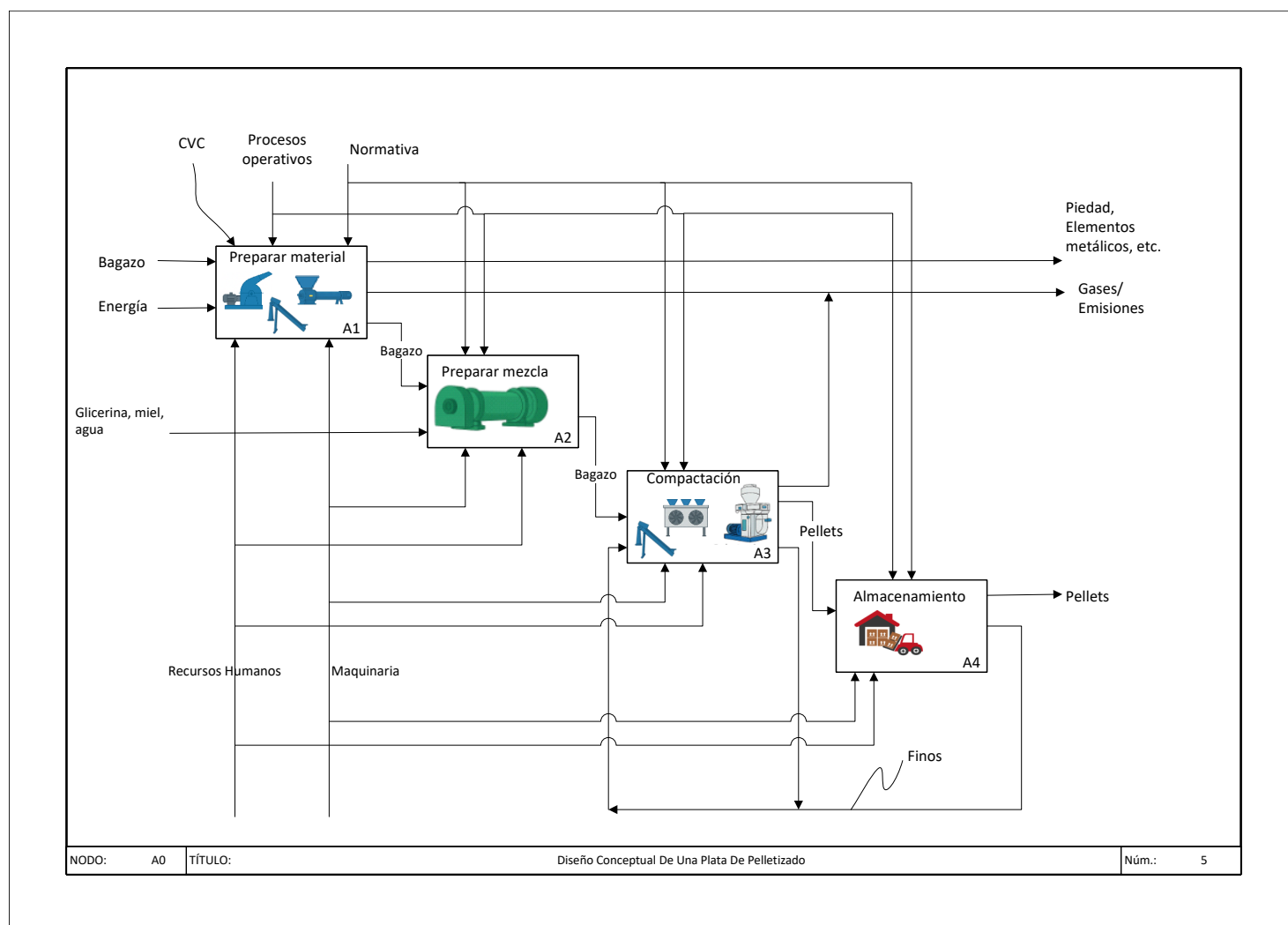


Figura 6.34: Arquitectura funcional de la solución propuesta.

