



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

INGENIERÍA EN MANTENIMIENTO INDUSTRIAL

Proyecto.

“Justificación de la sustitución de una caldera de bunker por una caldera de biomasa por Eco Solutions en Bridgestone de Costa Rica”.



Informe de Práctica de Especialidad para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en Mantenimiento Industrial.

Eco Solutions

Bridgestone de Costa Rica

Yonder Alberto Miranda Gamboa

Cartago 2014



engineerscanada

Escuela Acreditada por el
Canadian Engineering Accreditation Board (CEAB)

Profesor Guía.

Ing. Guillermo Villalobos Rodríguez.

Asesor Industrial.

Ing. Javier Berzosa Corella.

Dedicatoria

A Dios por haberme ayudado a superar las dificultades del camino, por darme la fuerza para dejar mi hogar y a mi familia en la búsqueda de un mejor futuro y por siempre estar presente en cada uno de mis pasos que me han traído hasta este día.

A mi madre por ser mi apoyo incondicional, por haberme consolado en tantas noches de soledad y dolor, por formar parte de mis momentos de felicidad y de tristeza, por siempre escucharme hablándole de todo lo que había aprendido aun cuando tal vez no entendía lo que le decía, por ser uno de mis motivos para seguir adelante en la lucha de alcanzar la meta propuesta hace ya seis años, por ser mi luz a la distancia de una llamada telefónica y por ser la mejor madre que un hijo podría tener. Muchas gracias mami por darme tanto amor y cariño durante toda mi vida.

A mi padre por estar siempre dispuesto a dejarlo todo para darme su ayuda cuando la he necesitado, por darme la oportunidad de convertirme en ingeniero y por darme su confianza incondicional, por enseñarme a ser una persona perseverante, de carácter, por inculcar en mi el deseo de superación, por escucharme y aconsejarme cuando he tenido problemas, por darme todo lo que siempre necesite a costa de privarse de muchas cosas. Gracias papi por regalarme tu amor, tu cariño y por alcanzar juntos esta meta.

A mis hermanas Grettel y Karol por darme su ayuda en todo momento, por tantas veces que me extendieron su mano para que yo pudiera salir adelante, por estar siempre a mi lado y hacerme sentir bienvenido cada vez que llegaba a la casa, por enseñarme a ser un buen hermano, gracias.

A mi hermano Hansel por ser siempre mi modelo a seguir, por estar al pendiente de cómo estaba, como salía en los exámenes, cuando iba a la casa, como me sentía, por ser el ídolo que todo hermano menor ve en su hermano mayor, muchas gracias Han.

A todos aquellos que han participado de alguna u otra manera para que yo lograra alcanzar este día, mis amigos y familiares, nunca olvidare todo lo que han hecho por mí.

Agradecimientos

A Dios por guiar cada uno de mis pasos, por iluminarme en cada tarea, cada quiz, cada examen, por poner en mi camino a mis amigos que se han convertido en mis hermanos, por darme la salud y la vida para alcanzar este sueño.

A mis padres y hermanos por ser mi apoyo a la distancia, por estar siempre pendientes de mi bienestar y por ayudarme a lograr esta meta.

Al ingeniero Javier Berzosa por darme la oportunidad de realizar este proyecto, por todos los conocimientos transmitidos, los consejos y la confianza que me ha dado durante este tiempo.

Al ingeniero Rodolfo Luna por siempre tener la voluntad de ayudarme y por procurar siempre darme una enseñanza hasta en los mínimos detalles.

Al ingeniero Yeison Araya por el tiempo y dedicación brindados, por los consejos y lecciones que me dio durante la realización de mi práctica profesional.

A todos mis compañeros de Eco Solutions por recibirme como uno más y dejarme ser parte de la familia que son, por toda la ayuda que me dieron, gracias

Tabla de Contenidos

Dedicatoria	III
Agradecimientos	IV
Figuras.....	VII
Tablas.....	VIII
Capítulo 1 . Resumen y Justificación.	9
1.1 Resumen.....	10
1.2 Abstract	12
1.3 Justificación.....	14
Capítulo 2 . Descripción de la empresa.....	15
2.1 Síntesis histórica de la creación de EcoSolutions.....	16
2.2 Servicio de auditorías de ahorro energético y desarrollo de proyectos de la empresa Eco Solutions.....	16
2.3 Visión de Eco Solutions.	17
2.4 Misión de Eco Solutions.	17
2.5 Área de biomasa de Eco Solutions.	17
2.6 Empresa base para el desarrollo del proyecto de sustitución.	18
2.6.1 Síntesis histórica de la creación de Bridgestone de Costa Rica.	18
Capítulo 3 . Sistema de generación de vapor de Bridgestone de Costa Rica.	20
3.1 Introducción.	21
3.2 Definición del problema.	22
3.3 Objetivos	22
3.3.1 Objetivo General.	22
3.3.2 Objetivos Específicos.....	22
3.4 Alcances y limitaciones.....	23
3.5 Marco Teórico	24
3.5.1 Metodología.....	24
3.5.2 Que es la biomasa.....	25
3.5.3 Tipos de biomasa.....	26
3.5.4 Ventajas y desventajas de la biomasa.....	27

3.5.5	Aprovechamiento de energías renovables.....	28
3.5.6	Experiencias en América Central.	29
3.5.7	Caracterización de los combustibles.....	31
3.5.8	Calderas biomásicas.....	34
3.5.9	Tipos de calderas de biomasa.....	36
3.5.10	Eficiencia de una caldera.....	38
3.5.11	Vapor en procesos industriales.....	40
3.5.12	Exigencias de seguridad.....	43
3.5.13	Normativa y reglamentación.....	45
3.6	Desarrollo del proyecto.....	47
3.6.1	Justificación energética.....	47
3.6.2	Justificación técnica.....	57
3.6.3	Justificación ambiental.....	93
3.6.4	Justificación Económica.....	106
Capítulo 4 Conclusiones y Recomendaciones.....		115
4.1	Conclusiones.....	116
4.2	Recomendaciones.....	117
Capítulo 5 . Bibliografía.....		119
Capítulo 6 . Apéndices.....		124
Capítulo 7 . Anexos.....		142

Figuras

Figura 2.1. Logo de la empresa EcoSolutions.	16
Figura 2.2. Compromiso social Bridgestone	19
Figura 3.1. Poderes caloríficos de diferentes tipos de biomasa.	31
Figura 3.2. Ficha técnica del pellet, Pelletics.	33
Figura 3.3. Disposición de una caldera biomásica.	35
Figura 3.4. Relación presión - temperatura del agua y vapor.	41
Figura 3.5. Curva de calentamiento del agua.....	43
Figura 3.6. Caldera biomásica VYNCKE.	61
Figura 3.7. Sistema elevador de pellets.	66
Figura 3.8. Tornillo helicoidal alimentador de pellets.	67
Figura 3.9. Representación del sistema de alimentación silo - caldera.....	68
Figura 3.10. Bunker dosificador de pellet.....	69
Figura 3.11. Parte de radiación, caldera biomásica, plano constructivo.	77
Figura 3.12. Parte frontal de la parte de radiación de la caldera.	77
Figura 3.13. Parte de convección, caldera biomásica, planos constructivos.	78
Figura 3.14. Tambor de vapor de la caldera, parte de convección.	78
Figura 3.15. Shockblasters, parte de convección, planos constructivos.	79
Figura 3.16. Shockblasters, parte de radiación, planos constructivos.	80
Figura 3.17. Economizador, planos constructivos.	81
Figura 3.18. Disposición de la caldera y elementos auxiliares, vista frontal.	83
Figura 3.19. Disposición de la caldera y elementos auxiliares, vista superior.	84
Figura 3.20. Funcionamiento de ciclones ACS.	87
Figura 3.21. Batería de ciclones ACS, planos constructivos.....	88
Figura 3.22. Batería de ciclones en sitio de instalación.	89
Figura 3.23. Turbina de tiro inducido.	90
Figura 3.24. Ciclo cerrado del carbono.	94
Figura 3.25. Árbol de Eucalipto.	102

Tablas

Tabla 3.1. Consumo de biomasa en América Central.....	30
Tabla 3.2. Consumo de bunker en Bridgestone Costa Rica.	47
Tabla 3.3. Datos de densidad y energía de combustión para bunker y pellets.	48
Tabla 3.4. Calculo de energía aportada por bunker.	49
Tabla 3.5. Propiedades físicas y termodinámicas del bunker.....	50
Tabla 3.6. Eficiencia instantánea promedio del 14-07-14 turno nocturno.	51
Tabla 3.7. Eficiencia instantánea promedio del 15-07-14 turno diurno.....	51
Tabla 3.8. Eficiencia instantánea promedio 15-07-14 turno nocturno.....	51
Tabla 3.9. Consumo equivalente de pellets.....	52
Tabla 3.10. Tabla comparativa de producción de vapor.....	53
Tabla 3.11. Sustitución de vapor respecto de la caldera 1.....	54
Tabla 3.12. Sustitución de vapor respecto de la caldera 3.....	55
Tabla 3.13. Consumo de bunker evitado por sustitución de vapor.	56
Tabla 3.14. Datos de placa de las calderas de Bridgestone Costa Rica.....	57
Tabla 3.15. Datos técnicos de caldera biomásica VYNCKE.	60
Tabla 3.16. Características constructivas del silo de almacenamiento de pellet.	64
Tabla 3.17. Tabla de datos necesarios para la determinación del NPSH.	74
Tabla 3.18. Resultado de cálculo para el NPSH disponible.	74
Tabla 3.19. Emisiones garantizadas del sistema ACS.....	86
Tabla 3.20. Litros de bunker consumidos por generación del 100% de vapor para un periodo de 13 días.....	96
Tabla 3.21. Litros de bunker consumidos por generación del 60% de vapor para un periodo de 13 días.....	97
Tabla 3.22. Toneladas de CO ₂ emitidas por generación del 100% de vapor para un periodo de 13 días.....	98
Tabla 3.23. Toneladas de CO ₂ emitidas por generación del 60% de vapor para un periodo de 13 días.....	99
Tabla 3.24. Clasificación de calderas.....	103
Tabla 3.25. Emisiones máximas para calderas de biomasa en mg/m ³	104
Tabla 3.26. Comparación de costo de producción de vapor, bunker vs pellet.	107
Tabla 3.27. Porcentaje de ahorro por uso de pellet para producción de vapor.....	108
Tabla 3.28. Evaluación de proyecto de sustitución para Bridgestone de Costa Rica.....	113
Tabla 3.29. Evaluación de proyecto de sustitución para Eco Solutions.	113

Capítulo 1 . Resumen y Justificación.

1.1 Resumen

La justificación de la sustitución de una caldera de bunker por una caldera de biomasa en Bridgestone de Costa Rica es el objetivo de la oficina de ambiente, ingeniería y proyectos en conjunto con Eco Solutions.

Se necesita realizar un estudio que contemple los aspectos básicos de la sustitución teniendo en cuenta las expectativas tanto de Bridgestone como EcoSolutions en cuanto a las necesidades de energía del proceso de producción de vapor, las características técnicas del equipo a instalar, el impacto medio ambiental de realizar dicho cambio y finalmente la rentabilidad económica de ejecutar un proyecto de eficiencia energética de este tipo.

Mediante el desarrollo del proyecto se determinan los aspectos básicos de cada una de las áreas a estudiar como parte de la justificación incluyendo: i) selección y dimensionamiento de los sistemas de abastecimiento de agua de la caldera y almacenamiento de pellet, ii) Dimensionamiento de la caldera necesaria para sustituir la anterior caldera de bunker, iii) Determinación de la cantidad de energía necesaria requerida por el proceso de fabricación de llantas, iv) cálculo de la cantidad de toneladas de dióxido de carbono emitidas a la atmosfera comparando la generación de vapor con bunker y con biomasa, v) análisis económico general sobre el proyecto, rentabilidad, periodo de retorno de inversión, entre otros. El estudio contempla procedimientos y cálculos de ingeniería de acuerdo a las normas y reglamentaciones aplicables para calderas de biomasa.

Se determino que la demanda de energía mensual promedio de Bridgestone es de 10.697.154,40 MJ lo cual corresponde a 263.594,87 litros de bunker y 528,91 toneladas métricas de pellets. Se selecciona una caldera de 600 BHP o 6 MW y una generación de vapor de 9,2 toneladas de vapor por hora. Se determina que el ahorro propuesto de bunker por el concepto de uso de biomasa para generación de vapor es de 1890,21 galones por día para una sustitución de la necesidad total de vapor del 40%.

Se calcula que la caldera según su capacidad consume un aproximado de 32 727,32 Kg de pellet por día, instalándose un silo de 153 192 Kg para una autonomía de funcionamiento de la caldera de 4,8 días.

Se dimensionan las bombas de agua necesarias para el abastecimiento de líquido de la caldera, las mismas deben contar con un caudal mínimo de 63,7 galones por minuto, una presión de descarga de 287 psi y una cabeza de succión neta positiva requerida menor o igual a 10,55 metros de columna de agua.

Se calcula la disminución de emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera por una sustitución de la generación de vapor de un 40% sobre el proceso, las toneladas de dióxido de carbono evitadas son de aproximadamente un 60% respecto de la producción de vapor usando solamente bunker, anualmente se liberan 696,94 toneladas de CO₂ al año.

Se determina que existe una diferencia de precio de un 20% del pellet respecto al bunker lo que genera ahorros mensuales mayores a los 22 millones de colones, generando ingresos anuales de más de 500 millones de colones.

1.2 Abstract

The justification for the replacement of a bunker boiler by a biomass boiler at Bridgestone de Costa Rica is the objective of the office of environment, engineering and projects in conjunction with Eco Solutions.

It is needed to conduct a study that addresses the basics of substitution considering the expectations of both Bridgestone and EcoSolutions as to the energy needs of the steam production process, the technical characteristics of the equipment to be installed, the environmental impact associated to that change and ultimately the profitability of running a energy efficiency project of this type.

Through the project development the basics of each of the areas to be studied as part of the justification are determined including: I) selection and sizing of the water supply systems of the boiler and pellet storage, ii) sizing of the boiler needed to replace the old bunker boiler, iii) Determine the required amount of energy needed by the tire manufacturing process, iv) calculation of the number of tons of carbon dioxide emitted into the atmosphere by comparing the steam generation with bunker and biomass, v) general economic analysis of the project, profitability, payback period, among others. The study provides procedures and engineering calculations according to the rules and regulations for biomass boilers.

It was determined that the average monthly energy demand of Bridgestone is 10,697,154.40 MJ which corresponds to 263,594.87 liters of bunker and 528.91 metric tons of pellets. 600 BHP boiler of 6 MW with a steam generation of 9.2 tons of steam per hour is selected. It is determined that the proposed bunker by the concept of using biomass to generate steam savings is 1890.21 gallons per day for a total need replacing steam of 40%.

It is estimated the boiler pellet consumption by approximately 32 727.32 kg of pellets per day, installing a silo of 153 192 kg for a range of boiler operation 4.68 days.

Water pumps needed for the liquid supply of the boiler must have a required minimum flow of 63.7 gallons per minute, a discharge pressure of 287 psi and a net positive suction head lower than or equal sized to 10.55 meters water column.

Decreasing emissions of carbon into the atmosphere by replacing steam generation 40% of the process are calculated to be approximately 60% less compared to the steam production using only bunker, 696.94 tons of CO₂ annually per year are released.

It is determined that there is a price difference of 20% between pellet and bunker which generates monthly savings greater than 22 million colones, generating annual revenues of more than 500 million colones.

1.3 Justificación

La búsqueda de fuentes de energía renovables en los tiempos del cambio climático se vuelve una necesidad cada vez más real y de la que más personas están consientes, es por esto que muchos países y empresas del mundo se comprometen con la reducción de sus emisiones de CO₂ a la atmosfera y lograr alcanzar el título de carbono neutralidad, ayudando al planeta y a nosotros mismos.

Bridgestone de Costa Rica es una empresa comprometida con el medio ambiente, la sociedad y la calidad de sus productos, es por esto que es necesario justificar la sustitución de una de sus calderas que emplea combustible a base de hidrocarburos por uno que no contamine la atmosfera, que pueda abastecer la necesidad de energía del proceso de producción y que económicamente sea rentable para su implementación.

En este momento Bridgestone posee únicamente pequeños detalles sobre las posibles implicaciones ambientales y económicas del proyecto de instalación de una caldera biomásica, por lo que un análisis integral de las principales variables involucradas se vuelve indispensable.

Es debido a esto que es necesario el estudio de los aspectos principales que involucra un proyecto de esta magnitud, teniendo en cuenta factores como el energético, técnico, ambiental y económico del proyecto de manera que sirva como una herramienta de decisión para la implementación del mismo y que además revele un panorama mucho más claro de sus alcances.

De esta manera Bridgestone de Costa Rica apuesta por un cambio total en su paradigma de producción, dando cabida a nuevas tecnologías amigables con el medio ambiente.

Capítulo 2 . Descripción de la empresa

2.1 Síntesis histórica de la creación de EcoSolutions.

La empresa Eco Solutions nace en el año 2009 como la iniciativa de 4 emprendedores, tres de ellos nacionales y uno estadounidense, con el fin de brindar soluciones de eficiencia energética a las empresas del sector nacional. Ante los crecientes precios de los recursos tradicionales como los combustibles fósiles y sus fluctuaciones en el mercado Eco Solutions se destaca como una de las mejores opciones en la actualidad para alcanzar el balance entre rentabilidad y sostenibilidad ambiental, es por esta razón que se puede catalogar como una empresa ESCO. (Energy Solutions Company)



Figura 2.1. Logo de la empresa EcoSolutions.¹

2.2 Servicio de auditorías de ahorro energético y desarrollo de proyectos de la empresa Eco Solutions.

La empresa Eco Solutions se dedica al desarrollo de proyectos de eficiencia energética brindando soluciones ante la necesidad de búsqueda de nuevas fuentes de energía, dejando de lado la dependencia de los combustibles fósiles. Mediante la realización de auditorías y visitas técnicas Eco Solutions se compromete a encontrar la solución particular a cada cliente, asegurando mejorar el uso de sus recursos energéticos optimizando el consumo de insumos. La empresa ofrece soluciones energéticas con tecnologías como:

¹ Tomado de www.goecosolutions.net

- Eficiencia en aires acondicionados
- Calderas de biomasa
- Corrección del factor de potencia
- Sistemas de lavado a base de ozono
- Purificación electrónica de agua
- Iluminación LED

En el área de calderas de biomasa posee varios proyectos instalados en hotelería e industria nacional así como en proceso de instalación, con muchas posibilidades de nuevos proyectos a corto plazo.

2.3 Visión de Eco Solutions.

Llegar a ser la empresa líder en soluciones de eficiencia energética de Latinoamérica, que se caracterice por ofrecer a sus clientes soluciones completas, que cuiden el medioambiente, busquen encadenamientos locales, presenten diversas soluciones financieras y cuente con un excelente recurso humano que cumpla con los más altos estándares de eficiencia y seguridad.

2.4 Misión de Eco Solutions.

Ofrecer al mercado Latinoamericano, una solución llave en mano de eficiencia energética; que cuente con un rápido retorno de la inversión.

2.5 Área de biomasa de Eco Solutions.

Uno de los ejes tecnológicos de la empresa es la instalación de quemadores y calderas de biomasa con usos que van desde propósitos domésticos hasta procesos industriales.

Para fines del presente proyecto éste será el eje transversal, tomándose como base la instalación de una caldera de biomasa en la empresa Bridgestone de

Costa Rica, la cual vendrá a sustituir una de las tres calderas de bunker empleadas en dicha fabrica.

Al ser la empresa Eco Solutions la facilitadora de los servicios de estudio e instalación de equipos de mejoramiento de eficiencia energética, el proyecto propuesto viene a complementar el trabajo de esta empresa en sus líneas de trabajo principales, el ahorro de energía y el cuidado al medio ambiente.

2.6 Empresa base para el desarrollo del proyecto de sustitución.

Se toma como base del proyecto la sustitución de una de las calderas de bunker de la empresa Bridgestone por una caldera biomásica, realizándose un análisis integral de todos los aspectos relacionados a dicho cambio.

2.6.1 Síntesis histórica de la creación de Bridgestone de Costa Rica.

En 1967 inicia operaciones Industrias Firestone de Costa Rica. Se empezó trabajar con 200 funcionarios y se fabricaban 425 llantas al día. A principios de los años setenta se llegó a fabricar 1200 llantas por día.

Entre 1971-1985 la planta se expandió y en 1985 SUMMA S.A adquiere IFCR, cambiando así la razón social a Industrias Akron de Costa Rica S.A. Para este momento se fabricaban 2200 llantas por día.

A finales de los 80 Bridgestone Corporation adquiere la Firestone Rubber Company. A mediados de los 90 se fabrica la primer llanta radial acero, la F-570, contando con 570 trabajadores y fabricando 2400 llantas por día

En 1996 se constituye una alianza estratégica con la corporación Bridgestone y cambia la razón social a Firestone de Costa Rica S.A.

Entre los años de 1997-2002 se exporta la primera llanta radial Turismo II a Estados Unidos y se obtiene la certificación ISO 9002. A finales de los 90 se inaugura EXFISA, la Corporación Bridgestone compra la mayoría de las acciones

y cambia la razón social a Bridgestone Firestone de Costa Rica S.A.

Se obtiene la certificación ISO 14001. Durante este periodo se fabricaban 5000 llantas y trabajaban 600 asociados.

Se inicia un proceso de expansión entre 2002-2005 y se obtiene la certificación QS 9000. Específicamente en el año 2003 se fabrica la primera llanta de equipo original y se otorga el premio corporativo de seguridad y el premio corporativo de mantenimiento.

En el 2005 se obtiene el Premio al Esfuerzo del Exportador de la Cámara de Exportadores de Costa Rica. Actualmente la Compañía fabrica más de 12000 llantas diarias y se cuenta con la participación de más de 1000 colaboradores.



Figura 2.2. Compromiso social Bridgestone²

² Tomado de www.bfcr.co.cr

Capítulo 3 . Sistema de generación de vapor de Bridgestone de Costa Rica.

3.1 Introducción.

Debido a la relevancia del cambio climático y sus consecuencias a nuestro planeta y estilo de vida es que se ha tomado conciencia sobre las medidas que se deben y pueden tomar para atenuar su avance y efectos, la carbono neutralidad es uno de los primeros pasos que se han dado en pro de la protección del medio ambiente. Cada vez más países y sus empresas buscan puntos de mejora para alcanzar esta meta, por lo que el uso de nuevas fuentes de energía se convierte en una carta fundamental para la reducción de las emisiones de carbono a la atmosfera, en este caso la sustitución del bunker por la biomasa.

Por esta razón, mediante este proyecto se pretende dar una justificación integral que tome en cuenta los factores ambiental, técnico, económico y energético de la sustitución de una caldera de bunker por una caldera biomásica en la empresa Bridgestone de Costa Rica, ubicada en Belén de Heredia.

Esta empresa pretende alcanzar la carbono neutralidad en el año de 2021, para esto además de la sustitución de una de sus calderas de bunker se están implementando proyectos de sustitución del vapor por nitrógeno en el proceso de vulcanización de las llantas, por lo que se busca que a largo plazo la caldera de biomasa cubra cerca del 75% de la demanda de vapor, contribuyendo así a la disminución de las emisiones de carbono a la atmosfera, reduciendo al mismo tiempo el consumo de combustibles fósiles.

Cabe resaltar que mediante el desarrollo de esta justificación se podrá dar una incentivación a la industria costarricense para que se conozcan las ventajas que puede traer la instalación de una caldera de este tipo tanto económica como ambientalmente, ya que además de el ahorro que puede representar se obtiene el reconocimiento ante el mercado y los consumidores de una industria consiente de la problemática actual del efecto invernadero y que toma medidas para evitarlo.

3.2 Definición del problema.

Es necesario para la empresa Bridgestone de Costa Rica el conocer la factibilidad del proyecto de instalación de la caldera de biomasa, su rentabilidad económica, el ahorro energético que es posible obtener, el impacto positivo que se podría generar al medio ambiente y los requerimientos técnicos mínimos para justificar la implementación de la sustitución.

Se debe realizar un análisis de cada uno de estos aspectos para determinar la viabilidad del cambio de la caldera, tomando en cuenta todos los posibles puntos a favor y en contra de la sustitución y como solventarlos, además de características especiales de este tipo de equipos.

3.3 Objetivos

3.3.1 Objetivo General.

- Justificar la sustitución de una caldera de combustible de hidrocarburos por una caldera de combustible biomásico para la empresa Bridgestone de Costa Rica mediante el desarrollo de un estudio técnico, económico, energético y ambiental.

3.3.2 Objetivos Específicos.

- Establecer un estudio energético anterior a la sustitución de la caldera para conocer la demanda energética de la planta.
- Calcular la potencia de los equipos necesarios para la nueva caldera.
- Dimensionar el cuarto de calderas y el silo de almacenamiento de biomasa, así como los elementos auxiliares.
- Precisar el tipo de biomasa a utilizar mediante el análisis de sus ventajas y desventajas, logística de suministro y abastecimiento del combustible.
- Describir los requerimientos de seguridad de la instalación.
- Calcular la reducción en emisiones de CO₂ anuales con la instalación de la caldera biomásica.

- Elaborar un estudio económico de la instalación, presupuesto, rentabilidad y retorno de inversión.

3.4 Alcances y limitaciones.

El proyecto se desarrollara para cubrir la necesidad de una empresa del sector nacional de mejorar el manejo de sus recursos energéticos y económicos, el mismo no será funcional para otras empresas del sector ya que se brindará una solución particular.

Las funciones que se controlaran en la empresa serán las necesarias para la obtención del vapor necesario para los procesos de producción de la misma.