6.6.2. Esquema funcional propuesto

La solución planteada corresponde al resultado de un proceso metodológico en el que se articularon los parámetros de diseño, las condiciones de operación y los criterios de selección tecnológica de cada uno de los equipos que conforman la planta piloto de peletizado. Este procedimiento permitió consolidar una configuración integral del sistema, garantizando la coherencia funcional entre las diferentes etapas del proceso y asegurando el cumplimiento de los estándares de calidad definidos por la normativa ISO 17225-6 para pellets de biomasa no leñosa.

La propuesta se fundamenta en una secuencia operativa estructurada y validada mediante el modelo IDEF0, que facilitó la definición de interrelaciones entre los componentes principales, tales como secador, mezcladora, peletizadora, enfriador, criba y empacadora. La selección de cada equipo se realizó bajo un análisis técnico riguroso que consideró criterios de desempeño, eficiencia energética, confiabilidad operativa y adaptabilidad al bagazo de caña de azúcar como materia prima.

De esta manera, la solución propuesta representa un diseño conceptual robusto y funcional, sobre el cual se establecerán los planos de implantación, las configuraciones de distribución en planta y las especificaciones necesarias para el dimensionamiento y futura implementación del sistema.

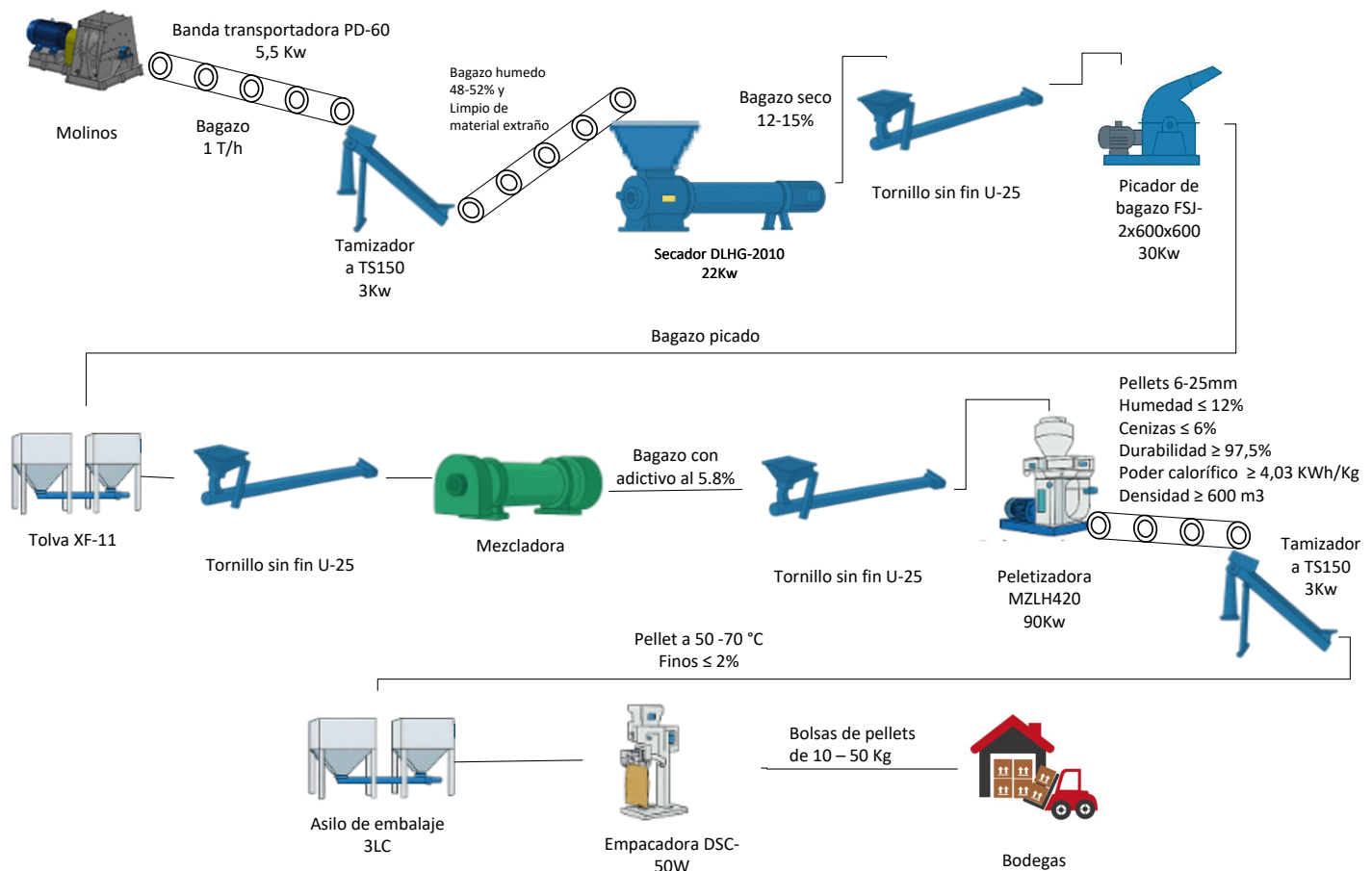


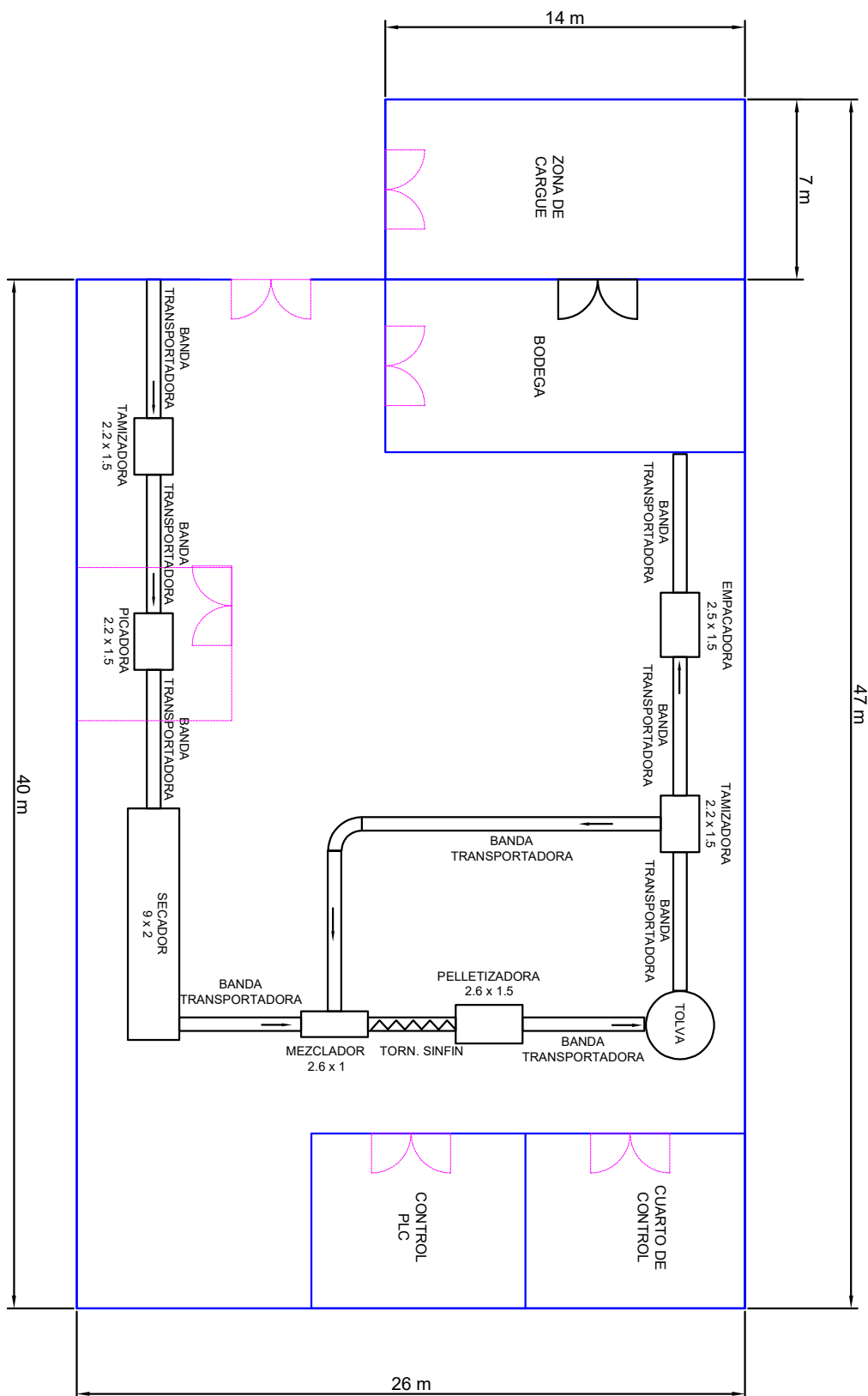
Figura 6.35: Esquema funcional del sistema de peletizado propuesto.