La ejecución del proyecto de práctica de especialidad cuenta con la ventaja de haber coincidido con el periodo de planeamiento y posterior implementación del mismo, lo que se planea es proporcionar el soporte para el diseño y dimensionamiento de todos los equipos y dispositivos requeridos, el análisis económico mediante la implementación de indicadores financieros como el valor actual neto (VAN), la tasa interna de retorno (TIR) y el periodo de retorno (PR).

La implementación del proyecto en el periodo de práctica posibilita el análisis de la puesta en marcha así como la comprobación de los datos de funcionamiento de la caldera y su eficiencia.

La selección final de los equipos a instalar esta fuera de los alcances del presente proyecto ya que es una decisión conjunta de los departamentos de ingeniería de las partes involucradas Bridgestone y Eco Solutions.

El diseño del sistema eléctrico, de abastecimiento de agua así como aire comprimido queda fuera de los alcances del presente proyecto, el mismo corresponde a Bridgestone de Costa Rica y su departamento de ingeniería.

3.5 Marco Teórico

3.5.1 Metodología.

Recolección de datos de consumo de bunker y vapor.

Se realizó un análisis de los históricos de datos de consumo de bunker y vapor de las calderas de Bridgestone, se determina que con estos datos es posible realizar el análisis necesario.

Calculo de requerimientos de energía, bunker y pellets.

Con los datos de consumo de vapor se calcula la necesidad energética de la planta para el proceso productivo, se toman en cuenta los poderes caloríficos, y propiedades del bunker junto con los cálculos de eficiencia de las calderas para determinar el consumo de pellet equivalente a la cantidad de energía necesaria.

Sustitución de vapor y ahorro de bunker.

Mediante la capacidad nominal de producción de vapor de la caldera se calcula el porcentaje de sustitución de vapor que es posible realizar, mediante una equivalencia de energía se determinan los litros de bunker que se dejan de consumir para la producción del vapor sustituido por pellets.

Dimensionamiento sistemas principales y subsistemas.

Según los requerimientos del proceso de producción se dimensionan la caldera, el silo de contención de pellet, sistema de alimentación de agua, se realiza un análisis de las principales características de la caldera, todo esto basado en el código de calderas de Costa Rica.

Calculo de emisiones atmosféricas.

Se realiza el cálculo de las emisiones de dióxido de carbono que se liberan al producir vapor con 100% bunker versus la producción con la ayuda de la biomasa, se determinan la superficie boscosa necesaria para compensar dichas

emisiones. Además se especifican las emisiones máximas permitidas para calderas de biomasa según los decretos del Ministerio de Trabajo y Seguridad Social.

Análisis económico

Se ejecuta un análisis de la factibilidad del proyecto así como de la ganancia proyectada para el mismo.

3.5.2 Que es la biomasa.

“El término biomasa se refiere a toda la materia orgánica que proviene de árboles, plantas y desechos de animales que pueden ser convertidos en energía; o las provenientes de la agricultura (residuos de maíz, café, arroz, macadamia), del aserradero (podas, ramas, aserrín, cortezas) y de los residuos urbanos (aguas negras, basura orgánica y otros). La disponibilidad de cada recurso varía de región a región, de acuerdo con el clima, el tipo de suelo, la geografía, la densidad de la población, las actividades productivas, etcétera”. (Negocios verdes, n.d.)

A pesar de que los residuos se puedan obtener a raíz de varias actividades, las más importantes son en las cuales pueden ser utilizados para la elaboración de la biomasa, por su posible utilización industrial, ya que la biomasa representa energía que se obtiene a través de su quema directa (madera u otra materia vegetal sólida), o través de un procesamiento para adquirir otros tipos de combustible obtención de biogás o biodiesel.

En el contexto energético esta "biomasa" no es más que materia orgánica originada en un proceso biológico, que pueda tener un aprovechamiento de tipo industrial y, sobre todo, energético.

La biomasa puede representar una fuente de energía renovable e inagotable si se gestiona sosteniblemente, debido a su disponibilidad sobre la superficie de la tierra.

En pocas palabras la biomasa es una fuente viable de energía limpia ya que sus residuos son pocos y biodegradables y puede ser producida de forma continua como resultado de la actividad humana.

3.5.3 Tipos de biomasa.

Aunque existen diferentes tipos de biomasa que pueden ser utilizados como recurso energético, la clasificación más aceptada es la que divide a la biomasa en cuatro tipos diferentes: biomasa natural, residual seca y húmeda y los cultivos energéticos.

Biomasa Natural

Es la que comprende los bosques, árboles, matorrales, plantas de cultivo, etc. Lo que quiere decir que es el tipo de biomasa que es producida directamente en la naturaleza sin ningún tipo de participación humana.

Biomasa Residual (seca y húmeda)

La biomasa residual seca al contrario de la natural, hace referencia a todos los residuos obtenidos por actividad humana en los campos agrícolas y forestales, como por ejemplo: corteza, aserrín, astillas, trozos, ramas, etc.

La biomasa residual húmeda hace referencia a todos los residuos obtenidos por actividad humana o animal que dan como resultado flujos residuales de origen orgánico., como por ejemplo: agua residual urbana, residuos industriales biodegradables y residuos ganaderos.

Cultivos energéticos

Son los que se generan con el único propósito de producir biomasa que se pueda transformar en combustible, como por ejemplo: cereales, remolacha, chopo, sauces, etc.

3.5.4 Ventajas y desventajas de la biomasa.

Ventajas

- La principal ventaja para el ambiente del uso de la biomasa como fuente viable de energía es que la producción de gases nocivos es menor que los que se producen con otros combustibles fósiles, ya que durante la vida de la planta se absorbió la misma cantidad de CO₂ que la cantidad producida al quemar este combustible, lo que quiere decir que el dióxido de carbono y los gases de efecto invernadero se reducen al recurrir al uso de la biomasa.
- Menos ceniza resulta de la combustión de la biomasa en comparación a la de carbón mineral y además puede ser usada como insumo orgánico en los suelos.
- Se puede ver como reciclaje al hacer una reutilización de los residuos de otras actividades, lo que quiere decir que es fácilmente sostenible ya que si se cultiva y se gestiona de una manera eficaz se puede llevar a cabo en cualquier lugar donde se pueda hacer cultivo de plantas.
- La biomasa no se utiliza para un único tipo de proceso, ya que es tanto fuente de electricidad como de calor.
- Promete una disminución en necesidad de adquirir combustibles en el exterior, ya que gracias al proceso se puede hacer localmente y provoca un aumento económico.
- Incentiva la economía del país, principalmente la rural lo crea más opciones de trabajo y reduce la presión económica sobre la producción agropecuaria y forestal.

Desventajas

- El producto demanda una gran cantidad de espacio para su almacenamiento.
- El costo de producción es más alto.

- El adquirirla requiere de altos costos de transporte ya que debe ser elaborada cerca de los lugares de donde se obtiene.
- El poder calórico de la biomasa está ligado a las variaciones en la humedad del producto, el clima y la densidad de la materia prima.

3.5.5 Aprovechamiento de energías renovables.

Es importante destacar que el aprovechamiento de los recursos renovables para la generación de energía, puede permitir a la región ir sustituyendo poco a poco el uso de combustibles fósiles y así contribuir para la reducción de la emisión de gases del efecto invernadero.

Con el constante crecimiento en la demanda de energía eléctrica, se debe optar por proyectos de eficiencia energética o bien a través de proyectos que generen energía a base de fuentes renovables, de esta manera no solo se contribuye a la reducción de la emisión de gases si no a el aumento en la diversificación energética en los países, se contribuye a la sostenibilidad del medio ambiente y a aportar como herramienta en el combate del cambio climático.

“Hoy en día, las energías renovables representan el 20% del consumo de electricidad en el mundo, y dentro de este porcentaje, la energía más utilizada es la hidráulica, con un 90% del total. El resto del aprovechamiento de las energías anteriormente mencionadas es más bien anecdótico, siendo de un 5,5% la biomasa, 1,5% la geotérmica, y 0,5 la solar y la eólica respectivamente. La mayor parte de esta energía se utiliza para generar electricidad, y el resto para calefacción, climatización y transporte”. (Energías Renovables, n.d.)

Los países tienen un bajo porcentaje de aprovechamiento de las energías renovables a pesar de la saturación del mercado por exceso de generación eléctrica, esto sumado a los progresivos problemas económicos y financieros hacen que la transición en la manera de pensar debido a que el objetivo ha sido una creciente sociedad industrial sea obligatoria.

Las fuentes de energía renovable se dividen en dos grandes grupos: no contaminantes y contaminantes.

Entre las más conocidas, la energía eólica proveniente del viento, energía hidráulica proveniente de los ríos y corrientes de agua dulce y la energía solar son energías limpias y las que se obtienen a partir de la materia orgánica o biomasa que son denominadas contaminantes.

Una manera de aprovechar más eficientemente la energía renovable proveniente del sol es implementarlo directamente a las necesidades de calefacción, refrigeración e iluminación; así bien la energía eólica e hidráulica las cuales se utilizan para bombeo y en muchos casos dependiendo del tipo de maquinaria para transmisión mecánica directa del movimiento desde las aspas para accionarla, la gran ventaja de este tipo de energías es que son casi inmunes al constante cambio en los precios de los combustibles fósiles como petróleo, el carbón o el gas natural, pero no cambian la dependencia de estas a diferencia de la biomasa.

3.5.6 Experiencias en América Central.

El mercado industrial/comercial de la biomasa cuenta con más de 100 años en Europa y más de 50 años en países como Estados Unidos y Canadá. Para América Central, el uso de energía renovable representa una alternativa económica y ambiental como fuente energética además de la expansión y diversificación de la capacidad eléctrica, ya sea recurriendo a sistemas aislados o por proyectos conectados a la red eléctrica. La región cuenta con suficientes recursos para desarrollar sistemas con energías renovables, biomasa, principalmente, de esta manera se puede garantizar sustento y seguridad energética de los países.

Sin embargo, existen barreras que dificultan la expansión del uso de este tipo de energía: la falta de conocimiento de las tecnologías y la carencia de información práctica.

A diferencia de Europa, en Centroamérica las empresas no tienen acceso a información que les permita saber los beneficios que pueden gozar al hacer uso de los residuos como fuente energética, lo que provoca falta de interés y de esta manera desaprovechamiento de las abundantes fuentes en este continente, esto

sumado a ideas inadecuadas provocadas por la filtración de información y experiencia poco veraces y certeras, lo cual da como resultado malas estimaciones en cuanto a inversiones y ganancias, y como resultado una idea totalmente equivocada sobre la rentabilidad de la energía proveniente de los residuos.

Otro de los factores que minimizan el cambio en el enfoque son las trabas y falta de incentivos para la generación de energía o la sustitución de combustibles fósiles por parte del gobierno, así como los muchos obstáculos para la aprobación y apoyo a nivel financiero.

En este tema el mercado a nivel mundial cuenta con un crecimiento anual del 25%, siendo Estados Unidos, Canadá y Europa los mayores productores.

Tabla 3.1. Consumo de biomasa en América Central.³

País	Sector	Energía total	Leña	Residuos	Carbón vegetal	Total biomasa	Porcentaje de biomasa en energía total
Guatemala (1999)	Doméstico	135.436	111.942	n.d.	990	112.932	83,4%
	Industria	29.665	2.425	5.215	n.d.	7.640	25,8%
	Total	220.288	1114.367	5.215	990	120.572	54,7%
Honduras (2000)	Doméstico	54.880	46.856	n.d.	n.d.	46.856	85,4%
	Industria	25.736	3.150	5.881	n.d.	9.031	35,1%
	Total	115.720	50.006	5.881	n.d.	55.887	48,3%
El Salvador (1996)	Doméstico	70.506	59.538	n.d.	512	60.050	85,2%
	Industria	26.215	7.830	4.520	n.d.	12.351	47,1%
	Total	131.326	67.369	4.520	512	72.401	55,1%
Nicaragua (1999)	Doméstico	48.083	44.945	n.d.	138	45.083	93,8%
	Industria	13.627	347	6.100	n.d.	6.448	47,3%
	Total	87.554	45.350	6.146	753	52.250	59,7%
Costa Rica (1999)	Doméstico	13.255	2.346	n.d.	147	2.493	18,8%
	Industria	21.326	160	5.157	n.d.	5.317	24,9%
	Total	96.816	2.506	5.157	151	7.814	8,1%
Panamá (1999)	Doméstico	32.049	15.332	n.d.	117	15.449	48,2%
	Industria	15.648	1.438	1.609	n.d.	3.047	19,5%
	Total	77.195	16.770	1.609	117	18.496	24,0%

Fuente: Balances energéticos nacionales, compilado por BUN-CA, 2002.

³ Tomado de www.bun-ca.org

3.5.7 Caracterización de los combustibles.

Los residuos biomásicos se encuentran en distintos estados físicos, de esta manera se determina la viabilidad técnica y económica de los procesos de transformación energética que se emplean a cada tipo en particular. Usando como ejemplo los desechos animales, estos indican el uso de procesos anaeróbicos (bioquímicos), los forestales indican los procesos de combustión directa o procesos termo-químicos, etc.

Las principales propiedades que se evalúan en un residuo son: la humedad (%), la densidad (kg/m³), composición química (%), poderes caloríficos (Kcal/kg, kJ/kg).

TABLA 5. Poderes caloríficos de diferentes tipos de biomasa

Producto	PCS (kcal/kg) Humedad = 0%	PCI a la humedad x (kcal/kg)			
		x	PCI	x	PCI
<i>Leñas y ramas</i>					
Coníferas	4.950	20%	3.590	40%	2.550
Fronosas	4.600	20%	3.331	40%	2.340
<i>Serrines y virutas</i>					
Coníferas	4.880	15%	3.790	35%	2.760
Fronosas autóctonas	4.630	15%	3.580	35%	2.600
Fronosas tropicales	4.870	15%	3.780	35%	2.760
<i>Corteza</i>					
Coníferas	5.030	20%	3.650	40%	2.650
Fronosas	4.670	20%	3.370	40%	2.380
<i>Vid</i>					
Sarmientos	4.560	20%	3.280	40%	2.310
Ramilla de uva	4.440	25%	2.950	50%	1.770
Orujo de uva	4.820	25%	3.240	50%	1.960
<i>Aceite</i>					
Hueso	4.960	15%	3.860	35%	2.810
Orujillo	4.870	15%	3.780	35%	2.760
<i>Cáscaras frutos secos</i>					
Almendra	4.760	10%	3.940	15%	3.690
Avellana	4.500	10%	3.710	15%	3.470
Piñón	4.930	10%	4.060	15%	3.830
Cacahuete	4.250	10%	3.480	15%	3.260
<i>Paja de cereales</i>					
	4.420	10%	3.630	20%	3.160
	4.420	30%	2.700		
<i>Cascarilla de arroz</i>	4.130	10%	3.337	15%	3.150
<i>Girasol</i>					
<i>Residuo de campo</i>	4.060	10%	3.310	15%	3.090

Para el cálculo del PCI se considera un contenido de hidrógeno en base seca del 6%.
Fuente: IER / Biomasa. Manuales de Energías Renovables 5. IDAE. 1992.

Figura 3.1. Poderes caloríficos de diferentes tipos de biomasa.⁴

Pese a la gran cantidad de desechos no todos son aptos para procesos termoquímicos, la biomasa para energía se divide en dos grandes ramas que son

⁴ Tomado de www.proyectovivirenelcampo.com

la húmeda y la seca, esta última presenta un porcentaje de humedad por debajo del 60% lo que la hace apta para combustión, gasificación, pirolisis, y demás procesos termoquímicos, por otro lado se encuentra la biomasa residual húmeda, como aguas residuales y residuos ganaderos que presentan un porcentaje de humedad por encima del 60%.

El poder calorífico de la biomasa húmeda es menor ya que la energía que se genera en el proceso de combustión se ve disminuido por la energía que se necesita para evaporar el agua presente y la que se forma durante la combustión.

Este es un factor que debe ser considerado porque influye directamente en el nivel de aprovechamiento de la energía disponible.

3.5.7.1 Elección del combustible.

Los pellets son producidos a base de desechos madereros y otros desechos agrícolas, estos son secados para lograr un porcentaje de humedad debajo del 10% para poder ser comprimida en granulados.

Este proceso de secado hace que los pellets comparados con la madera normal tengan una densidad energética mucho más alta.

El pellet es la biomasa con el menor porcentaje de humedad y la mayor densidad, con lo cual se obtiene la mayor capacidad calorífica, las mejores emisiones al medio ambiente y el menor porcentaje de ceniza en relación al resto de tipos de biomasa (astilla, leña, cascarilla de arroz, cascarilla de café, etc.).

La elaboración de los mismos es a base de desechos de la madera de los aserraderos: aserrín, buruchas, ramas, entre otros, lo cual los convierte en un proceso ideal para el reciclaje de desechos.

La empresa encargada de la manufactura del producto a nivel de Costa Rica se ubica en Muelle de San Carlos, es llamada Pelletics y produce los pellets aprovechando los desechos de aserraderos de la zona, a continuación se muestran las especificaciones del producto.



Ficha Técnica del Producto

info@pelletics.com

Pelletics Pure Premium																															
Descripción	<table border="0"> <tr> <td>Diámetro</td> <td>6mm</td> </tr> <tr> <td>Longitud</td> <td>< 50mm</td> </tr> <tr> <td>Densidad a granel</td> <td>650 kg/m³</td> </tr> <tr> <td>Densidad del pellet</td> <td>1.1-1.2 ton/m³</td> </tr> <tr> <td>Contenido de humedad</td> <td>< 10%</td> </tr> <tr> <td>Contenido de ceniza</td> <td>< 5 %</td> </tr> <tr> <td>Valor Calorífico (recibido)</td> <td>4,440 kcal/kg 18.61 MJ/kg</td> </tr> <tr> <td>Densidad de Energía</td> <td>12,096.5 MJ/m³</td> </tr> <tr> <td>Contenido Volátil</td> <td>91,6%</td> </tr> <tr> <td>temperatura deformación de ceniza</td> <td>1452 °C</td> </tr> <tr> <td>Sulfúricos</td> <td>0.040%</td> </tr> <tr> <td>Nitrogeno</td> <td>< 0.3 %</td> </tr> <tr> <td>Cloro</td> <td>0.013%</td> </tr> <tr> <td>Aditivos</td> <td>< 0.1 %</td> </tr> <tr> <td>Polvo</td> <td>< 1 %</td> </tr> </table>	Diámetro	6mm	Longitud	< 50mm	Densidad a granel	650 kg/m ³	Densidad del pellet	1.1-1.2 ton/m ³	Contenido de humedad	< 10%	Contenido de ceniza	< 5 %	Valor Calorífico (recibido)	4,440 kcal/kg 18.61 MJ/kg	Densidad de Energía	12,096.5 MJ/m ³	Contenido Volátil	91,6%	temperatura deformación de ceniza	1452 °C	Sulfúricos	0.040%	Nitrogeno	< 0.3 %	Cloro	0.013%	Aditivos	< 0.1 %	Polvo	< 1 %
Diámetro	6mm																														
Longitud	< 50mm																														
Densidad a granel	650 kg/m ³																														
Densidad del pellet	1.1-1.2 ton/m ³																														
Contenido de humedad	< 10%																														
Contenido de ceniza	< 5 %																														
Valor Calorífico (recibido)	4,440 kcal/kg 18.61 MJ/kg																														
Densidad de Energía	12,096.5 MJ/m ³																														
Contenido Volátil	91,6%																														
temperatura deformación de ceniza	1452 °C																														
Sulfúricos	0.040%																														
Nitrogeno	< 0.3 %																														
Cloro	0.013%																														
Aditivos	< 0.1 %																														
Polvo	< 1 %																														
Explicación del análisis																															
Contenido de Humedad [5-10%]	Entre más alto el contenido de agua, menor contenido de energía Con un contenido de humedad muy alta (>15%) existe el riesgo de descomposición biológica. Nuestros pellets dan un valor calorífico óptimo y la posibilidad de que el producto sufra descomposición biológica está descartada.																														
Contenido Cenizas [1.5 - 15%]	un contenido de cenizas más alto indica el contenido de materiales ajenos. (aditivos, partículas, otros desechos) un contenido mayor trae el riesgo de escoria* (*revisar temperatura de deformación)																														
Temperatura de deformación de ceniza [1200 - 1500 °C]	A temperaturas bajas existe el riesgo potencial de escoria o/y de recubrimiento (depende de las condiciones de operación) A temperaturas de deformación más alta habra menos escoria y menos deformacion fisica y química de las cenizas.																														
Valor Calorífico [10 - 18.6 MJ/kg]	El Valor calorífico es la energía total liberada de un combustible quemado en el aire, este incluye el calor de la condensación del agua dentro los combustibles. Representa así la energía maxima potencialmente recuperable de un combustible de biomasa en específico. Un valor calorífico mayor resulta en mejor combustión y mayor economía.																														

Figura 3.2. Ficha técnica del pellet, Pelletics.⁵

⁵ Tomado de www.info@pelletics.com

3.5.7.2 Exigencias de almacenamiento.

El almacenamiento de pellet en silos es lo más comúnmente observado a nivel industrial, los contenedores pueden ir desde unos pocos metros cúbicos hasta unos centenares según la aplicación para el cual son construidos, su diseño debe garantizar su resistencia ya que debe soportar la presión interna de la carga que contiene.

Todo silo debe poseer aberturas de alimentación cerca del extremo superior y bocas de descarga cerca de la base o en uno de sus costados.

El contenedor debe ser completamente hermético al agua y humedad tanto si se localiza en interiores o exteriores debido a que el pellet pierde su poder como combustible si aumenta su porcentaje de humedad, además el mismo aumenta su volumen por lo que puede causar atascamientos en los sistemas de abastecimiento como tornillos y elevadores alimentadores.

La estructura de almacenamiento debe tener un sistema de control de nivel, esto para determinar la tasa de consumo de combustible así como el intervalo de llenado del silo.

En caso de incendio es necesario que el contenedor cuente con un sistema de extinción que sea capaz de apagar cualquier incidente.

El silo debe tener la capacidad de abastecer la necesidad de alimentación de combustible de la caldera por un periodo de tiempo que dependerá de la capacidad de respuesta del proveedor de pellet, el consumo de la caldera y la disponibilidad de espacio donde estará localizado el silo, de este punto dependerá el volumen máximo de almacenaje.

3.5.8 Calderas biomásicas.

Una caldera de biomasa es un intercambiador de calor que emplea como fuente de calor y energía materia orgánica por medio de su combustión. En países como Francia y España son ampliamente usadas como un medio de calefacción doméstica y para la producción de vapor en procesos industriales.

En la combustión de biomasa se libera **CO₂ a la atmósfera, el mismo CO₂ que absorbió de la atmósfera durante su crecimiento**, si se trata de materia orgánica vegetal, o que absorbieron las plantas que ingirió, si se trata de materia orgánica animal: **BALANCE NEUTRO DE SUS EMISIONES DE CO₂**. (Gas Natural Fenosa, 2014)

Un sistema de combustión de biomasa cuenta con los siguientes subsistemas:

- Una estructura para almacenamiento del combustible.
- Un medio de transporte y alimentación del combustible desde el punto de almacenamiento hasta el punto de combustión.
- Una cámara de combustión y equipos adyacentes.
- Una caldera para producción de vapor o agua caliente, según la aplicación.
- Recuperadores de calor (Economizadores).
- Un sistema de filtros de gases de combustión, para precipitación de ceniza.
- Un punto para extracción de ceniza.



Figura 3.3. Disposición de una caldera biomásica.⁶

⁶ Tomado de www.forbesmarshall.com

3.5.8.1 Usos.

Mediante la biomasa como fuente de energía se puede generar energía eléctrica, térmica y mecánica mediante el uso de biocarburantes en motores de combustión interna.

Generación de electricidad: Este tipo de aplicación se da en industrias donde por factores como la cantidad de biomasa disponible y la capacidad de sus equipos se produce suficiente energía para la generación eléctrica por medio de turbinas de vapor, por lo general este uso de las calderas de biomasa se da en ingenios y procesadoras de arroz, en los cuales se obtiene el combustible como residuo de sus procesos.

Generación de energía térmica: Este uso se encuentra desde un nivel domestico hasta un nivel industrial, ya que abarca la producción de energía en forma de calor para acondicionamiento de espacios (calefacción) y generación de vapor para procesos industriales que van desde cocción de alimentos, lavandería, fabricación de productos a base de polímeros, entre otros.

3.5.9 Tipos de calderas de biomasa.

Las calderas de biomasa se pueden clasificar en dos categorías, según el combustible que utilizan y según la tecnología que poseen.

Según el tipo de combustible se clasifican en tres grupos:

- **Calderas multicomcombustible:** Admiten varios tipos de combustible y poseen la capacidad de realizar cambios rápidos entre ellos, por ejemplo astillas y pellets, tu tamaño puede ser mediano desde 200 KW o mayores.
- **Calderas de biomasa:** Este tipo de calderas puede trabajar con distintos tipos de biomasa pero no puede realizar cambios rápidos, para esto debe vaciarse el contenedor del combustible y llenarlo con el nuevo con un tiempo considerable de antelación.
- **Calderas de pellet:** Poseen tamaños variables desde los 40 KW hasta los 6000 KW y mayores, destacan por ser muy eficientes y de tamaños compactos.

En relación a su tecnología las calderas biomásicas se dividen en cuatro grupos:

- **Calderas de pellets de condensación:** Estas calderas son generalmente pequeñas y automáticas, tienen la característica de poder recuperar el calor latente de condensación contenido en el combustible mediante una disminución gradual de la temperatura de los gases de combustión, hasta que el vapor de agua contenido en los mismos se condensa en el intercambiador de calor. Esta tecnología permite ahorrar un 15 % de combustible respecto de una caldera de combustión tradicional.
- **Calderas adaptadas para biomasa:** Suelen ser calderas de carbón, diesel o bunker a las cuales se les ha adaptado un quemador de pellet para el uso de biomasa, tienen la desventaja de que su eficiencia cae hasta valores situados entre un 75 – 85 %, generalmente son semiautomáticas ya que al no haber sido diseñadas exclusivamente para biomasa carecen de los medios apropiados para limpieza y mantenimiento.
- **Calderas mixtas:** Son capaces de utilizar dos tipos de combustibles, pudiendo realizar un cambio del mismo en caso de ser necesario, por ejemplo debido a problemas de suministro de uno de los combustibles, no obstante precisan de un sistema de almacenamiento y alimentación para cada uno de los combustibles.
- **Calderas eficientes de biomasa:** Se diseñan para trabajar con un tipo de biomasa específica alcanzando rendimientos de hasta un 92 %, aunque es posible su uso con otro tipo de combustible su eficiencia disminuye considerablemente.

3.5.9.1 Características especiales.

Toda caldera de biomasa posee características especiales en cuanto a su funcionamiento que las diferencian de las calderas de bunker o diesel que típicamente se encuentran en la industria. Un buen conocimiento de las mismas es fundamental para su correcta operación.

Algunas de estas características son las siguientes

- El tiempo necesario para elevar la presión en una caldera de biomasa es un factor a considerar debido a que algunas de ellas tienen una capacidad de aumentar este valor dentro del domo de vapor un 1% por minuto por lo que ante una caída de presión de la línea no poseen una capacidad de reacción rápida.
- Al apagar una caldera de biomasa se necesitan varias horas hasta que la temperatura interna de la misma disminuya ya que al utilizar un combustible sólido como los pellets, estos permanecen ardiendo dentro de la cámara de combustión mucho tiempo después de haberse cortado el suministro de aire y combustible. Este tipo de calderas poseen sistemas de seguridad muy eficaces ya que en caso de una emergencia no es posible apagarlas y eliminar la fuente de calor.
- Es necesario un sistema de filtrado de cenizas de los restos de la combustión del combustible, generalmente por medio de ciclones, que precipitan la ceniza hasta su punto de recolección. Las normativas de emisiones de partículas en gases de combustión en cada país limitan el funcionamiento de este tipo de calderas, haciendo obligatorio el uso de estos filtros.
- Las calderas de biomasa requieren intervalos de limpieza de la cámara de combustión o de los depósitos de ceniza, ya que la misma se acumula producto de la quema del combustible, afectando su funcionamiento y eficiencia si transcurre mucho tiempo entre ciclos de remoción de la ceniza.

3.5.10 Eficiencia de una caldera.

La mayoría de procesos productivos actuales emplean máquinas térmicas como hornos y calderas para obtener energía, por lo que obtener los mejores índices de eficiencia en estos equipos puede conducir a ahorros energéticos y monetarios considerables. La eficiencia de una caldera hace referencia a la relación entre la energía en forma de calor absorbido por el agua y la energía

liberada, la diferencia entre estos dos valores corresponde a las pérdidas de calor de la caldera.

Muchas veces la eficiencia de estos aparatos es subestimada ya que lograr incrementos grandes de rendimiento es muy difícil, pero debido a que estos equipos trabajan prácticamente todo el año, sus consumos de combustible son muy altos y aumentos pequeños de uno o dos puntos de eficiencia representan ahorros considerables.

3.5.10.1 Pérdidas de calor comunes.

- **Pérdida de calor relacionada al exceso de aire:** Se asocia a la cantidad de aire necesario para la combustión que debe ser entregado adicional al requerido estequiométricamente y con esto lograr una buena combustión. Trabajar con excesos de aire por encima o por debajo del valor apropiado puede generar una disminución de la eficiencia.
- **Pérdida de calor asociada a la temperatura de los gases de combustión:** Entre mayor sea la temperatura de los gases de combustión menor es la eficiencia de la caldera, esto debido a que gran parte de la energía transferida del combustible al sistema se escapa a la atmósfera en lugar de transmitirse al agua.
- **Pérdida de calor en la purga:** Los mecanismos de purga de la caldera destinados a la eliminación de lodos (precipitaciones formadas de químicos y minerales presentes en el agua), permiten escapes de calor en el agua, entre menor sea la cantidad de agua desechada en la purga, mejor será la eficiencia de la caldera.
- **Pérdida de calor por falta de precalentamiento del aire de combustión:** El aumentar la temperatura del aire de entrada a la caldera asegura una combustión más completa y por ende una mejor transferencia de energía desde el combustible hacia el agua.
- **Pérdida de calor por radiación:** Se asocia a aislamientos deficientes de la caldera, tuberías, cámara de combustión, tambor de vapor y cualquier

superficie que este destinada a contener el calor en las cuales el mismo escape en forma de radiación al ambiente.

El método para calcular la eficiencia de una caldera se da por la relación existente entre la entalpia del vapor de salida y el agua de entrada, el flujo másico del combustible, poder calorífico del combustible y la producción de vapor de la caldera, mediante la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{\text{Prod. Vapor [Ton/h]} \times (\text{Entalpia vapor} - \text{Entalpia agua de entrada})[\text{KJ/Kg}]}{[(\text{Poder calorifico del bunker})[\text{KJ/Kg}] \times \text{Consumo de bunker} [\text{Kg/h}]] \times 100000}$$

Ecuación 3.1 Eficiencia de una caldera⁷

La consideración de la eficiencia de todo equipo permite aproximar hasta un valor más real su funcionamiento, consumos y producción.

3.5.11 Vapor en procesos industriales.

En la actualidad el vapor es ampliamente usado en todo tipo de procesos industriales, la versatilidad de sus aplicaciones y sus costos de producción en relación de otras fuentes de energía lo hacen una de las mejores opciones para la fabricación de productos.

Entre las aplicaciones más comunes se pueden encontrar:

- **Vapor para calentamiento:** Usado en plantas procesadoras de alimento, plantas químicas, plantas procesadoras de polímeros, entre otras.
- **Vapor para producir movimiento:** Aplicado mayormente en turbinas de vapor para generación eléctrica.
- **Vapor como fluido motriz:** Usado para producir vacío dentro de tuberías en movimiento de flujos de líquido o gas.

⁷ Tomado de www.thermal.cl

- **Vapor para atomización:** Usado para separar mecánicamente un fluido en gotas pequeñas que permitan su atomización, se encuentra en quemadores de bunker para calderas.
- **Vapor para limpieza:** Empleado para limpiar superficies de todo tipo.
- **Vapor para acondicionamiento:** Se aplica en lugares fríos en los que es necesario el acondicionamiento de recintos, el vapor se usa para aumentar la temperatura dentro de los mismos.

3.5.11.1 Tipos de vapor.

Al calentar el agua por sobre su punto de ebullición, la misma se convierte en vapor, pero no existe únicamente un solo tipo de vapor y sus propiedades varían según la forma en la que la presión y la temperatura a la cual está sujeto se relacionan.

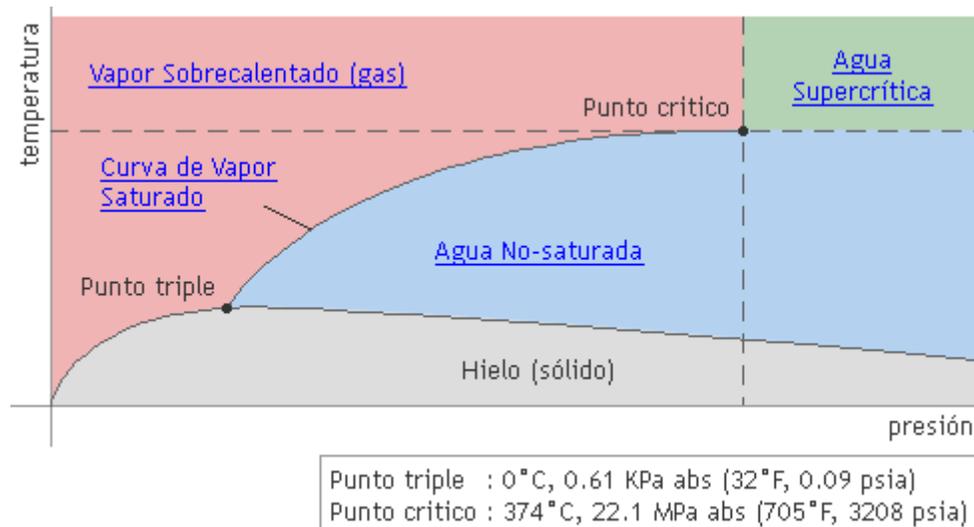


Figura 3.4. Relación presión - temperatura del agua y vapor.⁸

Se identifican así tres tipos de vapor que dependen de su aplicación y el método por el cual se obtienen

- **Vapor Saturado:** Se obtiene a presiones y temperaturas en las cuales tanto el vapor como el agua pueden coexistir juntos, en el que un aumento

⁸ Tomado de www.tlv.com

de la energía por sobre el punto de equilibrio provoca la evaporación de las partículas de agua así como una disminución ocasiona la condensación de las partículas de vapor. Este punto de equilibrio se observa en la imagen anterior sobre la curva de vapor saturado. Es ideal para calentamiento por medio de calor latente.

- **Vapor húmedo:** Se da generalmente en generadores de vapor como calderas, cuando el agua alcanza el punto de saturación para posteriormente vaporizarse, arrastra un porcentaje de agua en forma de gotas, que luego son transportadas por las líneas de distribución hasta los usuarios.
- **Vapor sobrecalentado:** Se obtiene al sobrecalentar el vapor saturado o húmedo para alcanzar un punto superior al de saturación, por lo que es capaz de tener mayor temperatura y menor densidad que el vapor saturado en una misma presión. Es ideal para impulso y movimiento en el que la presencia de condensado puede afectar el funcionamiento del equipo.

3.5.11.2 Calor sensible y calor latente.

El calor sensible hace referencia a la energía en forma de calor que se debe suministrar a un fluido para elevar su temperatura desde o hasta la temperatura de cambio de fase.

El calor latente se asocia a la energía necesaria para que el fluido al cual se elevo la temperatura cambie de fase sin generar aumento de temperatura adicional.

Lo dicho anteriormente se ejemplifica en la siguiente figura:

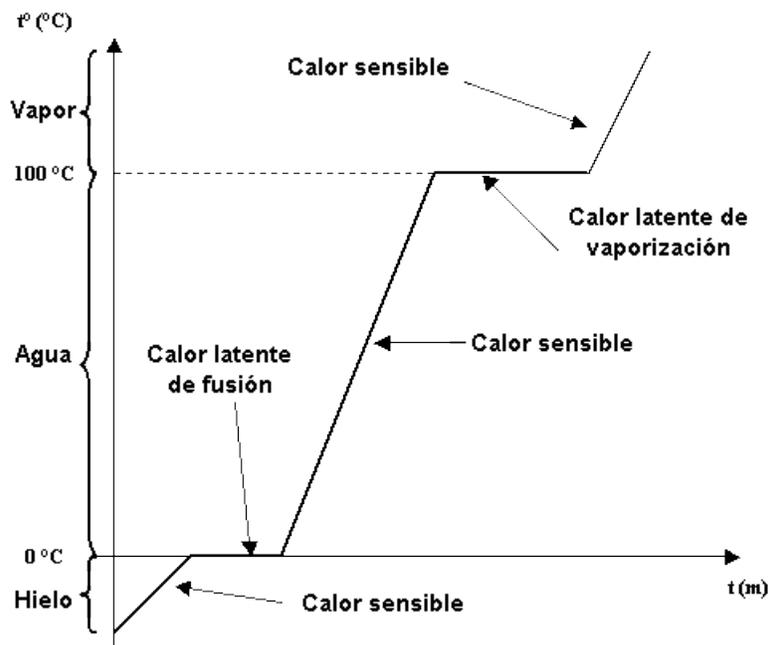


Figura 3.5. Curva de calentamiento del agua.⁹

Para llevar un fluido desde una temperatura inferior hasta una superior es necesario suministrar energía, en el caso de que el fluido se encuentre a una alta temperatura y la misma comienza a disminuir, el fluido entrega energía al sistema.

En un sistema de generación de vapor se eleva el nivel de energía del agua mediante el uso del combustible, cuando el vapor generado se condensa entrega energía en forma de calor sensible y latente, siendo este último mayor en magnitud.

3.5.12 Exigencias de seguridad.

Para Bridgestone la seguridad al momento de realizar cualquier trabajo es uno de los ejes fundamentales sobre los que se basa su política de salud ocupacional, cada tipo de trabajo tiene su reglamentación interna y requiere de permisos especiales para ser ejecutado por lo que cada aspecto de este permiso debe ser cumplido a cabalidad para recibir el visto bueno y la posibilidad de

⁹ Tomado de www.fisicanet.com.ar

comenzar las labores. Entre las principales normativas de seguridad se destacan las siguientes:

- **Permiso de trabajo en caliente:** Un trabajo en caliente es todo aquel que durante su realización desprenda calor, chispas o llama abierta. Para llevar a cabo un trabajo de este tipo debe revisarse el área de trabajo y eliminar cualquier material combustible en un área de al menos 11 metros a la redonda, se debe contar con el permiso correspondiente firmado por un representante de Bridgestone así como por las personas que vayan a trabajar.
- **Permiso de trabajo en altura:** Un trabajo en altura es aquel en el que la persona se encuentre a mas de 1,8 metros sobre el nivel del suelo, para esta labor se requiere el permiso firmado por el representante de Bridgestone y de las personas que van a realizar el trabajo, para ejecutar labores en el techo o alturas similares es necesario un chequeo médico en el que se apruebe el buen estado de salud del trabajador, así como una firma de un representante del departamento de seguridad y salud ocupacional.
- **Permiso de trabajo en espacios confinados:** Un espacio confinado es aquel en el que solo exista una única entrada / salida, donde la ventilación es limitada así como el espacio dentro del mismo. Para este tipo de labores se requiere un permiso otorgado por el representante de Bridgestone a cargo del proyecto, además es necesaria una medición de la concentración de gases en el recinto que se vaya a desempeñar el trabajo por algún miembro del departamento de seguridad y salud ocupacional.
- **Requerimientos adicionales:** Para cada tipo de trabajo es necesario el uso del equipo de protección personal correspondiente, además la persona debe contar con los cursos de cada tipo de trabajo impartidos por personal del departamento de seguridad y salud ocupacional de Bridgestone y los mismos deben estar vigentes. El equipo a utilizar para realizar los trabajos debe estar en buen estado, deben existir puntos de anclaje y líneas de vida adecuadas sobre las estructuras donde se vaya a trabajar. Toda área que

represente un peligro debe estar rotulada indicando precaución, así como el equipo de protección necesario para la permanencia en un espacio específico, por ejemplo calzado de seguridad, protección auditiva, entre otros.

3.5.13 Normativa y reglamentación.

3.5.13.1 Decreto Ejecutivo N°26789 – MTSS: Reglamento de calderas.

El reglamento de calderas establece los parámetros de clasificación de las calderas, los requerimientos mínimos de los cuartos de calderas y equipos necesarios para su operación, las pruebas e inspecciones a realizar a los instrumentos además de los requisitos a cumplir por parte de los inspectores autorizados.

3.5.13.2 Decreto Ejecutivo N°36551 – MTSS: Reglamento sobre emisión de contaminantes atmosféricos provenientes de calderas y hornos de tipo indirecto.

El reglamento sobre emisiones establece los valores máximos permitidos para los gases de combustión provenientes de calderas de hidrocarburos y biomasa, los métodos de muestreo así como los reportes operacionales, sanciones y control estatal del funcionamiento de las calderas.

3.5.13.3 NEC (National Electric Code).

El Nec establece los parámetros de operación de todo tipo de sistemas eléctricos y de control, protecciones de sobrecarga, térmicas, corto circuito y especificaciones sobre los conductores requeridos.

3.5.13.4 UL (Under Writers Laboratories).

La certificación UL asegura la calidad de los productos bajo este sello ya que son sometidos a pruebas, inspección, poseen fabricación con materiales confiables y con los más altos estándares.

3.6 Desarrollo del proyecto

3.6.1 Justificación energética.

El presente apartado busca determinar la factibilidad de la sustitución de la fuente de energía primaria, en este caso el bunker, por una fuente de energía secundaria de menor poder calorífico pero con una serie de ventajas por sobre la opción tradicional. El pellet se perfila como la mejor posibilidad para lograr dicho cambio, a continuación se determina si se puede lograr cumplir con la demanda energética del proceso de confección de llantas requerido por Bridgestone, así como el ahorro energético resultante de dicha sustitución.

Según la demanda de bunker del proceso de fabricación de llantas empleado en Bridgestone Costa Rica, es posible obtener la cantidad de energía requerida para satisfacer dicho proceso así como su respectiva conversión a kilogramos de biomasa necesarios para dar abasto a las necesidades de producción, lo cual se muestra en la siguiente tabla

Tabla 3.2. Consumo de bunker en Bridgestone Costa Rica.

Mes	Consumo (litros)
ENE 14	211.534,57
FEB 14	299.293,22
MAR 14	302.549,86
ABR 14	287.766,51
MAY 14	293.372,97
JUN 14	276.731,25
JUL 14	282.259,19
AGO 14	254.665,05
SET 14	164.181,24
Total	2.372.353,85

Elaboración propia (Microsoft Excel)

El promedio de consumo mensual se da por la suma del consumo de todos los meses dividido entre el número de meses del estudio por lo que se obtiene como resultado un valor de **2.372.353,85** litros de bunker por mes.

Haciendo uso de estos valores así como de los datos energéticos del bunker y pellets, es posible determinar la cantidad de energía aportada al proceso, esto mediante la multiplicación de los siguientes factores:

$$E_{comb\ Bun} = \text{Litros de bunker} \times \text{Densidad de combustible} \times \text{Energía de combustión}$$

Ecuación 3.2 Energía de combustión de bunker.¹⁰

$$E_{comb\ Pell} = \text{Kilogramos de pellet} \times \text{Energía de combustión}$$

Ecuación 3.3 Energía de combustión de pellet.¹¹

Tabla 3.3. Datos de densidad y energía de combustión para bunker y pellets.

Combustible	Energía Combustión (MJ/Kg)	Densidad Combustible (Kg/L)
Bunker C	41	0,9898
Pellets	18	650 (Kg/m ³)

Elaboración propia (Microsoft Excel)

¹⁰ Dedución de ecuación por conocimiento adquirido

¹¹ Dedución de ecuación por conocimiento adquirido

Tabla 3.4. Calculo de energía aportada por bunker.

Combustible	Bunker C	Unidades
Consumo Mínimo Mensual	164.181,24	Litros
Consumo Promedio Mensual	263.594,87	Litros
Consumo Máximo Mensual	302.549,86	Litros
Consumo Energía Mínimo Mensual	6.662.770,05	MJ
Consumo Energía Promedio Mensual	10.697.154,40	MJ
Consumo Energía Máximo Mensual	12.278.017,87	MJ

Elaboración propia (Microsoft Excel)

Para poder realizar la conversión de litros de bunker a kilogramos de pellet para un consumo específico de energía es necesario aplicar la siguiente fórmula de cálculo:

$$\text{Consumo equivalente de pellets} = \frac{\text{Megajulios producidos por el bunker}}{\text{Capacidad calorífica de los pellets}} \times (1 - \text{Diferencia de eficiencia entre la caldera de bunker y la caldera biomásica})$$

Ecuación 3.4 Consumo equivalente de pellet.¹²

Según se desprende de la formula, es necesario conocer la eficiencia de ambas calderas para poder realizar una aproximación apropiada de la cantidad de kilogramos de pellet que deben suministrarse para igualar la cantidad de energía aportada por el bunker. Para la caldera biomásica según se puede observar en el Anexo 4. Información técnica de la caldera, la eficiencia garantizada es de un 88%, siendo este un dato conservador ya que la caldera se encuentra en

¹² Tomada de documentación proporcionada pro Eco Solutions

capacidad de alcanzar eficiencias mayores, determinables al momento de la puesta en marcha de la misma.

En el caso de las calderas de bunker es posible conocer la eficiencia de las mismas mediante el siguiente estudio realizado por el departamento de mantenimiento de Bridgestone de Costa Rica.

Para determinar la eficiencia instantánea de las calderas de bunker es necesario aplicar la siguiente fórmula de cálculo:

$$\eta = \frac{\text{Prod. Vapor [Ton/h]} \times (\text{Entalpia vapor} - \text{Entalpia agua de entrada})[\text{KJ/Kg}]}{[(\text{Poder calorifico del bunker})[\text{KJ/Kg}] \times \text{Consumo de bunker} [\text{Kg/h}]] \times 100000}$$

Siendo necesarios los siguientes datos del bunker para determinar la eficiencia.

Tabla 3.5. Propiedades físicas y termodinámicas del bunker.

Densidad(kg/l)	0,989
Factor(kg/h)	0,989
1gal-3,785litros	
Poder calorífico (kJ/kg)	41000
Entalpía de Agua y vapor	
hv @(225psi=15,51bar)(kJ/kg)	2792,94
hf @(100°C)(kJ/kg)	419,04

Elaboración propia (Microsoft Excel)

A continuación se presenta un fragmento del resultado del cálculo de la eficiencia instantánea asociada a la producción de vapor de ambas calderas de bunker para un periodo de 13 días, el estudio completo se encuentra desde el Apéndice 1 hasta el Apéndice 10 del presente informe.

Tabla 3.6. Eficiencia instantánea promedio del 14-07-14 turno nocturno.

Hora	Caldera 1 (Kg/h)	Caldera 3 (Kg/h)	Total	Eficiencia (%)	Litros/día	Litros/Hora promedio
06:00:00 p.m.	6833	6517	13350	82,0	22893,5725	953,9
07:00:00 p.m.	6889	3123	10012	61,5		953,9
08:00:00 p.m.	7328	4748	12076	74,2		953,9
09:00:00 p.m.	7873	6097	13970	85,8		953,9
10:00:00 p.m.	6210	3251	9461	58,1		953,9
11:00:00 p.m.	6744	8968	15712	96,5		953,9
12:00:00 a.m.	6335	6538	12873	79,1		953,9
01:00:00 a.m.	6678	7298	13976	85,9		953,9
02:00:00 a.m.	6760	7721	14481	89,0		953,9
03:00:00 a.m.	7706	6256	13962	85,8		953,9
04:00:00 a.m.	8024	8769	16793	103,2		953,9
05:00:00 a.m.	7551	6706	14257	87,6		953,9

Elaboración propia (Microsoft Excel)

Tabla 3.7. Eficiencia instantánea promedio del 15-07-14 turno diurno.

Hora	Caldera 1 (Kg/h)	Caldera 3 (Kg/h)	Total	Eficiencia (%)	Litros/día	Litros/Hora promedio
06:00:00 a.m.	6647	2706	9353	59,1	22267,912	927,8
07:00:00 a.m.	7267	6015	13282	83,9		927,8
08:00:00 a.m.	7614	4300	11914	75,3		927,8
09:00:00 a.m.	6277	3667	9944	62,8		927,8
10:00:00 a.m.	7104	7341	14445	91,2		927,8
11:00:00 a.m.	7537	6590	14127	89,2		927,8
12:00:00 p.m.	6665	5055	11720	74,0		927,8
01:00:00 p.m.	7483	4753	12236	77,3		927,8
02:00:00 p.m.	6907	4767	11674	73,7		927,8
03:00:00 p.m.	7442	2698	10140	64,1		927,8
04:00:00 p.m.	7203	5173	12376	78,2		927,8
05:00:00 p.m.	6904	5130	12034	76,0		927,8

Elaboración propia (Microsoft Excel)

Tabla 3.8. Eficiencia instantánea promedio 15-07-14 turno nocturno.

Hora	Caldera 1 (Kg/h)	Caldera 3 (Kg/h)	Total	Eficiencia (%)	Litros/día	Litros/Hora promedio
06:00:00 p.m.	5943	5695	11638	73,5	22267,912	927,8
07:00:00 p.m.	6107	5866	11973	75,6		927,8
08:00:00 p.m.	5782	4876	10658	67,3		927,8
09:00:00 p.m.	6330	4912	11242	71,0		927,8
10:00:00 p.m.	5409	5807	11216	70,8		927,8
11:00:00 p.m.	6702	5164	11866	75,0		927,8
12:00:00 a.m.	6012	4321	10333	65,3		927,8
01:00:00 a.m.	6450	10488	16938	107,0		927,8
02:00:00 a.m.	5524	4987	10511	66,4		927,8
03:00:00 a.m.	6631	5514	12145	76,7		927,8
04:00:00 a.m.	5288	6283	11571	73,1		927,8
05:00:00 a.m.	5700	4853	10553	66,7		927,8

Elaboración propia (Microsoft Excel)

Para el periodo de tiempo de los 13 días para los cuales se realizó el estudio, tomando en cuenta todos los valores de eficiencia instantánea obtenidos, se da el resultado de un 73% de eficiencia promedio.

Una vez obtenido este valor se procede a determinar el consumo equivalente de pellets que van a aportar la misma cantidad de energía al proceso de producción de vapor que el bunker, dándose el siguiente resultado.

Tabla 3.9. Consumo equivalente de pellets.

PELLETS		
Consumo Pellets Mínimo Mensual	329,44	Toneladas Métricas
Consumo Pellets Promedio Mensual	528,91	Toneladas Métricas
Consumo Pellets Máximo Mensual	607,08	Toneladas Métricas

Elaboración propia (Microsoft Excel)

El resultado anterior muestra la cantidad de pellet necesario para cumplir con la necesidad energética total promedio del proceso para un mes, en el caso de la determinación de la cantidad de pellet necesario para abastecer la caldera de biomasa que vendría a sustituir una de las calderas de bunker, es necesario conocer que tanto de esa energía vendría a ser aportada por la nueva caldera y

cuanto es el ahorro energético estimado, para de esta manera conocer la forma de interacción entre las tres calderas.