6.6.3. Layout de la planta propuesta

El diseño del layout de planta permite visualizar la distribución física de los equipos seleccionados para el procesamiento de pellet de bagazo, garantizando una secuencia lógica, eficiente y segura en cada etapa del proceso. Esta disposición considera las dimensiones reales de cada máquina, las necesidades de operación, mantenimiento y flujo de materiales, así como la integración de elementos auxiliares como tolvas, bandas transportadoras y zonas de almacenamiento.

Para una representación gráfica, se elaboró un plano técnico en AutoCAD que detalla la ubicación de cada equipo dentro del área disponible, respetando proporciones reales y distancias operativas mínimas. Esta herramienta permitió validar la compatibilidad espacial entre unidades como la picadora, secadora, mezcladora, peletizadora, tamizadoras, empacadora y bodega, asegurando una configuración funcional y escalable.

Figura 6.36: Layout de la planta propuesta.



CAPÍTULO 7: Estimación de costos de la solución propuesta

7.1. Costos

Con base en la configuración tecnológica definida y validada en los capítulos anteriores, se procede a realizar la estimación de costos asociados a la implementación de la planta piloto de pelletizado. Esta estimación considera los distintos componentes que intervienen en el proyecto, organizados en categorías que permiten identificar los principales rubros de inversión y operación.

Para ello, se han construido tablas de costos en Excel que consolidan la información técnica y económica de los equipos seleccionados, los requerimientos energéticos, la infraestructura auxiliar, la mano de obra, los consumos operativos y los insumos necesarios para el funcionamiento continuo del sistema. Estos datos permiten proyectar el comportamiento económico del sistema tanto en su fase inicial de montaje como en su operación sostenida.

El objetivo de esta sección es presentar de manera estructurada y transparente los costos asociados al sistema propuesto, permitiendo con ello evaluar su viabilidad económica y sentar las bases para un análisis posterior más detallado si el proyecto se lleva a escala industrial o comercial.

7.1.1. Estimación de costos de equipos principales

En la Tabla 7.12 se presentan los costos de inversión asociados a los equipos principales de la planta de pelletizado, los cuales corresponden a los componentes críticos del proceso previamente seleccionados mediante criterios técnico-económicos. La estimación considera el valor comercial unitario de cada equipo, según sus características geométricas, potencia eléctrica y eficiencia energética.

Estos equipos constituyen la base operativa del sistema, desde la preparación y acondicionamiento del bagazo hasta la producción y adecuación final de los pellets. Su adquisición representa la mayor proporción del capital fijo requerido, por lo que esta tabla proporciona un insumo fundamental para el dimensionamiento económico del proyecto.

Equipos propuestos				
equipo	dimensiones	potencia electrica (Kw)	Eficiencia energetica (Kw/T)	precio
Secador rotativo (Tromel)	10 x 2	22	18.3	\$ 293.606.000
Picadora de bagazo	2 X 1,5 X 2.8	30	30-15	\$ 11.261.600
Mezclador tipo paleta	2.3 X 1.55 X 2	15	10	\$ 11.261.600
Peletizadora horizontal de engranajes	2.6 X 1 X 2.4	90	90	\$ 115.833.600
Tamizadora rotativa	1,5 X 1 X 3	3	1,2-2	\$ 12.870.400
Empacadora PLC	2.5 X 2 X 1.5	1	0.125-0.16	\$ 18.099.000
TOTAL		161	-	\$ 462.932.200

Cuadro 7.12: Costos de equipos principales.