En la siguiente tabla se muestra la comparación de la producción de vapor de las tres calderas, esto con el fin de determinar cuál es el porcentaje de ahorro o sustitución del consumo de vapor que es capaz de proporcionar la caldera de biomasa, para esto se toma el dato de la capacidad nominal de flujo de vapor de la caldera biomásica, proveniente de la justificación técnica.

Tabla 3.10. Tabla comparativa de producción de vapor.

Fecha	Generación caldera 1 (Kg/h)	Generación caldera biomasa (Kg/h)	Generación caldera 3 (Kg/h)
14/07/2014	84931	110400	75992
15/07/2014	156928	220800	126961
16/07/2014	138400	220800	133028
17/07/2014	142682	220800	135306
18/07/2014	137245	220800	129278
19/07/2014	130219	220800	127182
20/07/2014	151773	220800	118665
21/07/2014	145768	220800	132171
22/07/2014	147507	220800	67358
23/07/2014	139355	220800	138682
24/07/2014	132412	220800	133736
25/07/2014	132949	220800	134257
26/07/2014	146641	220800	135246

Elaboración propia (Microsoft Excel)

En la determinación del porcentaje de sustitución de la caldera biomásica se debe tomar en consideración el Turn Down de la caldera. El Turn Down es el porcentaje mínimo al cual puede trabajar una caldera sin que se apague, en un escenario ideal, para el sistema de generación de vapor de Bridgestone, las calderas de bunker permanecerían apagadas hasta que por la demanda del

Capítulo 3 Sistema de generación de vapor de Bridgestone de Costa Rica

sistema deban encenderse y suministrar el vapor faltante, dejando a la caldera de biomasa llevar el total de la carga. El funcionamiento real del sistema consistiría en encender la caldera de biomasa de manera simultánea con una de las calderas de bunker, así en caso de un fallo de alguna de las calderas la producción no se vería afectada.

Por lo tanto al ser necesario dejar una de las calderas de bunker encendidas, en su capacidad mínima, el total de la demanda de vapor se reparte entre ambas calderas, reduciendo la capacidad de aporte de vapor de la caldera de biomasa.

Tomando como base los consumos de vapor de la Tabla 3.10 y el consumo de vapor teórico de la caldera de biomasa es posible calcular el porcentaje de sustitución de vapor.

Tabla 3.11. Sustitución de vapor respecto de la caldera 1.

Fecha	Consumo caldera 1 (Kg/día)	Consumo caldera biomasa (Kg/día)	Total (Kg/día)	% sustitución
14/07/2014	84931	110400	160923,00	47%
15/07/2014	156928	220800	283889,00	45%
16/07/2014	138400	220800	271428,00	49%
17/07/2014	142682	220800	277988,00	49%
18/07/2014	137245	220800	266523,00	49%
19/07/2014	130219	220800	257401,00	49%
20/07/2014	151773	220800	270438,00	44%
21/07/2014	145768	220800	277939,00	48%
22/07/2014	147507	220800	214865,00	31%
23/07/2014	139355	220800	278037,00	50%
24/07/2014	132412	220800	266148,00	50%
25/07/2014	132949	220800	267206,00	50%
26/07/2014	146641	220800	281887,00	48%

Elaboración propia (Microsoft Excel)

Tabla 3.12. Sustitución de vapor respecto de la caldera 3.

Fecha	Consumo caldera 3 (Kg/día)	Consumo caldera biomasa (Kg/día)	Total (Kg/día)	% sustitución
14/07/2014	75992	110400	160923,00	53%
15/07/2014	126961	220800	283889,00	55%
16/07/2014	133028	220800	271428,00	51%
17/07/2014	135306	220800	277988,00	51%
18/07/2014	129278	220800	266523,00	51%
19/07/2014	127182	220800	257401,00	51%
20/07/2014	118665	220800	270438,00	56%
21/07/2014	132171	220800	277939,00	52%
22/07/2014	67358	220800	214865,00	69%
23/07/2014	138682	220800	278037,00	50%
24/07/2014	133736	220800	266148,00	50%
25/07/2014	134257	220800	267206,00	50%
26/07/2014	135246	220800	281887,00	52%

Elaboración propia (Microsoft Excel)

Según es posible observar de la tabla anterior, la caldera de biomasa en términos teóricos es capaz de sustituir entre un 40% y un 50% de la necesidad de vapor de la planta de producción de llantas, la razón de estos valores se da en la variabilidad de las necesidades de vapor del proceso de fabricación de las llantas.

Según distintos factores como la hora del día, y el tipo de maquinaria que se esté usando en un instante específico, los consumos de vapor van desde los 12150 Kg/h hasta los 16200 Kg/h por lo que la caldera de biomasa es capaz de suplir una parte de la totalidad del consumo.

De los datos anteriormente mostrados se desprende el cálculo del bunker que se deja de consumir por concepto de la sustitución de vapor que realiza la caldera de biomasa. Tomando como base los valores de 40 – 50% de sustitución se determina la energía total sustituida y los galones de bunker equivalentes.

Tabla 3.13. Consumo de bunker evitado por sustitución de vapor.

Entalpia de vapor @ 225 psi (Kcal/Kg)	667,409
Poder calorífico del bunker (Kcal/Kg)	9799,23
Densidad del bunker (Kg/m ³)	989,8
Generación promedio de vapor (Kg/día)	259590,15
Total de energía producida (Kcal/día)	173252802,42
Sustitución de vapor de 40% (Kcal/día)	69301120,97
Bunker evitado por sustitución de 40% (Gal/día)	1890,21
Sustitución de vapor de 50% (Kcal/día)	86626401,21
Bunker evitado por sustitución de 50% (Gal/día)	2362,76

Elaboración propia (Microsoft Excel)

Como se desprende de la Tabla 3.13, se evita el consumo de entre 1890 y 2362 galones de bunker por día gracias al aporte de la caldera de biomasa para generación de vapor.

3.6.2 Justificación técnica.

Con el fin de justificar la sustitución de la caldera de bunker por la caldera biomásica se procede a realizar un análisis técnico sobre las necesidades de producción de la planta Bridgestone así como el dimensionamiento de los componentes adecuados para satisfacer la demanda de vapor, a continuación se presentan los datos técnicos de las calderas con las que cuenta la planta.

Tabla 3.14. Datos de placa de las calderas de Bridgestone Costa Rica.

Información General de la Empresa			
Nombre	Bridgestone de Costa Rica		
Persona de Contacto	Daniel Solís		
Correo	solisdaniel@bfc.co.cr		
Teléfono	2209-7466		
Información de la Caldera o Calderas Actuales			
Marca	Babcock Wilcox	Cleaver- Brooks	Babcock Wilcox
Potencia	600 bhp	800 bhp	1200 bhp
Año de instalación	1980	2003	2005
Combustible actual	Bunker	Bunker	Bunker
Costo unitario de combustible actual (\$)	0,77	0,77	0,77
Horas laborales por día	24	24	0
Horas laborales por año	8400	8400	0
Vapor o agua	Vapor	Vapor	Vapor
Presión y temperatura	225 lbs@200°C	225 lbs@200°C	225 lbs@200°C
Consumo de combustible por año (lt)	6,382,056.00		
Gasto en combustible por año (CRC) (colones)	2544880943		
La demanda de vapor es estable (S/N)	N	N	N
Cuentan con datos sobre el consumo de vapor a diferentes intervalos de tiempo	NO	NO	NO

Fuente: Bridgestone de Costa Rica

Como se puede observar de la tabla se cuenta con tres calderas de vapor con capacidades de 600 BHP, 800 BHP y 1200 BHP; de estas la caldera marca Cleaver Brooks de 800 BHP es por lo que sería sustituida la caldera de biomasa.

Tomando como datos principales la capacidad y presión de operación de la caldera antigua (800 BHP @ 225 psi) es que se realiza la escogencia de la caldera de biomasa adecuada para realizar el reemplazo. Es importante aclarar que una caldera de biomasa no tiene la capacidad de realizar cambios súbitos en la presión de operación como lo puede efectuar una de bunker, para alcanzar la presión de operación de 225 psi (15,5 bar), se necesita un periodo de tiempo considerable. En las condiciones del proceso de fabricación de las llantas la demanda de vapor va desde los 9 ton/h hasta las 13 ton/h, por lo que la caldera de biomasa deberá emplearse únicamente para llevar la carga base de la demanda y en los periodos punta las calderas de bunker restantes deberán suplir la diferencia, la producción de vapor con biomasa no puede exigirse a suplir los picos de producción ya que podría excederse la capacidad de la misma y provocar problemas de operación además de acortar la vida útil del equipo.

A continuación se detallan los datos técnicos de los equipos a emplearse en la caldera de biomasa, así como cálculos de dimensionamiento y selección.

3.6.2.1 Escogencia de caldera y capacidad.

Con el fin de realizar una adecuada selección de la caldera biomásica es necesario evaluar una serie de puntos que determinen si el equipo escogido es el adecuado para los requerimientos del proceso.

- *Potencia:* La potencia de la caldera escogida es de 600 BHP con una presión de operación de 18 bares, esto debido a que para las características de presión del proceso presente en Bridgestone, así como la potencia necesaria se determina que este equipo cumple con las exigencias mínimas de operación.
- *Tipo de caldera:* La caldera de biomasa seleccionada posee la característica de fusionar los sistemas acuo tubular y piro tubular para realizar un mejor aprovechamiento de la energía y asegurar una mejor calidad de vapor, que al pasar por ambos sistemas, resulta en un vapor saturado que tiende a sobrecalentamiento, es decir más seco y con más

beneficios para los usuarios finales ya que entrega una mayor cantidad de energía en forma de calor durante su paso por el proceso.

- *Eficiencia del fabricante:* Para la caldera seleccionada el fabricante VYNCKE garantiza un 88% de eficiencia, además esta empresa se caracteriza por su efectiva asistencia técnica y pronta respuesta.
- *Combustible a utilizar:* Se emplea el pellet como combustible debido a que de todas los tipos de biomasa disponibles en el mercado es una de las que posee el mayor poder calorífico de aproximadamente 4300 Kcal/Kg, además de que se asegura su suministro constante gracias a la planta Pelletics donde se fabrica el mismo, ubicada en Muelle de San Carlos de Alajuela.
- *Facilidad de mantenimiento:* A diferencia de las calderas de bunker, la biomasa tiene como residuo la ceniza que se convierte en un factor de suma importancia en cuestiones de mantenimiento, su adecuado manejo y remoción aseguran el buen funcionamiento del equipo, la caldera seleccionada cuenta con un sistema de filtros multiciclón que se encargan de eliminar la ceniza de los gases de combustión y depositarla hasta contenedores de fácil manejo para su extracción. La ceniza depositada en la cámara de combustión se extrae sin necesidad de ingresar a la misma, simplemente arrastrándola hasta las compuertas, garantizando la seguridad de los operadores y del equipo.
- *Repuestos accesibles localmente:* La empresa fabricante de la caldera es de origen Belga con representación en Europa, Asia y América latina, a pesar de no contar con un representante directo en Costa Rica esta empresa garantiza un stock de repuestos como parte del contrato así como asistencia local y remota las 24 horas del día durante todo el año.
- *Numero de pasos:* Las calderas de bunker o diesel cuentan generalmente con 4 pasos para el tipo piro tubular, la caldera de biomasa cuenta únicamente con 2 pasos ya que al poseer también un sistema acuo tubular el agua llega al tambor casi convertida en vapor por lo que dentro del mismo se da un recalentamiento que mejora la calidad de salida del flujo,

por lo que la adición de mas pasos en innecesaria para alcanzar las condiciones de operación.

Finalmente, después de tomar en consideración los puntos anteriormente mostrados se presenta la selección de la caldera de biomasa a instalarse en Bridgestone de Costa Rica.

Tabla 3.15. Datos técnicos de caldera biomásica VYNCKE.

Fabricante	VYNCKE	País	Bélgica
Marca	VYNCKE	Modelo	JH-HD
Producción nominal con agua a 105°C a nivel del mar			9200 Kg/h
Presión de diseño	20 Bar	Presión de trabajo	18 Bar
Capacidad térmica	6000 KW		
Combustible	Pellet		
Potencia	600 BHP		
Capacidad calorífica media del combustible	4300 Kcal/Kg		

Elaboración propia (Microsoft Excel)



Figura 3.6. Caldera biomásica VYNCKE.¹³

Haciendo uso de los datos mostrados es posible realizar los cálculos de dimensionamiento de los subsistemas de la caldera, como el silo de almacenamiento, alimentación de agua, gases de combustión, entre otros, dichos cálculos se muestran a continuación.

3.6.2.2 Consumo de pellet y dimensionamiento de silo.

Al eliminar una de las calderas de, se elimina también el tanque de almacenamiento de bunker correspondiente a la misma, por lo que este espacio será utilizado para la construcción del silo de pellet.

Entre las condiciones mínimas con las que debe contar la estructura es hermeticidad para evitar la salida de polvo hacia los alrededores, así como el ingreso de agua dentro del silo ya que si se moja aumenta su volumen causando atascamientos además de que pierde parte de sus propiedades como combustible. El consumo de pellet de la caldera, dimensiones del silo, autonomía y demás cálculos se presentan a continuación.

¹³ Tomado de documentación proporcionada por Eco Solutions

Con el fin de dimensionar el silo de pellet, es preciso determinar primero el consumo máximo de la caldera.

- Cálculo de la potencia de consumo

$$P_c = \frac{P_n}{\eta}$$

Ecuación 3.5 Potencia de consumo de la caldera¹⁴

Donde:

P_c = Potencia de consumo expresada en Kilo watts.

P_n = Potencia neta de la caldera en Kilo watts.

η = Eficiencia de la caldera

Para una potencia neta de 6000 KW y una eficiencia teórica del 88%

$$P_c = \frac{6000KW}{0.88} = 6818,18 KW$$

- Calculo de la energía consumida

$$E_c = P_c \times H_f$$

Ecuación 3.6 Energía consumida por la caldera¹⁵

Donde:

E_c = Energía consumida.

P_c = Potencia de consumo.

H_f = Horas de funcionamiento por día.

Para una potencia de consumo de 6818,18 y 24 horas de funcionamiento por día

$$E_c = 6818,18 KW \times 24 \frac{h}{día} = 163 636,32 \frac{KWh}{día}$$

¹⁴ Tomado de (Delgado, 2012)

¹⁵ Tomado de (Delgado, 2012)

- Cálculo de la biomasa consumida

$$Bc = \frac{Ec}{PCI}$$

Ecuación 3.7 Biomasa consumida por la caldera¹⁶

Donde:

Bc = Biomasa consumida expresada en kilogramos por día.

Ec = Energía consumida expresada en KWh por día.

PCI = Poder calorífico inferior de la biomasa utilizada expresada en KWh por kilogramo.

Para una energía consumida de 163 636,32 KWh por día y un poder calorífico inferior del pellet de 5 KWh por kilogramo

$$Bc = \frac{163\,636,32\text{ KWh/día}}{5\text{ KWh/Kg}} = 32\,727,36\frac{\text{Kg}}{\text{día}}$$

El silo de almacenamiento de combustible a instalar cuenta con las siguientes características:

¹⁶ Tomado de (Delgado, 2012)

Tabla 3.16. Características constructivas del silo de almacenamiento de pellet.

SILO		
Volumen Total	235,68	m³
Peso Total	153,19	Ton
Cilindro		
Alto cada anillo:	0,82	m
Número anillos:	11,00	unidades
Alto TOTAL:	9,02	m
Diámetro:	5,50	m
Volumen cada anillo	19,48	m ³
Peso cada anillo	12,66	Ton
Volumen Total	214,30	m³
Peso Total	139,30	Ton
Cono		
Alto cono	2,7	m
Diámetro	5,5	m
Volumen Total	21,38	m³
Peso Total	13,90	Ton

Elaboración propia (Microsoft Excel)

Como es posible notar en la tabla anterior, el volumen total del silo contemplando la parte cilíndrica junto con la parte cónica de la base es de 235,68 m³, al tomar este dato junto con la densidad del pellet de 650 Kg/ m³ se obtiene que la capacidad de almacenamiento total del silo es de 153 192 kg.

- Cálculo de la autonomía del silo

La autonomía del silo representa la cantidad máxima de tiempo que puede transcurrir en funcionamiento la caldera en las condiciones nominales de operación, además determina la frecuencia de carga de combustible.

La autonomía del silo se determina mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Autonomía} = \frac{\text{Capacidad de almacenamiento en kg}}{\text{Biomasa consumida en kg/día}}$$

Ecuación 3.8 Autonomía del silo de pellet¹⁷

Para una capacidad de almacenamiento de 153 192 Kg y una biomasa consumida de 32 727,36 Kg/día

$$\text{Autonomía} = \frac{153\,192\text{ Kg}}{32\,727,36\text{ Kg/día}} = 4,68\text{ días}$$

El dato anterior revela la necesidad de abastecer el silo de pellet en un periodo de tiempo máximo de cada dos días, ya que hacerlo en intervalos de tiempo más prolongados podría poner en riesgo la continuidad de la producción de vapor, la alta demanda de pellet de la caldera de casi 33 toneladas por día exige un servicio de suministro constante.

3.6.2.3 Sistema de suministro de pellet al silo y cuarto de calderas.

Para realizar el abastecimiento de pellet al silo se utiliza un sistema elevador por medio de una banda con canchales que toman el combustible y llevan hasta la parte superior del silo, en este punto lo descargan por un conecta con el interior del mismo, este ducto debe contar con un ángulo de 30 grados para asegurar que el pellet se deslice dentro del ducto y no se

¹⁷ Tomado de (Delgado, 2012)

produzcan atascamientos. El sistema de elevador se representa mediante la

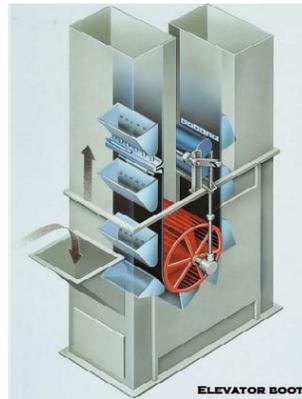
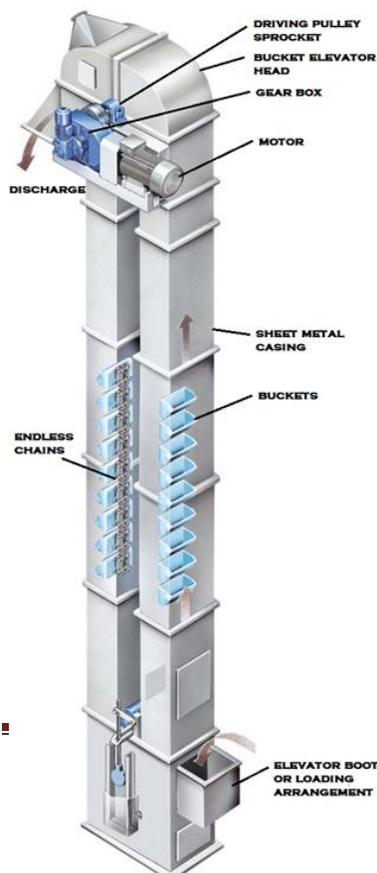


Figura 3.7. en donde las flechas indican la dirección del movimiento del sistema que en su parte inferior carga el pellet y en su parte superior lo descarga hacia el ducto de salida. En la parte inferior del silo se ubicará un tornillo sin fin que se encargará de alimentar un segundo elevador de pellet que descargará a un ducto que lleva hasta la parte interna del cuarto de calderas, donde se encuentra un segundo tornillo sin fin que lleva el combustible hasta el sistema de alimentación de biomasa de la caldera, el mismo consiste en un depósito de pellet que combina válvulas dosificadoras y tornillos sin fin para introducir el combustible dentro de la

cámara de combustión. El sistema de tornillos sin fin se representa mediante la Figura 3.8 así como sus partes fundamentales.



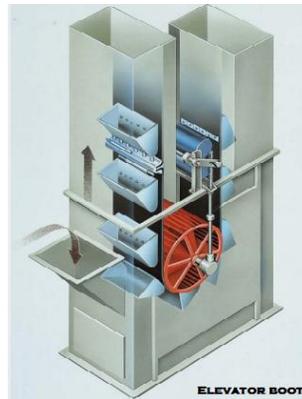


Figura 3.7. Sistema elevador de pellets.¹⁸

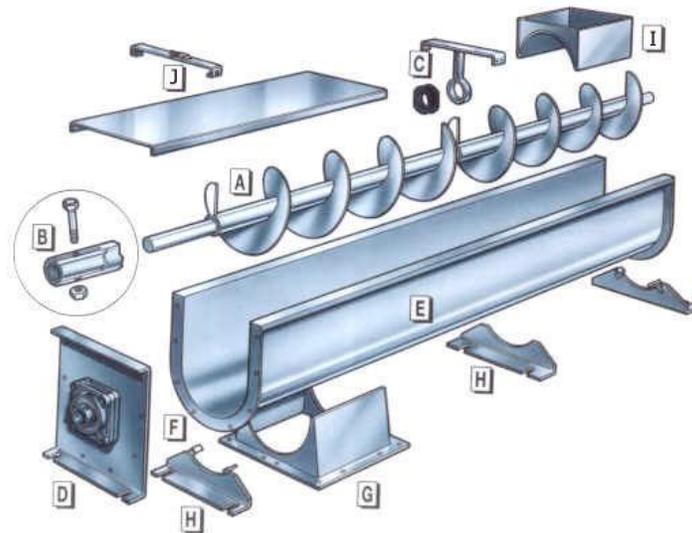


Figura 3.8. Tornillo helicoidal alimentador de pellets.¹⁹

Partes del sistema de tornillo alimentador:

- A- Tornillo
- B- Cojinetes extremos
- C- Soporte intermedio para eje
- D- Tapa trasera o delantera y soporte de rodamiento

¹⁸ Tomado de www.mechanicalengineeringblog.com

¹⁹ Tomado de dim.usal.es

- E- Artesas
- F- Brida de unión
- G- Boca de descarga
- H- Apoyos intermedios
- I- Boca de carga
- J- Tapa superior
- K- Unidad de accionamiento

A continuación se muestra la ubicación del sistema elevador y de transporte de pellet por tornillos sin fin hasta el bunker dosificador de la caldera.

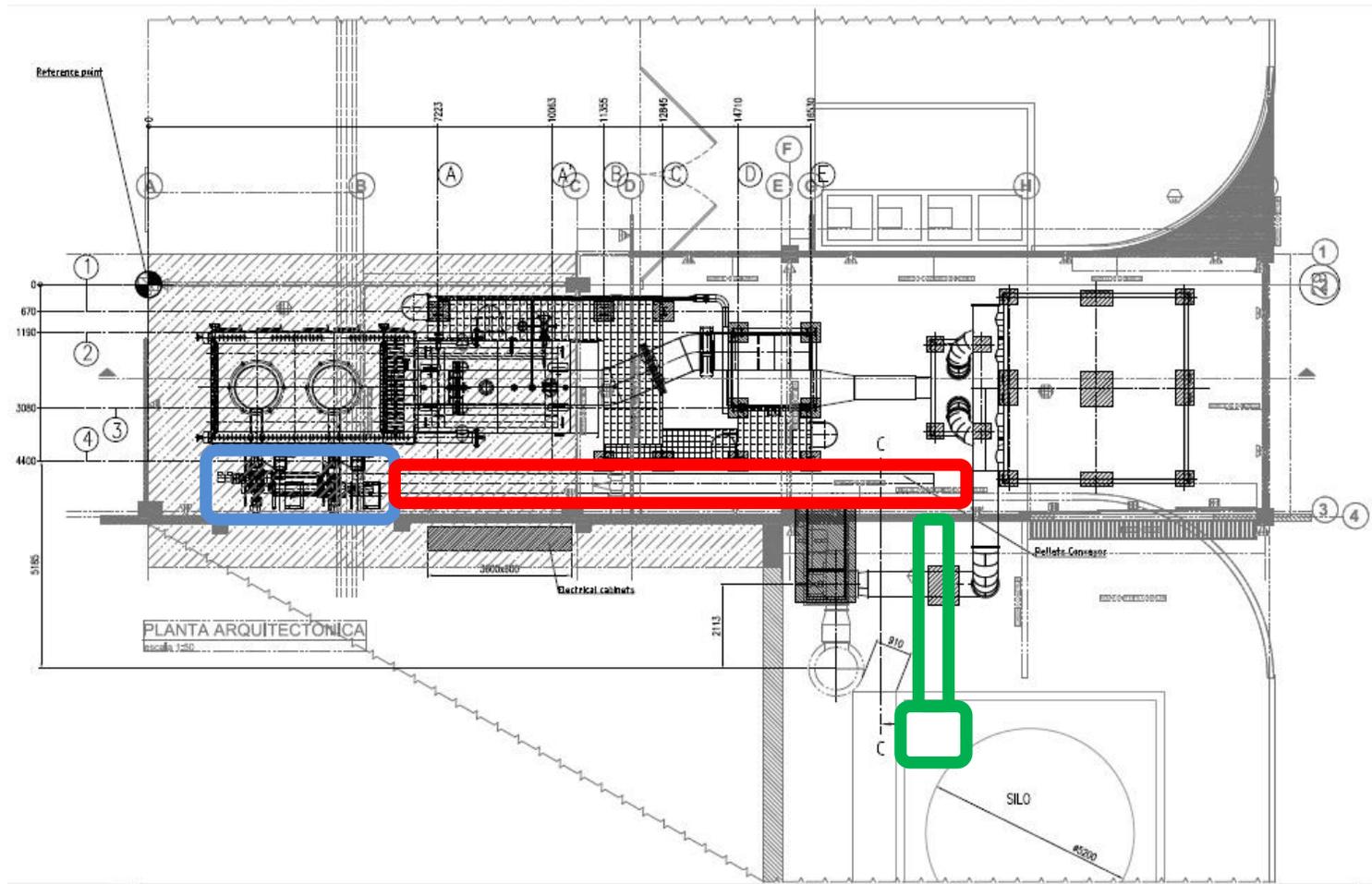


Figura 3.9. Representación del sistema de alimentación silo - caldera.²⁰

²⁰ Tomado de documentación proporcionada por Eco Solutions

Según la representación anterior es posible observar el silo de almacenamiento de pellet desde el cual, marcado con color verde se muestran la ubicación del elevador de pellet que es alimentado mediante un tornillo sin fin que se encuentra en la base del contenedor, una vez que el pellet es elevado cae por un ducto que posee una inclinación de 40° a través de la pared del cuarto de calderas.

Una vez el pellet atraviesa la pared cae en un segundo tornillo alimentador, el cual se observa de color rojo en la imagen anterior, de esta forma se transporta el combustible hasta el bunker dosificador de la caldera, marcado de color azul.

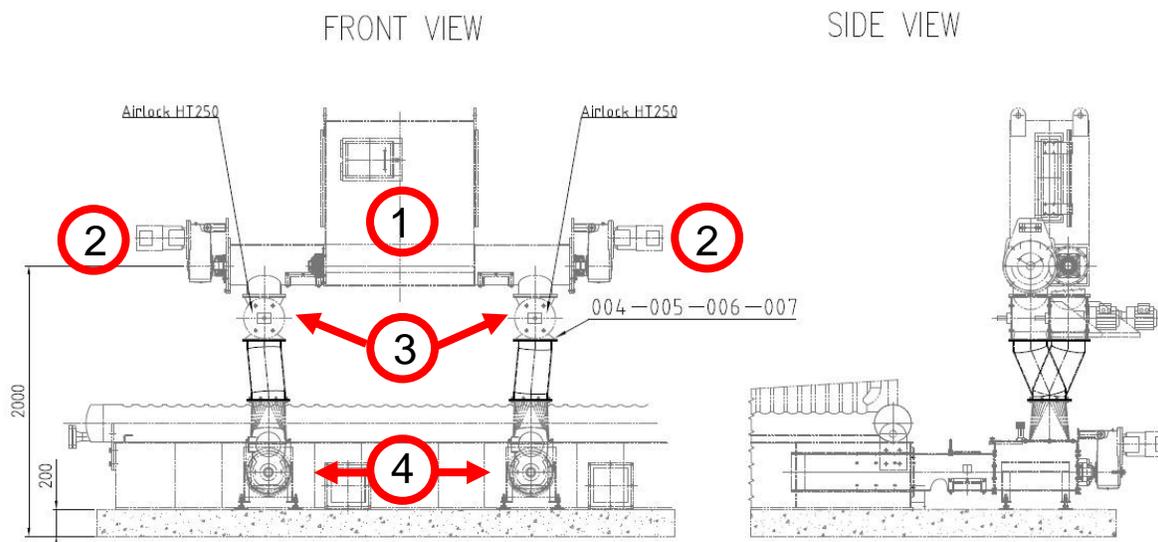


Figura 3.10. Bunker dosificador de pellet.²¹

Como se observa en la Figura 3.10, el bunker dosificador de pellet se compone de las siguientes partes:

- 1- Bunker o contenedor de pellet: En este punto el pellet proveniente del tornillo alimentador es contenido para luego ser transportado a través del sistema dosificador hacia el interior de la caldera.

²¹ Tomado de documentación proporcionada por Eco Solutions

- 2- Tornillos sin fin: Se componen de dos tornillos pilotados por dos motores de velocidad variable que se encargan de dirigir el pellet hasta las válvulas dosificadoras según la necesidad de combustible de la caldera.
- 3- Válvulas dosificadoras: Son válvulas que como su nombre lo indica se encargan de dosificar la entrega de pellet desde los tornillos sin fin del bunker hasta los tornillos de alimentación de la caldera.
- 4- Tornillos de alimentación de la caldera: Se encargan de introducir el pellet dentro de la cámara de combustión, en las hornillas de quemado.

3.6.2.4 Dimensionamiento del sistema de alimentación de agua.

Un buen sistema de alimentación de agua debe satisfacer las necesidades del líquido en la caldera en todo momento y bajo cualquier circunstancia dentro de los parámetros de diseño y operación, el correcto dimensionamiento de los elementos que lo conforman es de suma importancia para el adecuado funcionamiento del equipo y la adecuada generación de vapor. Una caldera que no pueda sustituir el agua que expulsa en forma de vapor de una manera rápida y efectiva, va a presentar problemas por bajo nivel de agua e incluso el riesgo de un daño catastrófico, como una sobrecarga de calor que resulte en un daño permanente del equipo.

Las bombas de agua a instalar para la alimentación de agua deben cumplir con cuatro requisitos fundamentales:

- La presión de operación de la bomba debe ser al menos un 10% mayor a la presión de la caldera, esto con el propósito de asegurar que el agua pueda entrar dentro del tambor de vapor.
- La bomba deben de estar en la capacidad de trabajar con agua a más de 100°C, según el requerimiento de agua de alimentación de la caldera.
- El caudal de la bomba debe ser suficiente para llenar la caldera al menos con la misma velocidad que la misma se convierte en vapor y sale por la línea principal.

- La cabeza neta de succión positiva NPSH debe ser mayor a la requerida para evitar problemas de cavitación dentro de la bomba.

Según el primer requerimiento la presión de operación de la caldera es de 18 Bar, por lo que la bomba debe estar en capacidad de entregar como mínimo 19,8 Bar (287 psi) para asegurar la efectiva sustitución de agua dentro del tambor de vapor.

Básicamente una tonelada de agua se convierte en una tonelada de vapor luego de ser elevada su temperatura, tomando esto como base se realiza el cálculo del caudal de agua necesario para abastecer la caldera mediante la siguiente fórmula:

$$Q_{agua} = \frac{Mv}{\rho a}$$

Ecuación 3.9 Caudal de agua para abastecer la producción de vapor²²

Donde:

Q_{agua} = Caudal de agua en m^3 por hora

Mv = Masa de vapor en kilogramos por hora

ρa = Densidad de agua bajo condiciones de entrada a la bomba @ 105°C

Para una masa de vapor de 9200 Kg/h y una densidad de agua de 955 Kg/ m^3 a 105°C

$$Q_{agua} = \frac{9200 \text{ Kg/h}}{955 \text{ Kg/m}^3} = 9,63 \frac{m^3}{h} \times \frac{1000 \text{ l}}{m^3} = 9630 \frac{\text{l}}{h} \times \frac{1 \text{ Gal}}{3,78 \text{ l}} \times \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} = 42,46 \frac{\text{Gal}}{\text{min}}$$

Según el reglamento de calderas en su apartado de sistemas de agua de alimentación, artículo 27 la capacidad de los aparatos de alimentación debe ser de 1,5 veces la capacidad de producción de vapor de la caldera, por lo tanto el caudal mínimo que la bomba debe suplir es de 63,7 Galones por minuto.

²² Dedución de ecuación por conocimiento adquirido

La cabeza neta de succión positiva NPSH es una característica de todo sistema de bombeo y hace referencia a la presión que tiene el líquido bombeado en la toma de aspiración, por encima de su presión de vapor.

Existen dos parámetros fundamentales para la selección de la bomba, el NPSH disponible que hace referencia a la presión que posee el líquido en el orificio de aspiración de la bomba y el NPSH requerido que es la presión del líquido que una bomba necesita para funcionar de manera correcta.

En todo momento el NPSH disponible debe ser mayor que el NPSH requerido para asegurar que la bomba succione y entregue la cantidad de líquido adecuado.

El NPSH se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$NPSH = H_o \pm h - (h_v + h_s)$$

Ecuación 3.10 Caudal de agua para abastecer la producción de vapor²³

Donde:

H_o = Presión atmosférica en metros de columna de agua (mca).

h_v = Presión de vapor del fluido a la temperatura de bombeo en mca.

h = Altura geométrica en metros hasta el nivel del agua en el depósito de succión, positiva si el nivel de agua del depósito de succión se encuentra por encima del nivel de la bomba, negativo si está por debajo.

h_s = Pérdidas de carga en la línea de succión.

El valor de presión atmosférica depende del lugar en el cual se encuentra operando la bomba por lo que para Belén de Heredia posee un valor de 10,37 mca según el instituto meteorológico nacional.

La presión de vapor se obtiene de las tablas termodinámicas a la temperatura que se encuentra el líquido bombeado, como es posible observar en

²³ Tomado de (Zavaleta, 2012)

el Anexo 5. Tabla de propiedades termodinámicas del agua por temperatura, para una temperatura de 105°C se obtiene un valor de 120,9 kilo pascales.

El valor de 120.9 kilo pascales equivale a 12,32 metros de columna de agua. La altura geométrica depende exclusivamente de la configuración de la instalación y de la diferencia de altura entre la bomba y el depósito de succión.

Finalmente el valor de pérdida de carga en la línea se obtiene mediante la fórmula de Darcy-Weisbach dada por

$$h_s = f \times \left(\frac{L}{D}\right) \times \left(\frac{V^2}{2g}\right)$$

Ecuación 3.11 Pérdida de carga en tuberías, Darcy Weisbach²⁴

Donde:

- f = coeficiente de fricción (a dimensional)
- L= longitud de la tubería (m)
- D = diámetro interno de la tubería (m)
- v = velocidad media (m/s)
- g = aceleración de la gravedad (m/s²)

Para el cálculo de f se empleo el diagrama de Moody haciendo uso de la rugosidad relativa característica del material del que está hecha la tubería y del número de Reynolds, según se muestra en el **Anexo 1. Diagrama de Moody para la determinación del factor de fricción de flujo en tuberías**

Del cálculo del NPSH disponible se desprenden las siguientes tablas de datos necesarios y resultados.

²⁴ Tomado de (Miliarium Ingeniería Civil y Medio Ambiente)

Tabla 3.17. Tabla de datos necesarios para la determinación del NPSH.

Datos Necesarios		
Longitud de la tubería	9,8	metros
Diámetro interno	0,06271	metros
Longitud equivalente por accesorios	44,6	metros
Velocidad media	2	m/s
Aceleración gravitacional	9,81	m/s ²
Densidad del agua	958	Kg/m ³
Viscosidad dinámica del agua	0,000282	Ns/m ³
Rugosidad absoluta de la tubería	0,0000024	metros
Presion atmosférica	10,37	mca
Presion de vapor	12,32	mca
Altura vertical a nivel de agua	3,9	metros
Presion del tanque desaereador	10,55	mca

Elaboración propia (Microsoft Excel)

Tabla 3.18. Resultado de cálculo para el NPSH disponible.

Cálculos		
Número de Reynolds	426072,20	
Rugosidad Relativa	3,82714E-05	
Coeficiente de fricción f Moody	0,011	
Pérdida de carga	1,94	mca
NPSH disponible	10,55	mca

Elaboración propia (Microsoft Excel)

En síntesis para la selección de la bomba es necesario que la misma cumpla con los siguientes parámetros:

- Caudal de descarga de 63,7 gpm como mínimo.
- Presión de descarga de 287 psi como mínimo.
- NPSH requerido menor o igual a 10,55 mca.

La elección de la bomba que va a ser colocada en el sitio de la instalación dependerá del análisis del departamento de ingeniería de Bridgestone de Costa Rica por lo que una propuesta para la colocación de una bomba específica se encuentra fuera de los alcances del presente proyecto.

3.6.2.5 Características de la caldera.

Con el fin de producir la máxima cantidad de vapor al mínimo consumo de combustible, la caldera biomásica VYNCKE hace uso de tecnologías innovadoras para asegurar la calidad del vapor generado además de la eficiencia garantizada de un 88%, esto sin dejar de lado la normativa medio ambiental de emisiones para los gases de combustión.

Para poder cumplir con todo esto la caldera cuenta con varios sistemas que se presentan a continuación.

- *Combinación Acuo – Piro tubular*

Como es conocido una caldera puede ser acuo tubular, es decir el agua que será convertida en vapor pasa dentro de una red de tuberías que se encuentran expuestas a los gases de combustión que se emiten a muy altas temperaturas, evaporando el fluido contenido en su interior, o puede ser del tipo piro tubular, en donde el agua a ser transformada en vapor se encuentra dentro de un tanque que es atravesado por una serie de tuberías que transportan los gases de combustión, estos tubos se calientan al punto de evaporar el agua circundante.

Capítulo 3 Sistema de generación de vapor de Bridgestone de Costa Rica

La caldera de biomasa cuenta con ambos sistemas para la producción del vapor, estos se unen para aprovechar al máximo la capacidad del pellet como fuente de energía.

La parte acuo tubular de la caldera en donde se lleva a cabo el proceso de la combustión del pellet, llamada parte de radiación, se encuentra formada de tubos por los cuales circula el agua, por lo que las llamas están en contacto directo con las tuberías del liquido, elevando su temperatura hasta alcanzar casi el punto de evaporación.

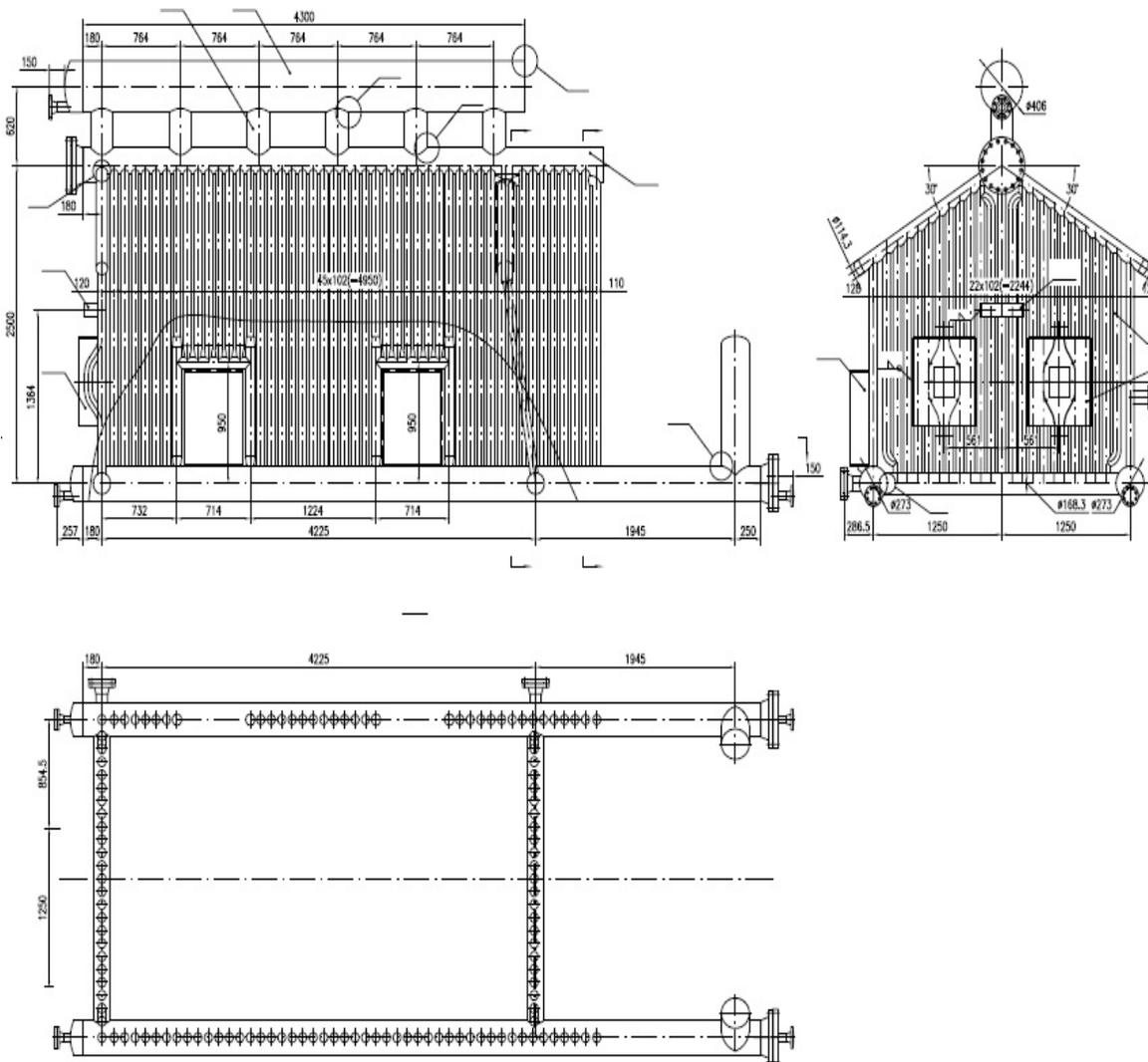


Figura 3.11. Parte de radiación, caldera biomásica, plano constructivo.²⁵



Figura 3.12. Parte frontal de la parte de radiación de la caldera.²⁶

Los puntos marcados en la imagen corresponden a la unión entre la parte de radiación y el tambor de vapor llamado parte de convección, este último es de tipo piro tubular con dos pasos, los gases de combustión abandonan la cámara y se introducen en los tubos de fuego del tanque para luego ser evacuados por la chimenea. En el tambor de vapor se da la generación del vapor que es entregado a la línea.

Se le llama parte de convección ya que en este punto el agua que se encuentra a una menor temperatura desciende al fondo del tanque hasta los puntos de unión marcados como 2 y 3, en este punto logra ingresar a la parte de radiación en donde nuevamente se eleva su temperatura, por este efecto se

²⁵ Tomado de documentación proporcionada por Eco Solutions

²⁶ Fotografía en el sitio de instalación

reduce la densidad del agua por lo que el líquido más caliente sube hasta el punto marcado como 1 para ingresar al tambor de vapor. Este diseño acuo - piro tubular de la caldera asegura la máxima eficacia para el aprovechamiento de la energía contenida en la biomasa.

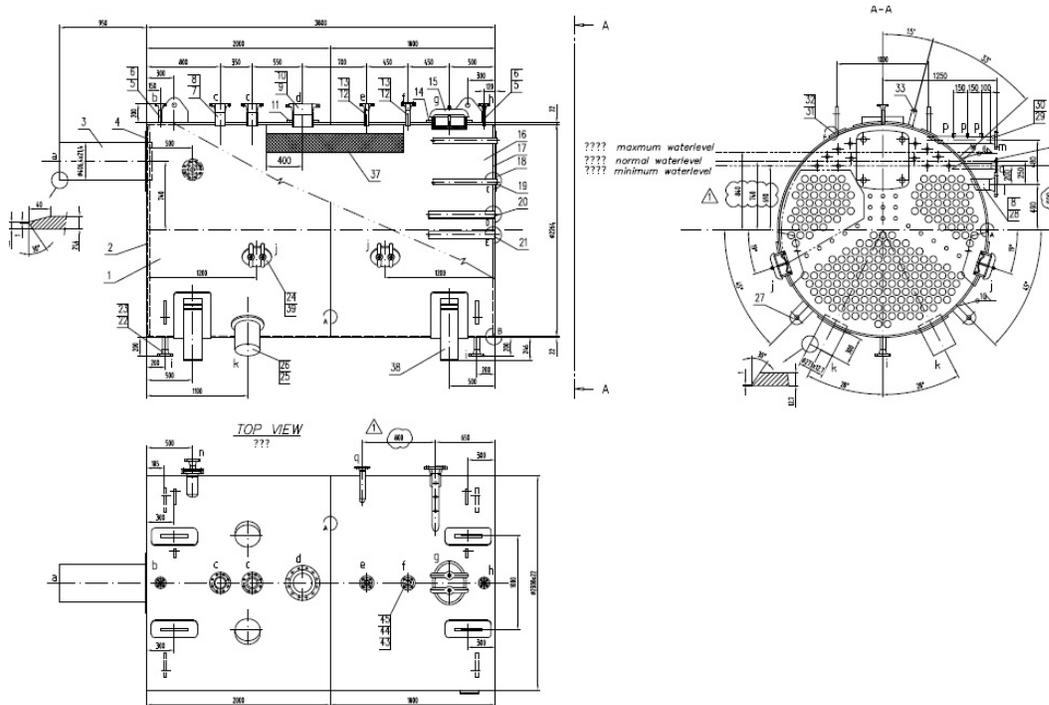


Figura 3.13. Parte de convección, caldera biomásica, planos constructivos.²⁷

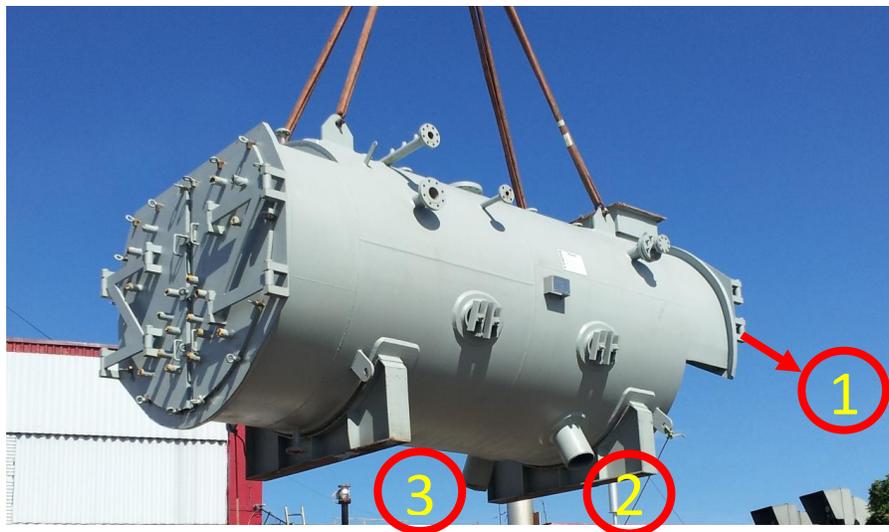


Figura 3.14. Tambor de vapor de la caldera, parte de convección.²⁸

²⁷ Tomado de documentación proporcionada por Eco Solutions

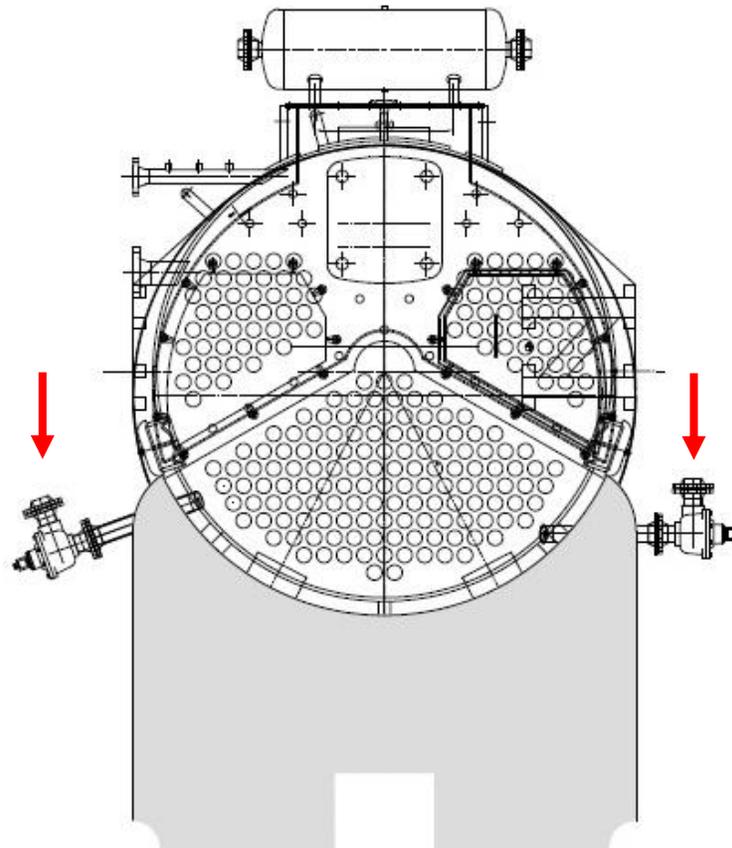


Figura 3.16. Shockblasters, parte de radiación, planos constructivos.³⁰

- *Economizador*

Una de las partes fundamentales para el funcionamiento de la caldera es el economizador el cual tiene como objetivo principal elevar la temperatura del agua de entrada proveniente del tanque desaerador, lo cual evita el gasto de combustible en incrementar la temperatura del agua de reposición de la caldera ya que al pasar por el economizador el liquido sale a casi 120 grados. El funcionamiento del economizador es el de un intercambiador de calor, el agua de la caldera pasa por un arreglo de tuberías que se encuentran en contacto, en su parte externa, con los gases de combustión que provienen de la caldera y se dirigen hacia el sistema de filtros y posteriormente la chimenea, estos gases

³⁰ Tomado de documentación proporcionada por Eco Solutions

conservan gran cantidad de su energía en forma de calor lo que permite elevar en casi 15°C la temperatura del agua, esto permite conservar el poder calorífico del pellet dedicado a la evaporación del líquido.