7.1.2. Estimación de costos de equipos secundarios

Además de los equipos principales, la planta requiere de una serie de componentes auxiliares que resultan fundamentales para garantizar la continuidad, eficiencia y seguridad operativa del proceso de pelletizado. Estos elementos no participan directamente en la transformación del bagazo, pero son esenciales para su transporte, alimentación, acondicionamiento y empaque. La Tabla 7.13 presenta el detalle de los costos asociados a estos equipos auxiliares, entre los que se incluyen tolvas de recepción y almacenamiento, bandas transportadoras, tornillos sinfín para alimentación interna, sistemas de recolección de polvo y estructuras para empaque final. Cada uno de estos elementos ha sido seleccionado considerando su compatibilidad con los equipos principales y su capacidad para operar de manera sincronizada dentro del flujo de producción.

Equipos adicionales			
equipo	Modelo	potencia electrica (Kw)	precio
Banda transportadora de alimentacion	PD-60	5,5	\$ 5.228.600
VTI	5-48-5C	7,5	\$ 3.619.800
Tolva	XF-11	1,1	\$ 8.446.200
Tornillo de alimentacion	U-25	3	\$ 5.228.600
Tolva	XF-10	0,1	\$ 8.446.200
TOTAL		17,2	\$ 30.969.400

Cuadro 7.13: Costos de equipos secundarios.

7.1.3. Estimación de costos de la energía eléctrica

Uno de los principales costos operativos recurrentes de la planta está asociado al consumo de energía eléctrica requerido para el funcionamiento continuo de los equipos. La Tabla 7.14 presenta el desglose de este consumo, diferenciando entre los equipos principales del proceso y los equipos auxiliares necesarios para el transporte, acondicionamiento y apoyo al sistema de peletización.

COSTO ENERGIA ELECTRICA				
Equipo	Consumo (Kw)	Horas de uso mensual	Costo energia	Total
Equipos propuestos	161	24	\$ 950	\$ 3.670.800
Equipos adicionales	18,2	24	\$ 950	\$ 414.960
TOTAL				\$ 4.085.760

Cuadro 7.14: Costos en energía eléctrica.

7.1.4. Estimación de costos de personal operativo.

El funcionamiento continuo de la planta requiere de un equipo humano que garantice la operación segura, eficiente y estable de cada una de las etapas del proceso. La Tabla 7.15 presenta el desglose mensual de los costos asociados al personal operativo necesario para cubrir tres turnos diarios, contemplando funciones técnicas, logísticas y de mantenimiento.

COSTO PERSONAL OPERATIVO				
personal	Personal por turno	Personal por día	Salario	Total
Supervisor	1	3	\$ 3.500.000	\$ 10.500.000
Operario de planta (PLC)	1	3	\$ 2.800.000	\$ 8.400.000
Auxiliar operario	1	3	\$ 2.000.000	\$ 6.000.000
Empacador	4	12	\$ 2.500.000	\$ 30.000.000
Mecanico de turno	1	3	\$ 3.000.000	\$ 9.000.000
Auxiliar mecanico	1	3	\$ 2.000.000	\$ 6.000.000
TOTAL	9	27	-	\$ 69.900.000

Cuadro 7.15: Costos en personal operativo.

7.1.5. Estimación de costos de insumos.

El funcionamiento sostenido de la planta requiere, además de energía y personal, una serie de insumos fundamentales para el desarrollo del proceso de pelletizado. La Tabla 7.16 presenta los principales materiales requeridos para operar el sistema, incluyendo tanto el recurso base (bagazo de caña) como los aditivos necesarios para mejorar las propiedades físicas y energéticas del pellet final.

COSTO INSUMOS			
Material	Cantidad	Precio	Total
Energia electrica	179,2	\$ 4.085.760	\$ 4.085.760
Bagazo	1 T	\$ 80.000	\$ 80.000
Miel B	1 T	\$ 1.250.000	\$ 1.250.000
Glicerina	1 Gal	\$ 54.300	\$ 54.300
TOTAL			\$ 5.470.060

Cuadro 7.16: Costos de insumos para la producción.

7.1.6. Estimación de costos Totales.

La Tabla 7.17 presenta el consolidado final de los costos estimados para la implementación y operación mensual de la planta piloto de pelletizado. En esta tabla se integran todos los componentes analizados en las secciones anteriores, incluyendo la inversión en equipos principales y auxiliares, los costos operativos por consumo energético, personal, insumos, y el mantenimiento técnico del sistema.

Para el cálculo del costo de adicionales se consideró un valor equivalente al 10 % del total de inversión en equipos, tanto principales como secundarios. Este valor fue tenido en cuenta debido a los imprevistos generados en la ejecución del proyecto.

$$\begin{aligned}\text{Equipos primarios} &= \$462,932,200 \\ \text{Equipos secundarios} &= \$30,696,400 \\ \text{Total} &= \$462,932,200 + \$34,187,000 \\ \text{Adicionales} &= 0,1 (\text{Total}) \\ \text{Adicionales} &= 0,1 (\$493,628,600) \\ \text{Adicionales} &= \$49,711,920\end{aligned}\tag{7.11}$$

El resultado global muestra un costo total estimado de **\$618.661.820 COP**, el cual representa la base para posteriores análisis económicos, como el costo por tonelada de pellet producida, retorno sobre la inversión o comparación con sistemas alternativos.

COSTO TOTALES	
Descripcion	Total
Equipos propuestos	\$ 462.932.200
Equipos adicional	\$ 30.969.400
Personal operativo	\$ 69.900.000
Insumos	\$ 5.470.060
Adicionales	\$ 49.390.160
TOTAL	\$ 618.661.820

Cuadro 7.17: Costos Totales.

CAPÍTULO 8: Conclusiones y trabajos futuros

8.1. Conclusiones

Basado en lo expuesto, se concluye que la metodología propuesta permitió alcanzar el objetivo planteado una vez que se presenta la síntesis de una planta productora de pellets a base de bagazo de caña de azúcar con una capacidad de producción de 500 kg/h para un aprovechamiento energético; A continuación se presentaran aspectos relevantes derivados del desarrollo de este proyecto:

- El diseño conceptual de la planta peletizadora de un combustible solido basado en el bagazo fortalece la sustentabilidad de la organización Riopaila Castilla, una vez que se aprovecha un subproducto abundante en el proceso de molienda del Ingenio, el cual posee un alto potencial como biomasa sólida para fines energéticos. Su valorización mediante peletización permite transformar un residuo agrícola en un biocombustible con características físico-químicas estables, lográndose una solución técnica sostenible alineada con la economía circular.
- El diseño conceptual planteado esta acorde a los requerimientos de la norma ISO 17225-6, logrando definir y controlar parámetros fundamentales tales como la humedad, el contenido de finos, la durabilidad mecánica, tamaño, la densidad a granel y el poder calorífico. Estos lineamientos normativos guiaron tanto la caracterización del bagazo como la validación del producto final.
- El diseño conceptual planteado integra soluciones tecnológicas comerciales lo cual facilita la viabilidad técnica para implementar la solución planteada.
- El análisis económico integral que incluyó la inversión en equipos principales y secundarios, costos por consumo energético, costos operativos asociados al recurso humano, consumo de insumos y mantenimiento estimado. Este análisis es básico para la proyección de viabilidad financiera del proyecto en futuros estudios de implementación.

8.2. Trabajos Futuros

A partir del desarrollo de este proyecto de diseño conceptual, se identifican diversas líneas de trabajo complementarias que permitirán llevar la planta piloto de pelletizado a una etapa de ejecución, validación a escala real y posible comercialización. Entre los trabajos futuros más relevantes se destacan:

- **Diseño estructural y obra civil de la planta**
 - Es necesario desarrollar la ingeniería de detalle para la infraestructura física que alojará el sistema de pelletizado. Esto incluye la distribución de áreas de operación, cimentación para maquinaria, disposición de equipos auxiliares, rutas de acceso, sistemas de ventilación, análisis de vibración a la infraestructura civil, almacenamiento y medidas de seguridad industrial.
- **Análisis económico detallado y estudio de costo-beneficio**
 - Se propone la elaboración de un estudio financiero integral que incluya la estimación detallada del costo por tonelada producida, así como el cálculo de indicadores como el Valor Presente Neto (VPN), la Tasa Interna de Retorno (TIR), el Periodo de Recuperación de la Inversión (PRI) y escenarios de sensibilidad frente a variaciones de los costos energéticos y de insumos. Este análisis debe complementarse con un estudio de mercado que permita identificar oportunidades de comercialización del pellet de bagazo, evaluar la demanda en sectores industriales o rurales, analizar la competencia, establecer precios de venta y definir los canales de distribución más adecuados. Asimismo, deberá considerarse el cumplimiento normativo y los requisitos de certificación que habiliten su inserción en mercados regulados.
- **Mejora energética y análisis de cogeneración**
 - Una línea de mejora consiste en estudiar la integración del sistema de pelletizado con la cogeneración existente en el ingenio azucarero, para optimizar el uso del vapor disponible y reducir los costos operativos asociados al secado térmico del bagazo.
- **Escalado industrial del sistema**
 - Una vez validado el sistema piloto, se podrá avanzar en su escalamiento hacia una planta de mayor capacidad. Este proceso requerirá ajustar balances de masa y energía, reforzar estructuras, aumentar automatización y reevaluar condiciones de operación a mayor escala.