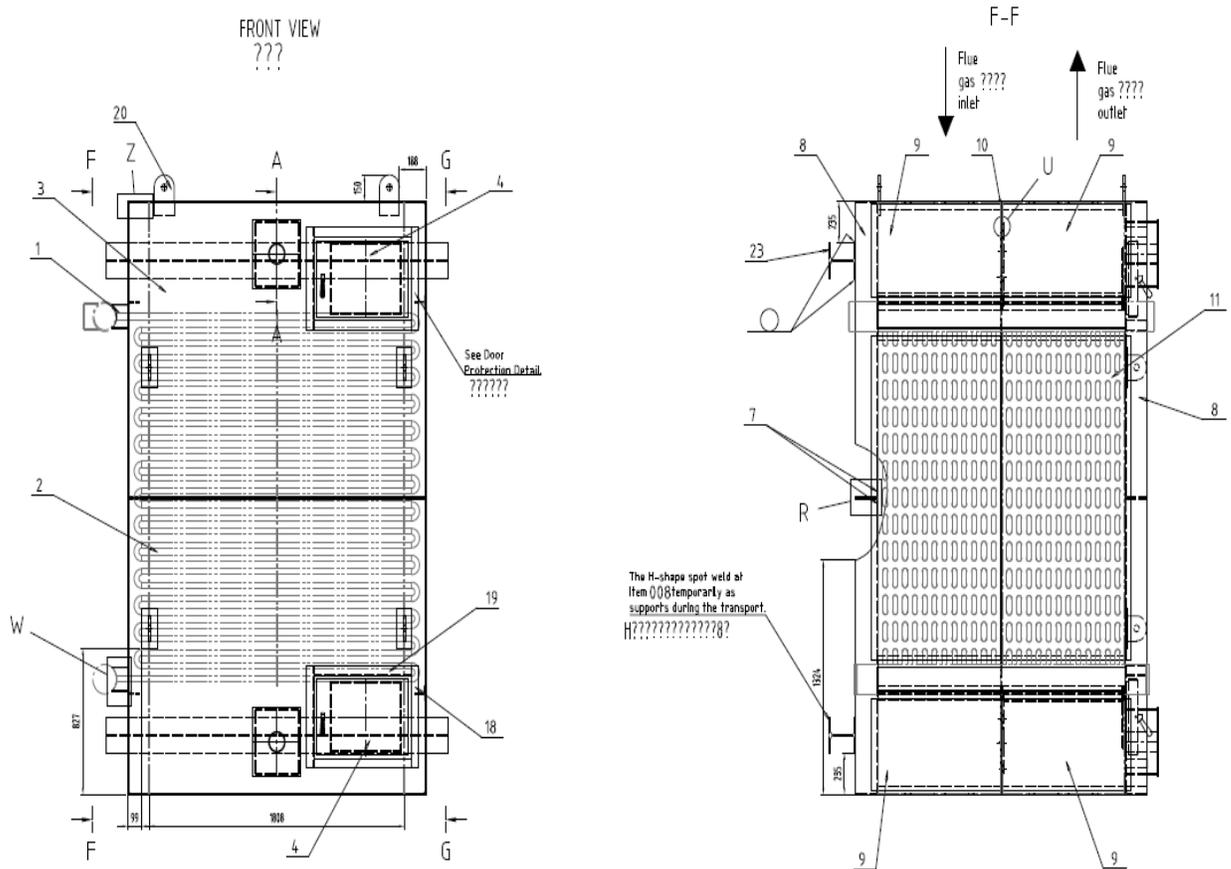


Figura 3.17. Economizador, planos constructivos.³¹

³¹ Tomado de documentación proporcionada por Eco Solutions

3.6.2.6 Cuarto de calderas y disposición general.

Para el caso especial de Bridgestone, este aspecto es de vital importancia a la hora de la planeación y estudio de la viabilidad del cambio de la caldera de bunker por la caldera de biomasa, esto debido a que al ser una sustitución se cuenta con un espacio reducido para realizar el montaje de la nueva estructura y equipos. En otros lugares generalmente se construye un pequeño edificio para albergar la caldera ya que se toman en cuenta las dimensiones de la misma para el diseño del lugar en el que se va a encontrar, pero cuando se pretende emplear un recinto que fue construido con otros fines, el uso correcto del espacio se vuelve fundamental.

En el caso de la sustitución que da motivo a este proyecto la disposición de la caldera y sus elementos en el espacio disponible es responsabilidad de la empresa fabricante VYNCKE, el diseño final se presenta en la siguiente figura.

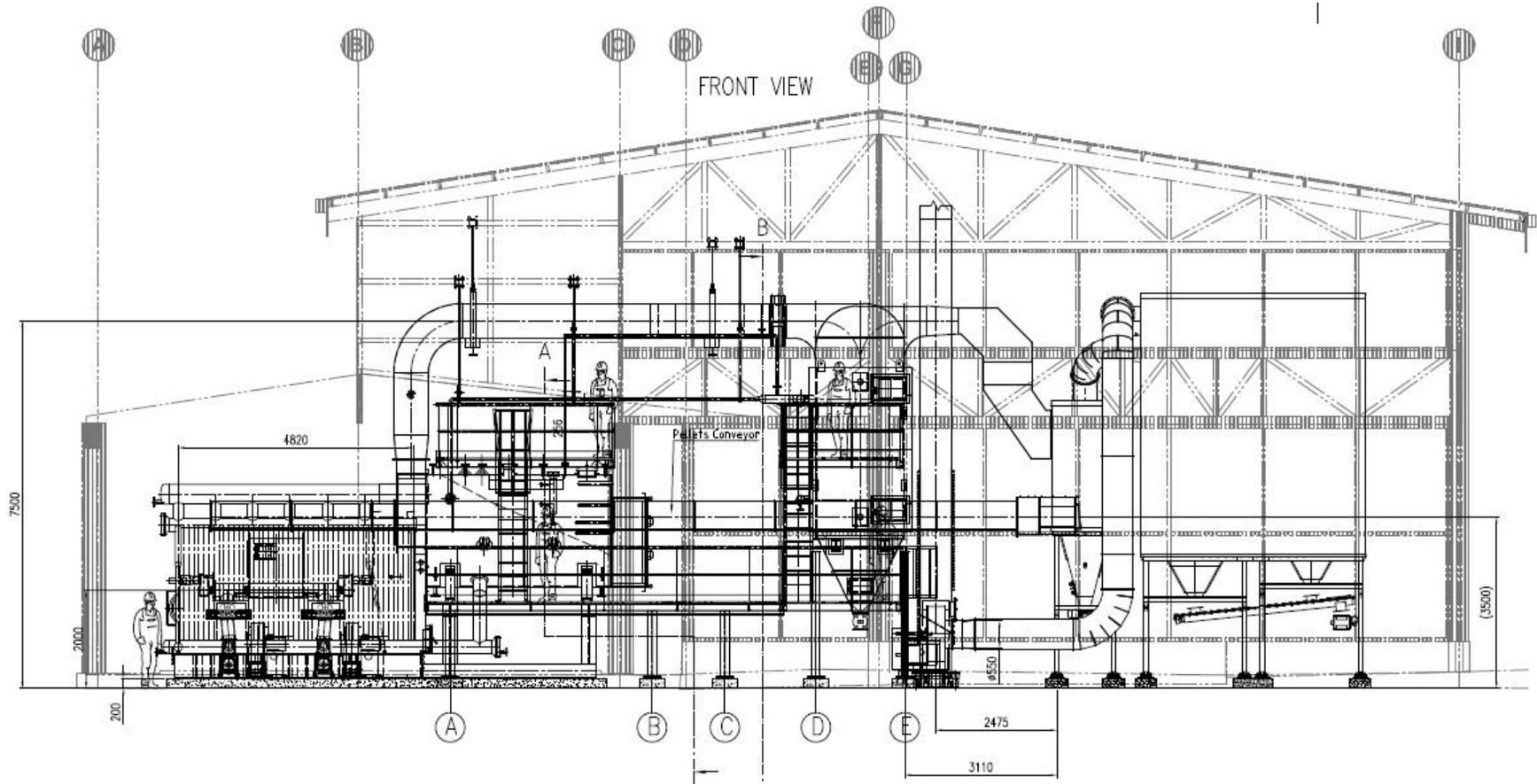


Figura 3.18. Disposición de la caldera y elementos auxiliares, vista frontal.³²

³² Tomado de documentación proporcionada por Eco Solutions

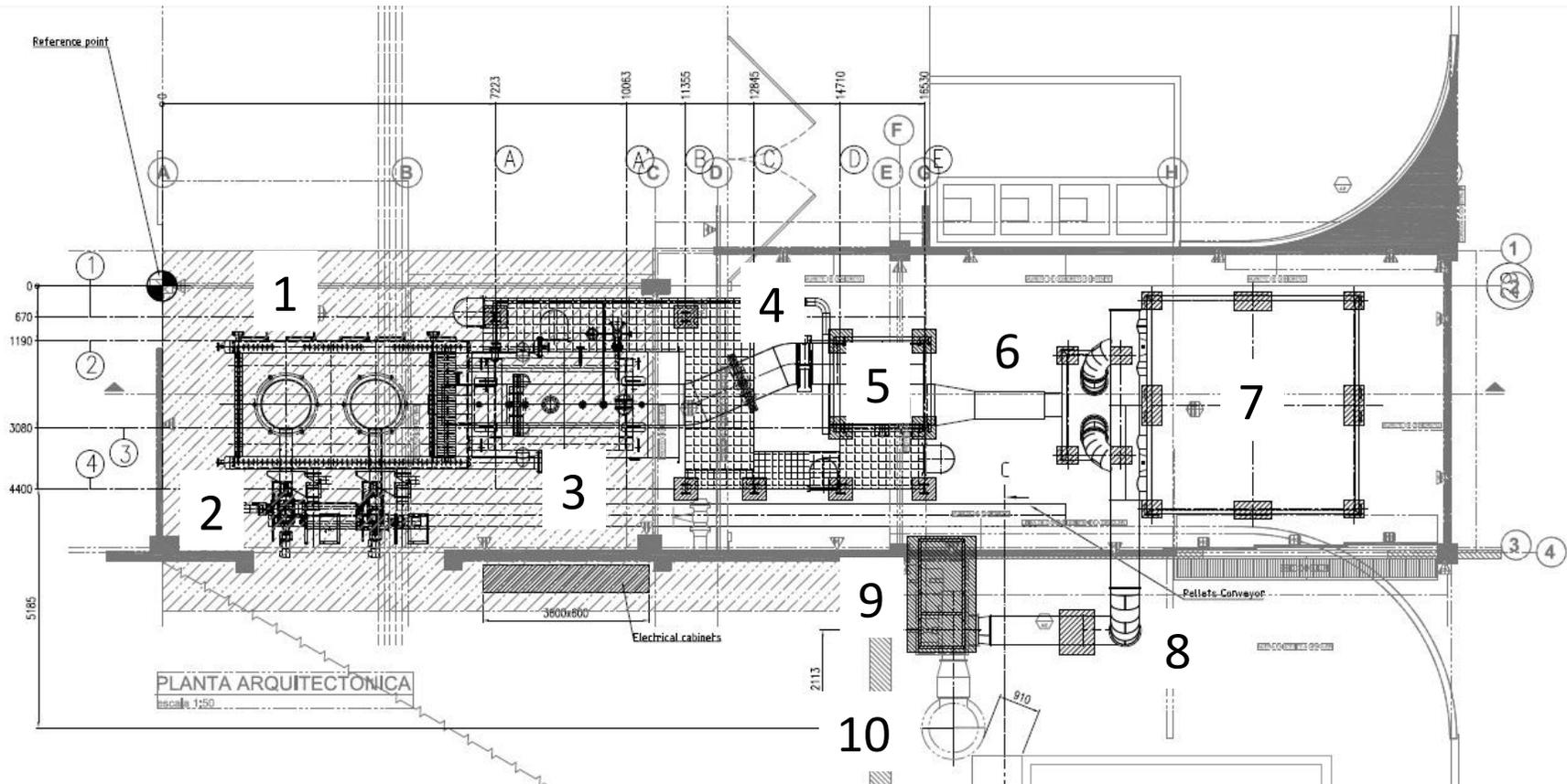


Figura 3.19. Disposición de la caldera y elementos auxiliares, vista superior.³³

³³ Tomado de documentación proporcionada por Eco Solutions

Según la numeración observada en la imagen anterior, se pueden distinguir los siguientes elementos:

1. Parte de radiación de la caldera / cámara de combustión.
2. Sistema de alimentación de pellet y aire primario.
3. Parte de convección de la caldera / tambor de vapor.
4. Ducto de gases de combustión, caldera – economizador.
5. Economizador.
6. Ducto de gases de combustión, economizador – batería de filtros.
7. Batería de filtros / ciclones ACS (Advanced Cyclone System).
8. Ducto de gases de combustión, batería – turbina.
9. Turbina de gases de combustión.
10. Chimenea.

Cabe destacar que el tamaño de la caldera fue también un punto a tomar en cuenta para su elección, una caldera con mayor capacidad no hubiera sido posible de instalar debido a la limitante de espacio.

Observando la disposición de la caldera y sus elementos en el cuarto de calderas se puede notar que la misma posee las dimensiones adecuadas para su instalación en el espacio disponible, siendo necesario únicamente la reubicación de cableado, tuberías de vapor y nitrógeno y tableros eléctricos.

3.6.2.7 Sistema de filtros, chimenea y turbina de gases de combustión.

El sistema de filtros ACS (Advanced Cyclone System), de la caldera se considera como una de las partes fundamentales de la instalación, esto debido a que se encargan de atrapar las partículas en suspensión en los gases de combustión. La biomasa se conforma en su mayoría por aserrín y astillas de madera que a la hora de ser quemadas libera pequeñas partículas de madera y ceniza que alcanza concentraciones de entre 200g/Nm^3 y 300g/Nm^3 .

Los sistemas de ciclones tradicionales capturan las partículas con un alto nivel de eficiencia pero por lo general presentan emisiones de 200 a 300 mg/Nm^3 ,

lo cual es muy alto para la reglamentación ambiental de la mayoría de los países por lo que deben adicionarse equipos secundarios para bajar las concentraciones a niveles aceptables. En el caso de la biomasa no puede usarse cualquier tipo de mecanismo de filtrado, los multiciclones tienen eficiencias de menos del 50% y los filtros de bolsas suelen tener problemas con partículas que se adhieren a las superficies colectoras.

Para la instalación de la caldera biomásica de Bridgestone se emplearan ciclones optimizados numéricamente que gracias a su diseño son capaces maximizar la recolección de polvos y finos de ceniza con caídas de presión del sistema aceptables. El sistema ACS garantiza emisiones de partículas en suspensión, óxidos de nitrógeno (NOx) y óxidos de azufre (SOx) en el siguiente orden de magnitud:

Tabla 3.19. Emisiones garantizadas del sistema ACS.

Agente contaminante	Miligramos por metro cubico (mg/m³)
Partículas en suspensión	≤ 109
Óxidos de nitrógeno (NOx)	≤ 590
Óxidos de azufre (SOx)	≤ 1363

Elaboración propia (Microsoft Word)

El funcionamiento del sistema de filtros se ejemplifica en las siguientes imágenes, el aire proveniente de la caldera ingresa en el ciclón que genera un remolino (huracán) en su interior, obligando a las partículas de ceniza a chocar con las paredes por la fuerza centrífuga provocada, estas partículas se precipitan hacia el fondo del filtro donde son recolectadas. La batería de ciclones con los que cuenta la caldera de biomasa se conforma de 16 estructuras como la mostrada en la imagen anterior, las cuales recolectan aproximadamente 1 m³ de ceniza por día.

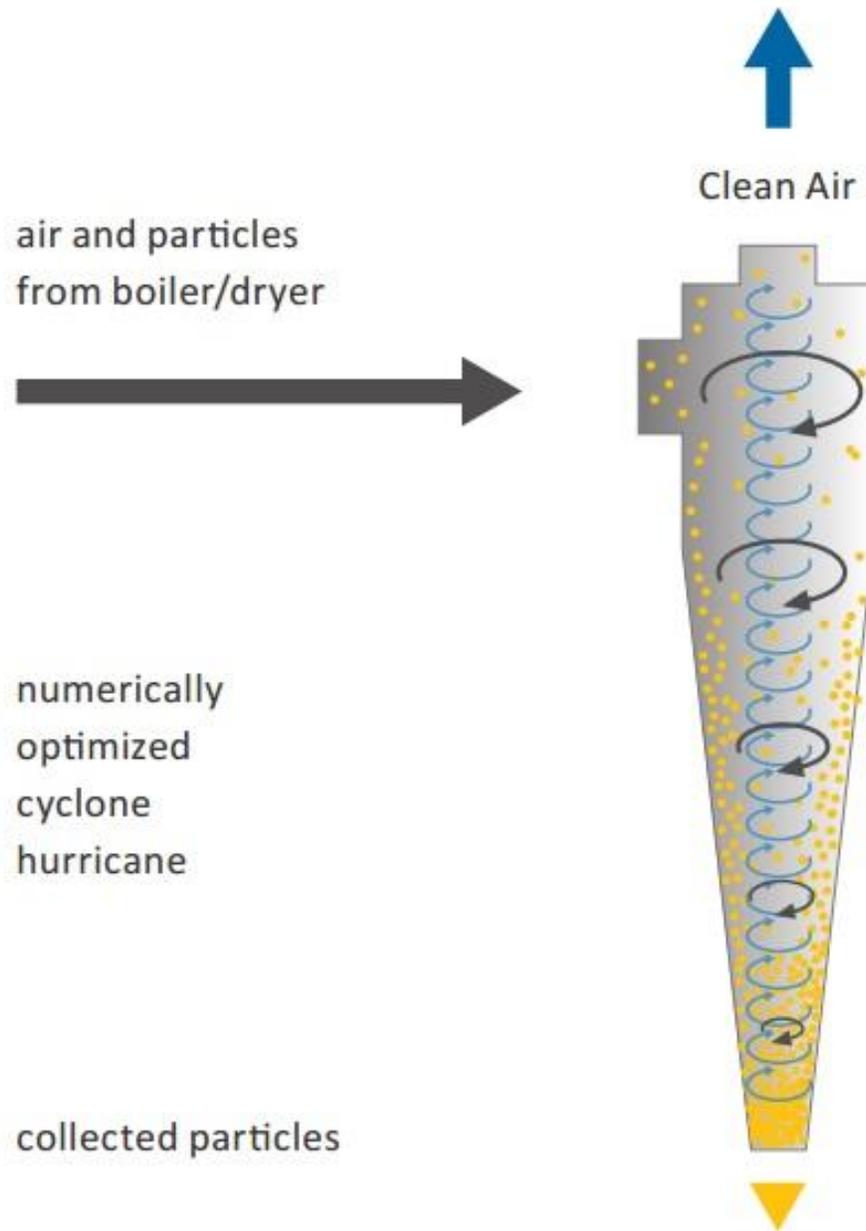


Figura 3.20. Funcionamiento de ciclones ACS.³⁴

³⁴ Tomado de (Advanced Cyclone Systems, 2014)

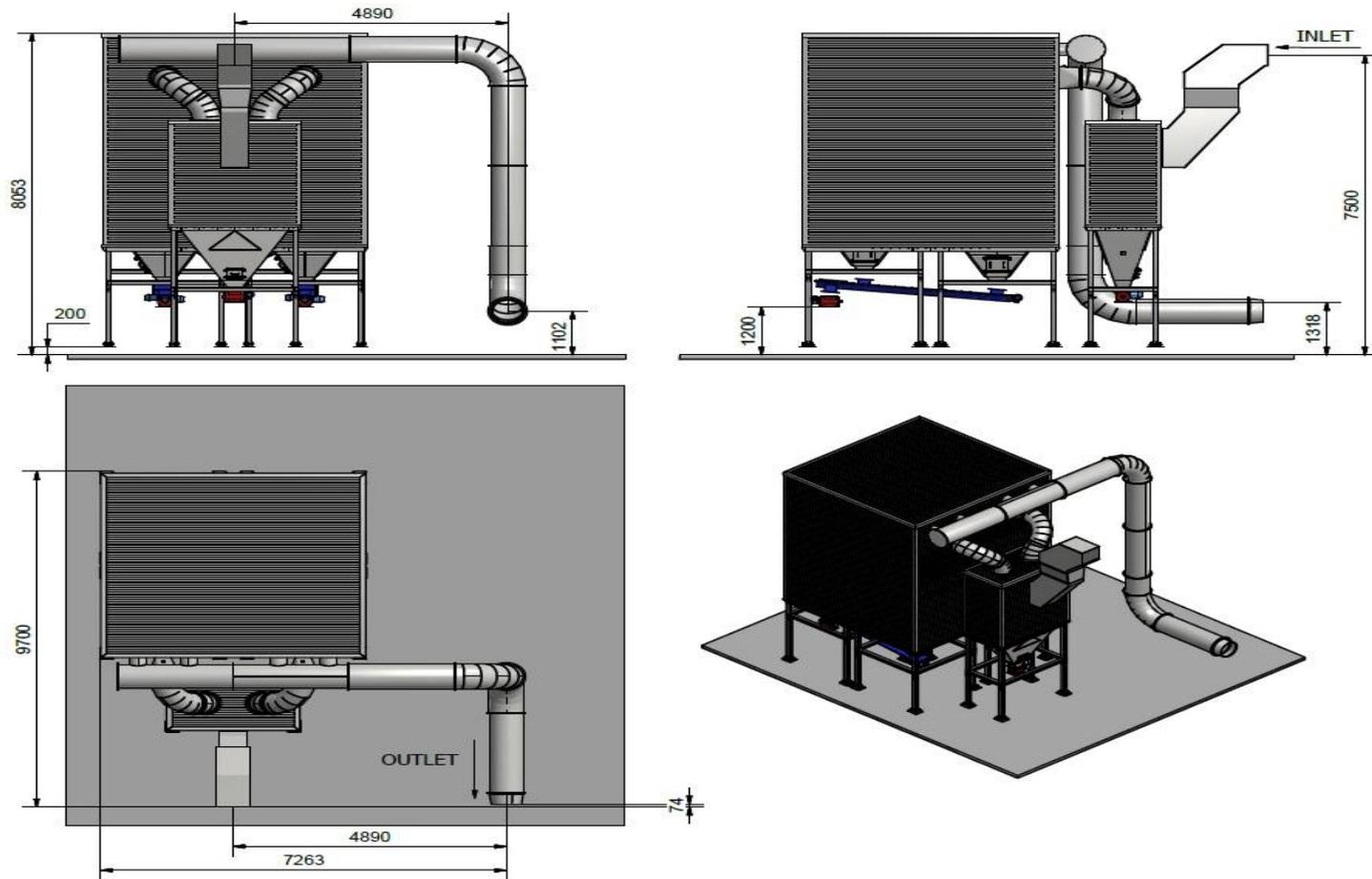


Figura 3.21. Batería de ciclones ACS, planos constructivos.³⁵

³⁵ Tomado de documentación proporcionada por Eco Solutions

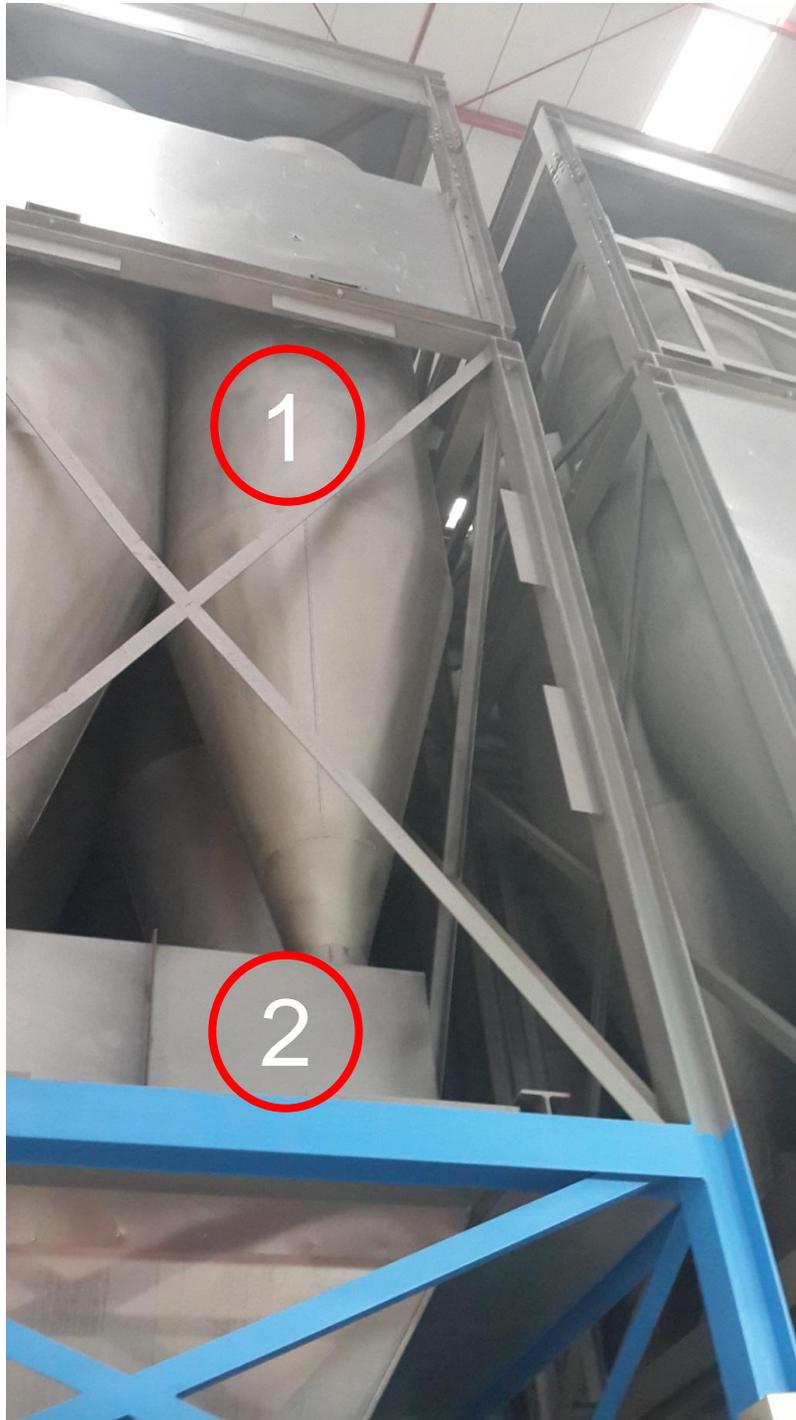


Figura 3.22. Batería de ciclones en sitio de instalación.³⁶

³⁶ Fotografía en el sitio de instalación

Según se observa en la Figura 3.22, cada batería de ciclones se compone de dos partes fundamentales, el numero 1 representa al filtro o ciclón, en donde se lleva a cabo la precipitación de la ceniza, la parte marcada como 2 se encarga de recolectar la ceniza de los 4 ciclones pertenecientes a cada batería hacia un solo punto de descarga. La configuración de ciclones y su funcionamiento provocan caídas de presión en el sistema, esto junto con la longitud de los ductos de escape de gases de combustión hacen necesario que esta disminución de presión sea compensado por un sistema de extracción de los gases por lo que la caldera emplea una turbina de arrastre conectada a un motor de 75 KW para provocar un tiro inducido que obligue a los humos de la caldera a circular por todo el sistema para finalmente salir por la chimenea. De no existir la turbina, la presión de salida de los gases de combustión sería insuficiente para ser evacuados de manera correcta ya que el tiro natural de la chimenea no podría compensar la caída de presión del sistema.