Bibliografía

- [1] Francy Zuleima Roa Piñeros, Oscar Adalberto Bustamante Campos et al. “Enseñanza de energías renovables en la Institución Educativa Guanegro como alternativa a la generación de electricidad de fuentes fósiles”. En: (2023).
- [2] Metropolitana Valle de Aburrá. “Energías renovables”. En: *Área Metropolitana*. <https://www.metropol.gov.co/ambiental/Paginas/consumo-sostenible/Energias-Renovables.aspx> (accedido el 9 de agosto de 2022) (2019).
- [3] Germán Corredor. “Colombia y la transición energética”. En: *Ciencia política* 13.25 (2018), págs. 107-125.
- [4] Luis Alberto Toscano Morales. “análisis de los parámetros y selección de hornos para la”. En: (2010).
- [5] Angélica María Vargas Lazo. “Estudio de la producción de pellets a partir de borra de café”. Tesis doct. 2018.
- [6] Juan Carlos Pinilla Suárez et al. “Comparación de la normativa nacional y europea para la producción de pellet de madera”. En: (2022).
- [7] Steven Rodrigo Aga Vera y María Emperatriz Rodríguez Gordillo. “Aprovechamiento de biomasa a partir de bagazo de cebada de malta para la elaboración de pellets como biocombustible”. B.S. thesis. Universidad de Guayaquil. Facultad de Ingeniería Química, 2021.
- [8] tu deshollinador. *historia del pellet: origen, evolución y actualidad*. 2020. URL: <https://tudeshollinador.com/historia-pellet/>.
- [9] Armando C Agüero et al. “Poder calorífico del bagazo de caña de azúcar”. En: *Revista de Ciencias Exactas e Ingeniería* 13.24 (2004), págs. 33-37.
- [10] G Antolin y DENY OLIVA. “Caracterización del bagazo de caña de azúcar mediante análisis térmico”. En: *Inf. Tec* 14 (2003), págs. 3-25.
- [11] Simón Cortés y Adriana Arango Londoño. “Energías renovables en Colombia: una aproximación desde la economía”. En: *Revista Ciencias Estratégicas* 25.38 (2017), págs. 375-390.
- [12] Guillermo González Yánquez. “Diseño de una planta de peletización en Castilla y León”. B.S. thesis. 2012.
- [13] Jesús Fernández. “Energía de la biomasa”. En: *Energías renovables para el desarrollo. Thomson-Paraninfo* (2003), págs. 2-20.
- [14] CEUPE centro europeo de postgrado. *Biomasa, te enseñamos sobre biomasa*. 2022. URL: <https://www.ceupe.cl/blog/conoce-los-tipos-de-biomasa.html>.
- [15] Francisco Marcos Martin. *Pellets y briquetas*. 2000. URL: https://infomadera.net/uploads/articulos/archivo_2293_9990.pdf.

- [16] Carlos O Alderetes. “Calderas a bagazo: Proyecto, operación y mantenimiento”. En: *Buenos Aires, Argentina* (2016).
- [17] Armando Patiño Olivares. *Introducción a la ingeniería química: balances de masa y energía. Tomo I*. Universidad Iberoamericana, 2000.
- [18] Juan Carlos Pinilla Suárez et al. “Normativas aplicables a la producción de pellet en Chile”. En: (2021).
- [19] Adilah Shariff et al. “Corn cob as a potential feedstock for slow pyrolysis of biomass”. En: *J. Phys. Sci* 27.2 (2016), págs. 123-137.