La chimenea consta de 18 metros de altura y un diámetro de 0,61m esto de acuerdo al reglamento de calderas que exige una altura mínima de 5 metros más que el edificio más cercano, y los estatutos de aviación civil, ya que por la cercanía de la planta con el aeropuerto la chimenea no puede tener más de 18 metros de altitud. El diámetro que se utilizó fue el recomendado por el fabricante de la caldera.

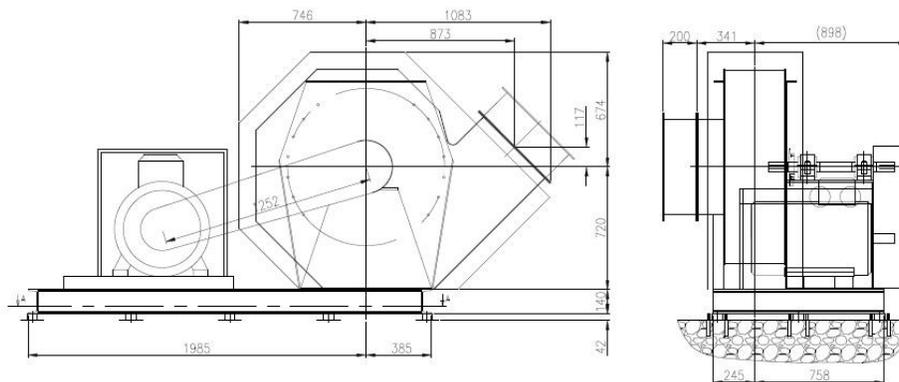


Figura 3.23. Turbina de tiro inducido.³⁷

³⁷ Tomado de documentación proporcionada por Eco Solutions

3.6.2.8 Elementos control Proporcional Integral Derivativo PID.

Un PID es un instrumento de control de procesos por retroalimentación utilizado a nivel industrial, el mismo corrige el error entre un valor medido y el valor que se desea alcanzar por medio de un cálculo que posteriormente detona una acción correctora que reajusta el proceso. El algoritmo de cálculo se compone de tres valores, el proporcional determina la reacción necesaria para corregir el error actual, el integral genera una corrección acorde a la integral del error, es decir determina la magnitud de la corrección y el derivativo da una razón del tiempo en el que el error se produce. La combinación de estas tres acciones es usada para ajustar un proceso mediante un elemento de control como por ejemplo la posición de los elementos de dirección del flujo del aire primario y secundario para la combustión del pellet.

En el caso de la caldera de biomasa se cuenta con control PID para los siguientes elementos:

- Capacidad del combustible.
- Capacidad de la cámara de combustión.
- Bombas de agua.
- Aire primario.
- Turbina de gases de combustión.
- Válvula para mantener presión.

El uso de este sistema garantiza la exactitud del proceso de la combustión del pellet, en el que la regulación de los factores involucrados juega un papel vital para el aprovechamiento de la totalidad del poder calórico que es capaz de aportar el combustible.

3.6.2.9 Válvula para mantener presión.

Este instrumento es de gran importancia para el funcionamiento de la caldera de biomasa debido a que como su nombre lo indica tiene como misión el mantener la presión estable dentro del tambor de vapor, es de accionamiento neumático y es controlada por PID desde la interfaz táctil del panel de control.

Su funcionamiento básico consiste mantener un valor de presión en un nivel establecido por el operador, cuando la caldera pierde presión la misma se cierra evitando la salida de vapor, otorgando tiempo a la caldera para recuperar presión dentro del tambor de vapor, estas caídas de presión se deben a picos de producción en el que muchos usuarios entran en funcionamiento de manera simultánea, aumentando la demanda en la línea.

En el momento que el valor de presión se ubica por encima del valor establecido, se abre para evitar una sobrepresión del sistema de generación.

Esta válvula se ubica justamente después de la válvula principal de vapor por lo que realiza una regulación de la presión y por consiguiente del flujo de vapor que sale de la caldera. Mediante este instrumento se cumple una doble función, tanto de funcionamiento como de seguridad, la caldera de biomasa se encuentra en paralelo al cabezal de vapor junto con dos calderas de bunker, esta válvula previene también que ingrese el vapor proveniente de las demás calderas además de que mantiene constante el nivel de agua dentro del tambor.

3.6.3 Justificación ambiental.

El uso de biomasa como fuente de energía trae consigo una serie de beneficios que inciden directamente sobre el medio ambiente, contribuye a la disminución del cambio climático por causa del efecto invernadero, reduce la lluvia ácida, ayuda a evitar la erosión de los suelos y contaminación de fuentes de agua, previene las emanaciones de metano provenientes de los desechos urbanos y materia orgánica en descomposición, mantiene la estabilidad de los ecosistemas y mejorar la vida silvestre.

- **Efecto invernadero y cambio climático:** Desde los años de 1950 con el desarrollo industrial en su máximo apogeo se comenzó a crear una dependencia hacia los combustibles fósiles como fuente de energía, la invención del motor de combustión interna y los procesos de producción en masa, intensificaron las emanaciones de los conocidos “gases de efecto invernadero” como el dióxido de carbono y el metano, los cuales contribuyen en gran medida al cambio climático y calentamiento global.

Las emisiones de metano a la atmósfera aportan gran parte de la contaminación que provoca el cambio de la temperatura del planeta, estas emisiones podrían ser atenuadas si son transformadas en energía térmica, eléctrica o mecánica.

Todas las plantaciones capturan carbono en su proceso de fotosíntesis para posteriormente liberar oxígeno a la atmósfera y balancear el carbono en los suelos. Mediante la combustión de la biomasa se libera dióxido de carbono que fue absorbido durante el crecimiento de las plantas que la conforman, por lo cual se considera como carbono neutro a las emisiones provenientes de esta combustión, de hecho el carbono capturado durante la vida de la planta puede ser mayor que el liberado.

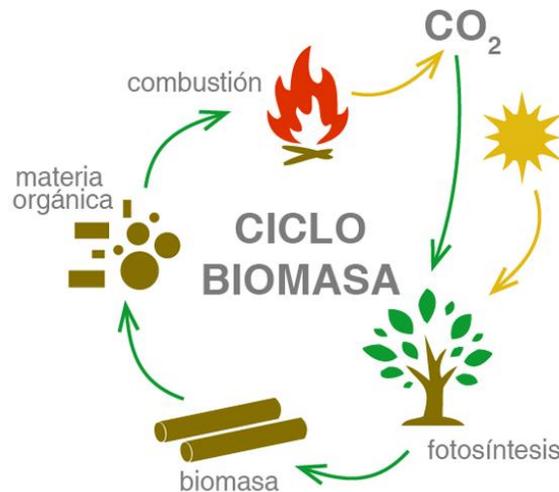


Figura 3.24. Ciclo cerrado del carbono.³⁸

- **Lluvia ácida:** La presencia de lluvia ácida es causada por las emisiones a la atmosfera de elementos como el sulfuro y el oxido de nitrógeno procedentes de la quema de combustibles fósiles, la misma provoca daños en cultivos y plantaciones además de afectar la salud humana. La biomasa al no poseer contenido de azufre no produce lluvia acida durante su transformación en energía.
- **Contaminación del agua y erosión de suelos:** En algunos países se realizan cultivos y plantaciones energéticas destinadas a su uso exclusivo como biomasa, dichas plantaciones contribuyen a estabilizar los suelos además de reducir el proceso de erosión.
La combustión de la biomasa, específicamente de los pellets al ser fabricados con desechos de aserraderos, disminuyen las emanaciones de metano de la madera en descomposición además de evitar que el aserrín contamine ríos y fuentes de agua.
- **Vida silvestre:** La implantación de cultivos energéticos ayuda en gran medida a la preservación de hábitats con todo tipo de flora y fauna en ellos, los arboles son capaces de estabilizar los lagos así como los causes de los ríos, ofrecen refugio para gran cantidad de animales.

³⁸ Tomado de (Probio, 2013)

En la actualidad muchas empresas nacionales buscan reducir sus emisiones de dióxido de carbono a la atmosfera mediante el uso de alternativas energéticas amigables con el medio ambiente, reducir la huella de carbono y alcanzar el estatus de carbono neutral se convierte en una meta que cada vez mas empresas desean obtener.

La meta de la carbono neutralidad viene desde el año 2009 en el que Costa Rica adquirió el compromiso durante la Cumbre de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático de reducir sus emisiones para el año 2021. Empresas como Bridgestone gracias a su compromiso social, ambiental y de calidad desde el 18 de Noviembre del 2008 firma ante el Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones (MINAET), su compromiso para obtener la marca C-Neutral mediante el desarrollo de proyectos de eficiencia energética que poco a poco disminuyan la dependencia de los combustibles fósiles en el proceso de producción de llantas.

Una de las primeras medidas tomadas fue el uso de gas Nitrógeno para sustituir la necesidad de vapor en el proceso de vulcanización de neumáticos, reduciendo de manera indirecta el consumo de bunker de la planta, la meta se propone en expandir el uso del nitrógeno para reducir el uso de vapor al punto de que este sea generado únicamente con biomasa.

En tanto este punto en la producción de neumáticos es alcanzado, se da la cogeneración de vapor por medio de bunker y biomasa, como se explicó en la justificación técnica, la instalación de la caldera de biomasa se encuentra sujeta a la remoción de una de las 3 calderas de bunker de Bridgestone, por lo que inicialmente se dejan de percibir las emisiones de carbono provenientes de esta caldera. Durante el desarrollo de la justificación energética se realizo un análisis del porcentaje de sustitución de vapor que efectúa la caldera de biomasa sobre la demanda total de la planta en comparación con ambas calderas de bunker.

Esta sustitución de vapor trae consigo un volumen muy alto de galones de bunker que se dejan de consumir y por ende, se evitan las emisiones de dióxido de carbono y sulfuro asociadas a la combustión de hidrocarburos.

Se muestra el análisis de los litros de bunker consumidos para la generación de vapor con y sin la sustitución de vapor aportado por la caldera de biomasa, las toneladas de CO₂ equivalentes y la cantidad de arboles necesarios para la purificación de dichas emisiones.

Según la Tabla 3.13. Consumo de bunker evitado por sustitución de vapor., es posible determinar la cantidad de litros de bunker que se pueden ahorrar por la sustitución de vapor que efectúa la caldera de biomasa, dicha sustitución se ubica entre el 40 y 50%, por lo tanto si se toma el dato más conservador de 40%, el restante 60% corresponde al vapor generado mediante el uso de bunker.

Aplicando el mismo análisis de la Tabla 3.13, se obtienen los litros de bunker asociados al 60% del consumo así como los litros de bunker que se hubieran quemado de no estar presente el aporte de la caldera de biomasa.

Tabla 3.20. Litros de bunker consumidos por generación del 100% de vapor para un periodo de 13 días.

Fecha	Generación Total de Vapor (Kg/día)	Consumo de Bunker (litros)
14/07/2014	160923,00	11073,14
15/07/2014	283889,00	19534,45
16/07/2014	271428,00	18677,01
17/07/2014	277988,00	19128,40
18/07/2014	266523,00	18339,49
19/07/2014	257401,00	17711,81
20/07/2014	270438,00	18608,89
21/07/2014	277939,00	19125,03
22/07/2014	214865,00	14784,90
23/07/2014	278037,00	19131,77
24/07/2014	266148,00	18313,69
25/07/2014	267206,00	18386,49
26/07/2014	281887,00	19396,69

Elaboración propia (Microsoft Excel)

Tabla 3.21. Litros de bunker consumidos por generación del 60% de vapor para un periodo de 13 días.

Fecha	Consumo de vapor 60% bunker (Kg/h)	Consumo de Bunker (litros)
14/07/2014	96553,80	6643,88
15/07/2014	170333,40	11720,67
16/07/2014	162856,80	11206,20
17/07/2014	166792,80	11477,04
18/07/2014	159913,80	11003,70
19/07/2014	154440,60	10627,08
20/07/2014	162262,80	11165,33
21/07/2014	166763,40	11475,02
22/07/2014	128919,00	8870,94
23/07/2014	166822,20	11479,06
24/07/2014	159688,80	10988,21
25/07/2014	160323,60	11031,89
26/07/2014	169132,20	11638,02

Elaboración propia (Microsoft Excel)

La fórmula de cálculo aplicada para la determinación de las toneladas de CO₂ equivalentes se da por

$$Emisión = \sum (Combustible \times EF)$$

Ecuación 3.12 Emisión de toneladas de CO₂ equivalentes³⁹

Donde:

Emisión = Emisión de CO₂ (Toneladas)

Combustible = Tipo de combustible (Litros)

EF = Factor de emisión (Toneladas/Litro), 0,003 para el bunker.

³⁹ Tomado de (Hernández)

Tabla 3.22. Toneladas de CO₂ emitidas por generación del 100% de vapor para un periodo de 13 días.

Fecha	Consumo de Bunker (litros)	Ton CO₂
14/07/2014	11073,14	33,22
15/07/2014	19534,45	58,60
16/07/2014	18677,01	56,03
17/07/2014	19128,40	57,39
18/07/2014	18339,49	55,02
19/07/2014	17711,81	53,14
20/07/2014	18608,89	55,83
21/07/2014	19125,03	57,38
22/07/2014	14784,90	44,35
23/07/2014	19131,77	57,40
24/07/2014	18313,69	54,94
25/07/2014	18386,49	55,16
26/07/2014	19396,69	58,19
Promedio	17862,44	53,59

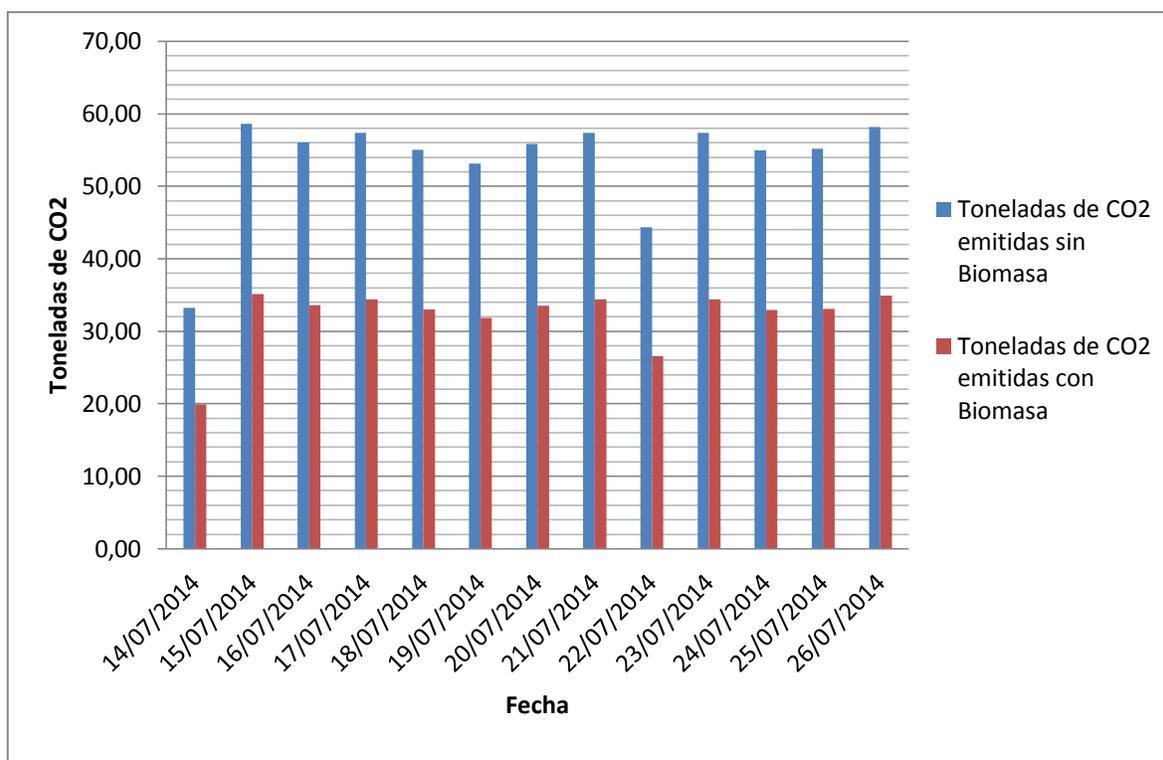
Elaboración propia (Microsoft Excel)

Tabla 3.23. Toneladas de CO2 emitidas por generación del 60% de vapor para un periodo de 13 días.

Fecha	Consumo de Bunker (litros)	Ton CO₂
14/07/2014	6643,88	19,93
15/07/2014	11720,67	35,16
16/07/2014	11206,20	33,62
17/07/2014	11477,04	34,43
18/07/2014	11003,70	33,01
19/07/2014	10627,08	31,88
20/07/2014	11165,33	33,50
21/07/2014	11475,02	34,43
22/07/2014	8870,94	26,61
23/07/2014	11479,06	34,44
24/07/2014	10988,21	32,96
25/07/2014	11031,89	33,10
26/07/2014	11638,02	34,91
Promedio	10717,47	32,15

Elaboración propia (Microsoft Excel)

Gráfico 3.1. Comparación de emisiones de toneladas de CO2.



Elaboración propia (Microsoft Excel)

De acuerdo a los datos anteriormente mostrados el aporte de la caldera de biomasa en la generación de vapor afecta directamente la cantidad de toneladas de dióxido de carbono emitidas a la atmosfera reduciéndolas, cuanto mayor sea la sustitución de vapor respecto de la demanda total, menores serán las emisiones.

Los arboles, plantas y vegetación en general tienen un papel de suma importancia en la absorción del dióxido de carbono, al ser este uno de los principales gases de efecto invernadero, es fundamental su presencia y abundancia para combatir el cambio climático.

Cada árbol posee una capacidad distinta para fijar dióxido de carbono de la atmosfera, esta depende de su composición química, tamaño, localización y demás factores a tener en consideración para determinar la cantidad de CO₂ que puede capturar. El cálculo de la equivalencia de arboles necesarios para la fijación de una cantidad específica de dióxido de carbono es muy variable por lo que se

toma como base la siguiente información proveniente de un estudio realizado en Chile sobre los árboles que más CO₂ pueden capturar.

Según estándares del Panel Intergubernamental de Expertos en Cambio Climático (IPCC) sobre la cantidad de CO₂ que una especie de árbol es capaz de absorber, la Corporación Nacional Forestal (Conaf) hizo un estudio a las especies chilenas y estableció que quien tiene el mejor rendimiento es el eucalipto, que captura 29,9 toneladas de CO₂ por hectárea al año (tCO₂/ha/año), seguido por el siempreverde con 17,10 tCO₂/ha/año y el pino radiata. (Torres, 2012).

En base a esta información se aplica la siguiente fórmula para determinar la cantidad de hectáreas necesarias para desplazar dióxido de carbono emitido por las calderas de bunker, se toma el dato de generación en un 100% bunker con el fin de evaluar el caso más crítico.

$$\text{Hectareas sembradas} = \frac{\sum \text{Ton CO}_2 \times \text{año}}{29,9 (\text{Ton CO}_2 \times \text{año/ha})}$$

Ecuación 3.13 Hectáreas sembradas para capturar CO₂⁴⁰

Para el periodo de 13 días evaluado en la Tabla 3.22 y el total de emisiones de dióxido de carbono se obtiene

$$\text{Hectareas sembradas} = \frac{696,64 \text{ Ton CO}_2 \times \text{año}}{29,9 (\text{Ton CO}_2 \times \text{año/ha})} = 23,3 \text{ ha}$$

Este resultado indica que es necesario sembrar aproximadamente 23 hectáreas de eucalipto que tarda 1 año en fijar el dióxido de carbono producido en un lapso de 13 días de funcionamiento de las calderas de bunker, este valor es reflejo de la importancia que cobra el tomar acciones para revertir el efecto invernadero y el cambio climático, el proceso para emitir gases de efecto invernadero es muchas veces más rápido que el necesario para fijar estos gases.

En términos prácticos se necesita de 23 hectáreas de árboles plantados y un año de tiempo para capturar las emisiones generadas en 13 días.

⁴⁰ Tomado de (Torres, El Eucalipto es el árbol que más CO₂ captura en Chile, 2012)



Figura 3.25. **Árbol de Eucalipto.**⁴¹

Uno de los factores más relevantes a considerar al momento de operar la caldera de biomasa radica en una de sus características principales la cual es la generación de ceniza producto de la combustión del pellet. Según los datos técnicos y especificaciones del combustible de la Figura 3.2, el contenido de ceniza se ubica por debajo del 5% de la composición total del pellet, mientras que la caldera de biomasa emite un 2% de ceniza posterior al proceso de combustión.

El consumo de combustible de la caldera se calculó en la justificación técnica y el mismo se estableció en $32\,727,36 \frac{Kg}{día}$ por lo que el contenido de ceniza correspondiente a un 2% es de $654,55 \frac{Kg}{día}$.

En la empresa Bridgestone el compromiso con el medio ambiente es uno de sus ejes transversales por lo que el adecuado manejo de los desechos de producción es fundamental, para la ceniza producida por la caldera se dispondrá de contenedores metálicos acondicionados para su manejo y transporte, será utilizada como insumo para la fabricación de concreto gracias a su contenido de dióxido de silicio y oxido de calcio que reduce la cantidad de cemento necesario. Otro posible uso se da como abono para plantas en mezclas de **compost**.

⁴¹ Tomado de (Torres, El Eucalipto es el árbol que más CO2 captura en Chile, 2012)

3.6.3.1 Reglamento sobre emisión de contaminantes atmosféricos provenientes de calderas.

Según el decreto N° 36551 emitido en la gaceta N° 140 del 20 de julio del 2011, se establecen los valores máximos de emisión para calderas y hornos de tipo indirecto según su capacidad de producción. En el caso de una caldera se presenta la siguiente clasificación de acuerdo al Decreto Ejecutivo N° 26789 – MTSS: Reglamento de Calderas, La Gaceta N°65 del 2 de abril de 1998.

Tabla 3.24. Clasificación de calderas.

Categoría	A	B	C	D
Capacidad de producción de vapor (Kg/h)	Más de 7500	De 2000 a 7500 inclusive	Más de 700 a 2000 inclusive	Menor o igual a 70
Área (m ²) de superficie de calefacción	Más de 200	De 60 a 200 inclusive	Más de 2 a 60	Menor o igual a 2

Elaboración propia (Microsoft Word)

La caldera de Biomasa de Bridgestone se ubica en la clasificación A al proporcionar una producción de vapor de 9200 Kg/h.

A continuación se definen los valores máximos de emisión correspondientes a la categorización de la caldera de biomasa en cuanto a partículas totales en suspensión, contenido de dióxido de azufre (SOx) y óxidos de nitrógeno (NOx).

Tabla 3.25. Emisiones máximas para calderas de biomasa en mg/m³.

Categoría	A (Grandes)	B (Medianas)	C,D (Pequeñas)
Partículas totales en suspensión	120	150	175
Dióxido de azufre (SO _x), Contenido de hasta 3% en masa.	2500	2500	2500
Óxidos de N. (NO _x)	650	650	650

Elaboración propia (Microsoft Word)

De acuerdo a las emisiones garantizadas del sistema de captura de partículas ACS (Advanced Cyclone System) de la Tabla 3.19, los filtros son capaces de reducir las emisiones de contaminantes atmosféricos a valores inferiores a los máximos estipulados por ley por lo que la caldera es eficiente tanto energética como ambientalmente.

3.6.3.2 Bonos verdes

El gobierno costarricense implementó desde el año 2013 la creación de un mercado local de Carbono, el cual mediante la Junta de Carbono se suman a las estrategias de carbono neutralidad que se están utilizando para alcanzar una economía baja en emisiones para el año 2021.

Este mercado pondrá a disposición de las empresas del sector industrial costarricense bonos verdes o unidades de compensación costarricenses (UCC) por un precio de \$3, la idea es que aquellas empresas que deseen alcanzar el título de carbono neutral, compren estos bonos para financiar proyectos de reforestación que ayuden a incrementar las toneladas de dióxido de carbono emitidas a la atmosfera, cada bono equivale a una tonelada de CO₂ por lo que de esta manera son capaces de compensar las emisiones que no pueden reducir de su proceso de producción.

A continuación se detalla un fragmento de la noticia publicada el 11 de setiembre del 2013 “Costa Rica crea mercado local de carbono”

“A partir de ahora, las empresas y las personas podrán compensar sus emisiones de carbono, al adquirir bonos que financiarán proyectos forestales, gracias a la oficialización del nuevo Mercado Doméstico de Carbono...”

... Para ese año, y según proyecciones del Ministerio de Ambiente (Minae), Costa Rica emitirá 19 millones toneladas de carbono. El 75% de estas serán absorbidas por el sector forestal y agroforestal.

... ¿Cómo se pueden adquirir UCC? Bajo la Norma Nacional de Carbono Neutralidad (INTE -12-01-06-2011), la empresa mide su huella de carbono para cuantificarla y define acciones para reducirla al máximo.

... Aquellas emisiones que la empresa no puede reducir porque afectaría su operación y productividad, se podrán compensar al comprar UCC. Cada UCC tiene un costo de \$3 y equivale a una tonelada de dióxido de carbono...”

La Nación, Economía 11 de septiembre del 2013, Artículo de Michelle Soto M

Es entonces de esta manera que Bridgestone desea alcanzar el título de empresa C-Neutral, mediante la adquisición de estos bonos que le permitan compensar su huella de carbono por todas aquellas emisiones que no puede evitar o reducir.

3.6.4 Justificación Económica

Como es propio de todo proyecto de inversión, es necesario un análisis económico de su rentabilidad analizando factores como periodo de recuperación (PR), tasa interna de retorno (TIR), valor actual neto (VAN) y demás indicadores financieros que demuestren si el proyecto es factible desde el punto de vista económico, si puede generar ganancias o su implementación por el contrario provocara pérdidas para el inversionista.

Uno de los primeros aspectos a considerar para realizar este análisis contraste de precio entre los combustibles bunker y pellet, ya que en esta diferencia en comparación con su capacidad de aporte energético se basa el ahorro económico proyectado. Haciendo uso de la

Tabla 3.4. Calculo de energía aportada por bunker., y la Tabla 3.9. Consumo equivalente de pellets., es que podemos obtener los valores necesarios para determinar el porcentaje de ahorro.

Conociendo que el precio del bunker es de ₡390 por litro y que además el precio por tonelada de pellet es de ₡151 117,35 (\$277), al tipo de cambio actual, ambos considerando los gastos por transporte por lo que se presenta como el precio final para el cliente.

Al hacer una combinación de esta información con los datos de las tablas se obtienen los siguientes resultados.

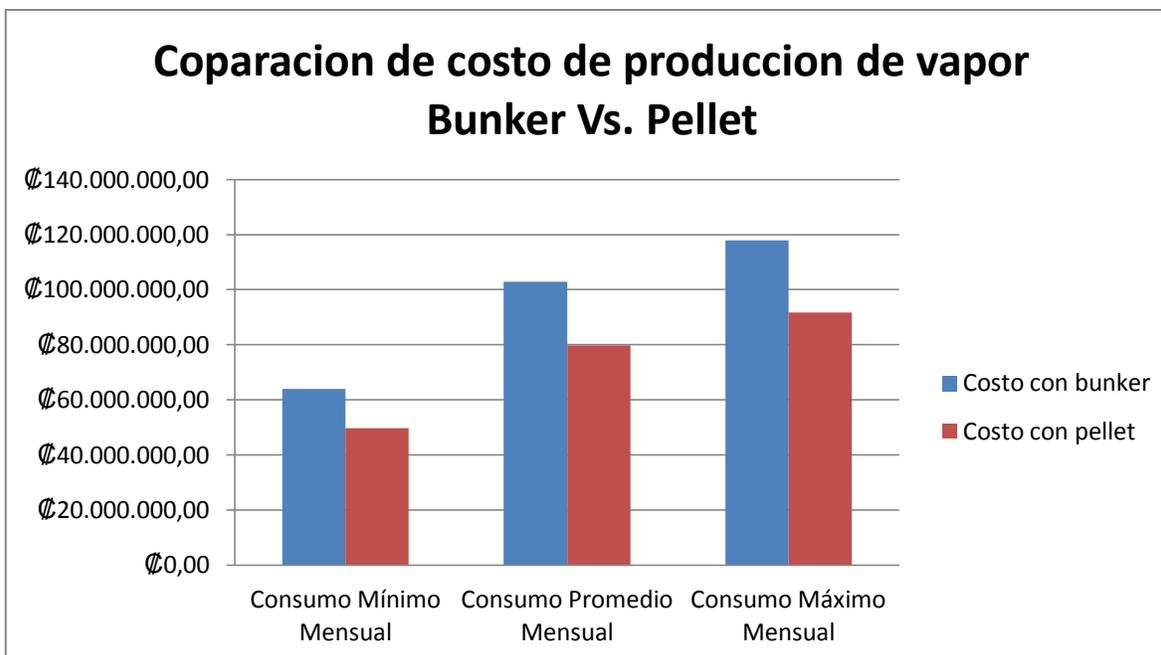
Se muestra el costo equivalente en dólares según el tipo de cambio vigente de ₡544,71/\$.

Tabla 3.26. Comparación de costo de producción de vapor, bunker vs pellet.

Combustible	Bunker C (Litros)	Costo Dólares	Costo Colones
Consumo Mínimo Mensual	164.181,24	\$117.550,04	₡64.030.683,60
Consumo Promedio Mensual	263.594,87	\$188.727,94	₡102.801.999,30
Consumo Máximo Mensual	302.549,86	\$216.618,83	₡117.994.445,40
Combustible	Pellet (Ton)	Costo Dólares	Costo Colones
Consumo Mínimo Mensual	329,44	\$91.395,60	₡49.784.099,78
Consumo Promedio Mensual	528,91	\$146.595,29	₡79.851.918,91
Consumo Máximo Mensual	607,08	\$168.420,68	₡91.740.320,84

Elaboración propia (Microsoft Excel)

Gráfico 3.2. Comparación de costo de producción de vapor, bunker vs pellet.



Elaboración propia (Microsoft Excel)

Tabla 3.27. Porcentaje de ahorro por uso de pellet para producción de vapor.

Ahorro Mínimo Mensual	\$26.144,54	₡14.246.583,82	22%
Ahorro Promedio Mensual	\$42.132,66	₡22.950.080,39	22%
Ahorro Máximo Mensual	\$48.198,35	₡26.254.124,56	22%

Elaboración propia (Microsoft Excel)

El porcentaje de ahorro obtenido está sujeto a diversos factores, el tipo de cambio del dólar, variaciones en el poder calorífico del combustible, cambios en las eficiencias de las calderas, diferencias de consumo de combustible, entre otros por lo que se tomara un valor conservador de 20% de ahorro de dinero al utilizar pellet en lugar de bunker.

La propuesta de la instalación de la caldera de biomasa de Eco Solutions se basa en el ahorro compartido, es decir del dinero que se obtenga proveniente del ahorro por concepto de la sustitución del combustible a utilizar, un porcentaje se

destina a Eco Solutions y otro porcentaje se entrega a Bridgestone por un periodo de diez años durante los cuales la caldera pertenece a Eco Solutions.

Cabe destacar que la inversión de la compra de la caldera, instalación, materiales, mano de obra y demás gastos en los que se incurra, corre por cuenta de Eco Solutions que mediante un préstamo bancario hace frente a la alta demanda de capital para la implementación del proyecto.

Bridgestone por su parte debe aportar las facilidades que necesita la caldera para su operación como lo son electricidad, agua tratada químicamente, aire comprimido, acondicionamiento del espacio donde se instale la caldera y demás gastos como el levantamiento de una edificación en donde se localizará el sistema de filtros ciclónicos.

Por lo tanto se plantean dos situaciones de análisis financiero, una para el cliente y otra para el inversionista. Como parte de todo proyecto de inversión, debe existir una manera de saber y demostrar si el dinero que se va a invertir va a generar ganancias o si por el contrario puede ocasionar pérdidas.

La evaluación de un proyecto se realiza en términos simples con una de dos intenciones:

- Determinar la aceptación o rechazo del proyecto.
- Ordenar una serie de posibles proyectos de acuerdo a su rentabilidad.

Para esto existen herramientas de análisis financiero que permiten determinar la factibilidad de la implementación de un proyecto, entre estas tenemos las más usadas y representativas que son:

1. Criterio del Valor Actual Neto: El VAN expresa la diferencia entre todos los ingresos y egresos del proyecto a través del tiempo, expresado en moneda actual, el mismo toma en consideración una rentabilidad mínima aceptable establecida por el inversionista, la cual de no ser alcanzada implicaría la no implementación del proyecto. El VAN se determina de la siguiente manera:

$$VAN = -I_o + \sum_{n=1}^n \frac{F_n}{(1 + K)^n}$$

Ecuación 3.14 Valor Actual Neto⁴²

Donde:

Io = Inversión inicial

Fn = Sumatoria neta de ingresos y egresos en el periodo

K = Rendimiento mínimo aceptable por el inversionista.

n = Periodo en análisis.

El criterio de selección del VAN se da de la siguiente manera:

- VAN > 0, Se elige el proyecto
- VAN < 0, Se descarta el proyecto
- VAN = 0 No se elige desde el punto de vista financiero pero puede ser escogido.

En el caso particular de que el VAN de cómo resultado cero, implica que el proyecto es capaz de generar suficiente dinero como para sufragar el monto de la inversión inicial y que además cumple con la rentabilidad mínima establecida por el inversionista.

2. Criterio de la Tasa Interna de Retorno: El TIR es un indicador de la rentabilidad de un proyecto en el tiempo, lo que indica es el porcentaje de dinero que realmente se va a generar y que va a producir una ganancia para el inversor por lo cual si el TIR es mayor que la rentabilidad mínima establecida se asegura que se va a cubrir la inversión y que va a existir un excedente de ingresos. El TIR se determina de la siguiente forma:

⁴² Tomado de (Espinoza, 2010)

$$I_o = \sum_{n=1}^n \frac{F_n}{(1 + TIR)^n}$$

Ecuación 3.15 Tasa Interna de Retorno⁴³

Matemáticamente el TIR indica la tasa a la cual el valor de los ingresos es igual al valor de los egresos en valor de moneda actual. El criterio de selección se da de la siguiente manera:

- Si el TIR > K, VAN > 0, se elige el proyecto.
- Si el TIR < K, VAN < 0, no se elige el proyecto.
- Si el TIR = 0, VAN = 0, no se elige el proyecto.

3. Periodo de Recuperación: El PR indica la cantidad de tiempo en años que se necesitan para cubrir la inversión inicial, generalmente para proyectos de gran capital se exige un periodo de recuperación no mayor de 5 años. Es posible determinarlo mediante al siguiente ecuación:

$$PR = \frac{I_0}{\sum F_n}$$

Ecuación 3.16 Periodo de Recuperación⁴⁴

3.6.4.1 Determinación del rendimiento mínimo aceptable.

A la hora de establecer el rendimiento mínimo que se espera de un proyecto se deben tomar en consideración varios factores que conduzcan a un valor real y coherente con la situación del mercado nacional.

⁴³ Tomado de (Espinoza, 2010)

⁴⁴ Tomado de (Espinoza, 2010)

Cuando se desea invertir un capital se tienen una serie de opciones como por ejemplo los bonos del tesoro de los Estados Unidos, una inversión de este tipo representa una de las más seguras posibles ya que el riesgo de sufrir pérdidas es muy bajo debido a que están respaldados por la capacidad del gobierno Estadounidense de recaudar ingresos tributarios y de imprimir moneda. A pesar de esto tienen rendimientos muy bajos del orden del 3% a 10 años por lo cual una inversión de este tipo no es muy atractiva si se desea incrementar el capital rápidamente.

Otra opción son los certificados de depósitos a plazo que emiten los bancos, en este figura financiera se toma el capital y se deposita a un plazo de tiempo determinado durante el cual va a generar un rendimiento, durante este periodo el dinero no puede ser utilizado ni retirado, algunas entidades como el Banco de Costa Rica ofrecen rendimientos de 6,4%, el Banco Popular ofrece un 5,98% y algunas cooperativas como COOPEALIANZA tiene tasas de 8,5%.

Según las expectativas del inversionista y la cantidad de capital de la que disponga pueden realizarse inversiones en la bolsa de valores, este tipo de movimientos tiene un alto riesgo implicado debido a las fluctuaciones y variabilidad del mercado internacional en el que se puede pasar de tener mucho capital a muy poco en instantes si se da una caída de las acciones que se hayan comprado.

Teniendo en cuenta factores como los mencionados anteriormente es que se plantea el proyecto de inversión de la caldera de biomasa con un rendimiento mínimo de un 9% el cual asegure la recuperación de la inversión y un margen de ganancia sobre el dinero invertido.

Se procede a realizar el análisis pertinente para la determinación de los indicadores financieros antes mencionados.

Capítulo 3 Sistema de generación de vapor de Bridgestone de Costa Rica

Tabla 3.28. Evaluación de proyecto de sustitución para Bridgestone de Costa Rica.

	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
Precio de pellet x tonelada		\$277,00	\$290,85	\$305,39	\$320,66	\$336,70	\$353,53	\$371,21	\$389,77	\$409,26	\$429,72
Costo de pellet x mes		\$186.778,33	\$196.117,25	\$205.921,42	\$216.217,83	\$227.033,44	\$238.381,74	\$250.303,19	\$262.818,01	\$275.959,93	\$289.755,90
Costo de bunker x litro		\$0,71	\$0,75	\$0,78	\$0,82	\$0,86	\$0,91	\$0,95	\$1,00	\$1,05	\$1,10
Consumo de bunker		\$252.655,69	\$265.288,47	\$278.552,89	\$292.480,54	\$307.104,56	\$322.459,79	\$338.582,78	\$355.511,92	\$373.287,52	\$391.951,89
Ahorro por mes		\$65.877,36	\$69.171,22	\$72.631,47	\$76.262,71	\$80.071,12	\$84.078,05	\$88.279,59	\$92.693,91	\$97.327,59	\$102.195,99
Ahorro anual		\$790.528,26	\$830.054,68	\$871.577,64	\$915.152,48	\$960.853,46	\$1.008.936,59	\$1.059.355,10	\$1.112.326,90	\$1.167.931,11	\$1.226.351,94
% de AHORRO		30%	35%	40%	45%	50%	50%	50%	50%	50%	50%
AHORRO (US \$)		\$237.158,48	\$290.519,14	\$348.631,06	\$411.818,61	\$480.426,73	\$504.468,30	\$529.677,55	\$556.163,45	\$583.965,55	\$613.175,97
Valor de Rescate (US \$)											\$975.000,00
Flujo de caja	-\$500.000,00	\$237.158,48	\$290.519,14	\$348.631,06	\$411.818,61	\$480.426,73	\$504.468,30	\$529.677,55	\$556.163,45	\$583.965,55	\$1.588.175,97
VAN	\$2.644.701,03	9%									
TIR	64%										

Tabla 3.29. Evaluación de proyecto de sustitución para Eco Solutions.

	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
Precio de pellet x tonelada		\$277,00	\$290,85	\$305,39	\$320,66	\$336,70	\$353,53	\$371,21	\$389,77	\$409,26	\$429,72
Costo de pellet x mes		\$186.778,33	\$196.117,25	\$205.921,42	\$216.217,83	\$227.033,44	\$238.381,74	\$250.303,19	\$262.818,01	\$275.959,93	\$289.755,90
Costo de bunker x litro		\$0,71	\$0,75	\$0,78	\$0,82	\$0,86	\$0,91	\$0,95	\$1,00	\$1,05	\$1,10
Consumo de bunker		\$252.655,69	\$265.288,47	\$278.552,89	\$292.480,54	\$307.104,56	\$322.459,79	\$338.582,78	\$355.511,92	\$373.287,52	\$391.951,89
Ahorro por mes		\$65.877,36	\$69.171,22	\$72.631,47	\$76.262,71	\$80.071,12	\$84.078,05	\$88.279,59	\$92.693,91	\$97.327,59	\$102.195,99
Ahorro anual		\$790.528,26	\$830.054,68	\$871.577,64	\$915.152,48	\$960.853,46	\$1.008.936,59	\$1.059.355,10	\$1.112.326,90	\$1.167.931,11	\$1.226.351,94
% de AHORRO		70%	65%	60%	55%	50%	50%	50%	50%	50%	50%
AHORRO (US \$)		\$553.369,79	\$539.535,54	\$522.946,58	\$503.333,86	\$480.426,73	\$504.468,30	\$529.677,55	\$556.163,45	\$583.965,55	\$613.175,97
Valor de Rescate (US \$)											\$975.000,00
Flujo de caja	-\$2.000.000,00	\$553.369,79	\$539.535,54	\$522.946,58	\$503.333,86	\$480.426,73	\$504.468,30	\$529.677,55	\$556.163,45	\$583.965,55	\$1.588.175,97
VAN	\$1.843.830,55	9%									
TIR	25%										

Es importante aclarar que se estima un aumento del 5% en el bunker según el comportamiento histórico, el cual ha demostrado ser mayor a este porcentaje. Se considera una vida útil de 20 años. Para las proyecciones se mantiene siempre una diferencia de precios del 20%, entre bunker y pellets.

El estudio se centra en los flujos de dinero por concepto del monto de la inversión inicial y los ahorros por concepto de combustible. En el caso de la Tabla 3.28 para la empresa Bridgestone se obtienen valores muy altos tanto de VAN como de TIR, esto se debe a que la inversión inicial que se requiere es muy baja en comparación con los ingresos por conceptos de flujo de dinero, se debe recordar que Bridgestone solamente cubre los gastos por facilidades, la compra de la caldera y gastos de instalación, mano de obra, entre otros corre por cuenta de Eco Solutions.

La Tabla 3.29 muestra el análisis para Eco Solutions que como en el caso anterior, se realiza para el ahorro propuesto de combustible y la diferencia de 20% entre el precio del pellet y el bunker, gastos de instalación, mantenimiento y demás son difíciles de estimar al momento de la realización de este proyecto por lo que un análisis más a fondo se encuentra fuera de los alcances.

En ambos estudios se emplea un rendimiento mínimo de 9%, obteniéndose como resultado valores mucho mayores por lo que según los criterios de selección anteriormente mencionados el proyecto es viable tanto para Eco Solutions como para Bridgestone de Costa Rica.

El periodo de retorno de inversión es de menos de 2 años para Bridgestone y de aproximadamente 4 años para Eco Solutions, desde este punto de evaluación final el proyecto es también viable en cuanto al tiempo necesario para recuperar la inversión inicial.

Capítulo 4 .Conclusiones y Recomendaciones

4.1 Conclusiones

- Se realizó un análisis del consumo de energía de la planta anterior a la sustitución de la caldera de bunker.
- Se dimensionó la caldera de biomasa a ser instalada así como sus equipos auxiliares.
- Se describieron los requerimientos de seguridad de la instalación exigidos por Bridgestone de Costa Rica.
- Se logró determinar que el combustible propuesto Pellet es capaz de cubrir la necesidad de energía del proceso de producción.
- Se determinó que para cumplir con los requerimientos de energía del proceso de vapor de Bridgestone se requieren aproximadamente 674 toneladas del nuevo combustible.
- Se determinó que se requiere un silo con capacidad de al menos 154 toneladas métricas para otorgar una autonomía de 5 días de funcionamiento a la caldera, dado que se requieren aproximadamente 32 toneladas métricas por día.
- Se estimó que la caldera de biomasa es capaz de sustituir entre un 40% y un 50% del consumo de vapor total.
- Se determinó que el uso de la nueva caldera permite ahorrar un promedio de 283 613 litros de bunker por mes.
- Se estimó que el uso de biomasa como combustible evita la emisión de 700 toneladas de dióxido de carbono a la atmósfera por mes.
- Se comprobó que el sistema de filtros de la caldera de biomasa (ACS) cumple con las emisiones máximas establecidas por la reglamentación nacional.
- Se estimó que el uso de pellet como combustible en lugar de bunker permite ahorros de hasta el 20% equivalente a \$550 000 en promedio por año.
- Se calculó que la rentabilidad del proyecto para Bridgestone es de 64% y de un 23% para Eco Solutions.

4.2 Recomendaciones.

- Los instrumentos y equipos a utilizar para la operación de la caldera deben contar con certificado UL o alguno equivalente que cumpla con las características técnicas que se mencionan en este informe.
- La instalación de la caldera debe cumplir en todos sus aspectos con el reglamento de calderas de Costa Rica.
- Realizar visitas periódicas e inspecciones durante la ejecución del proyecto que aseguren el cumplimiento de las normas así como los protocolos de seguridad que Bridgestone establece en su reglamento interno.
- Realizar un estudio de las instalaciones y el espacio donde se ubicará la caldera con el fin de determinar si algún equipo o tuberías se pueden utilizar en la nueva instalación.
- Instalar sensores de nivel en el silo así como válvulas dosificadoras para el pellet que permitan un control más sensible del consumo real del combustible.
- Realizar reportes de mantenimiento por parte de la empresa encargada para tener un historial de las intervenciones que ha tenido el equipo, instrumentación reparada o sustituida así como costo del mismo, esto permite tener un mejor control del mantenimiento de la caldera.
- Se recomienda la calibración de las calderas de bunker al mínimo de producción de vapor posible, esto disminuye el efecto de Turn Down de la caldera de Biomasa, lo que aumenta el porcentaje de sustitución de vapor.
- Es importante que al momento de la puesta en marcha de la caldera todas las superficies que desprendan calor estén debidamente aisladas con fibra cerámica y/o señaladas para evitar accidentes por quemaduras.
- Se recomienda que el sistema de eliminación de ceniza de los ciclones este completamente sellado para evitar la presencia de polvo en el ambiente y posibles padecimientos de salud por respirarlo

- Se recomienda enlazar el sistema de monitoreo y control de la caldera de biomasa con el existente para las calderas de bunker, de esta manera se logra un control más centralizado e independiente del sistema.

Capítulo 5 . Bibliografía

Advanced Cyclone Systems. (2014). *Hurricane Systems for wood dust emission control y pellet plants*. Recuperado el 02 de Octubre de 2014, de http://www.wip.fyi.pt/acsystems/assets/misc/img/folhetos/LFL_CE_EN_PELLETS_03092013.pdf

Behn, A. O. (s.f.). *ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA*. Recuperado el 24 de Setiembre de 2014, de THERMAL ENGINEERING LTDA. : http://www.thermal.cl/prontus_thermal/site/artic/20110602/asocfile/20110602102250/articulo___eficiencia_en_calderas.pdf

BUN-CA Fundación Red de Energía. (202). *Manual sobre Energía Renovable: Biomasa*. Recuperado el 02 de Setiembre de 2014, de http://www.bun-ca.org/index.php?option=com_content&view=article&id=321&Itemid=111

Chang, L. (02 de Noviembre de 2009). *La Llave SA*. Recuperado el 05 de Setiembre de 2014, de ¿Como seleccionar una caldera?: <http://www.leermas.com/lallave/news15/info2.php>

Chavarria, S. M. (13 de Agosto de 2013). *El Financiero*. Recuperado el 03 de Octubre de 2014, de Tasas de interés a más de seis meses plazo compensan inflación: http://www.elfinancierocr.com/finanzas/Tasas-interes-rendimientos-certificados-depositos-bancos_13_353494648.html

Delgado, F. M. (Marzo de 2012). Estudio Técnico y Económico para la sustitución del gasoleo por biomasa térmica en edificios urbanos.

Durán, A. A. (Octubre de 1982). *Petroquímica Básica Realizaciones 1977-1982*. Recuperado el 19 de Setiembre de 2014, de Determinación Experimental del NPSH Requerido en Bombas Centrífugas que manejan Soluciones Acuosas: <https://es.scribd.com/doc/54675056/8-Calculo-Del-NPSH>

Energías Renovables. (s.f.). Obtenido de http://www.energiasrenovables.es/informacion_energias/cambio_climatico/aprovechamiento.html

Espinoza, S. F. (2010). Los proyectos de inversión Evaluación Financiera. En S. F. Espinoza, *Los proyectos de inversión Evaluación Financiera* (págs. 128-148). Cartago Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica.

Forbes Marshall. (2014). *Fully Automatic & Unmanned Multifuel Fired Boiler*. Recuperado el 06 de Octubre de 2014, de http://www.forbesmarshall.com/fm_micro/Boilers/Vyncke/Product.aspx

Gamusino. (09 de Octubre de 2012). *Tipos de Biomasa*. Recuperado el 25 de Agosto de 2014, de <http://www.proyectovivirenelcampo.com/2012/10/tipos-de-biomasa/>

Gas Natural Fenosa. (2014). *Calderas de Biomasa : Gas Natural Fenosa*. Recuperado el 28 de Setiembre de 2014, de Gas Natural Fenosa: <http://www.empresaeficiente.com/es/catalogo-de-tecnologias/calderas-de-biomasa#ancla>

Grupo Biosan. (19 de Octubre de 2013). Recuperado el 24 de Agosto de 2014, de Los beneficios económicos de una caldera de biomasa.: <http://www.blogenergiasostenible.com/beneficios-economicos-caldera-biomasa/>

Hernández, S. A. (s.f.). *Desarrollo de un Sistema de Gestión Bajo en Emisiones*. Recuperado el 27 de Setiembre de 2014, de AMCHAM: http://www.amcham.co.cr/archivos/committee/435_c_neutralidad_amcham_july_2011_web_page.pdf

Ingemecánica. (s.f.). *Longitud equivalente de tubería en metros*. Recuperado el 19 de Setiembre de 2014, de <http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/objetos/figutut201/tab7tut201>

Ingeniería de Rehabilitación y Gestión Medioambiental INGENERE. (19 de Mayo de 2011). *Mejor sin CO2*. Recuperado el 12 de Setiembre de 2014, de <http://ingenere.wordpress.com/tag/tipos-de-calderas-de-biomasa/>

Leandro, C. (16 de Julio de 2014). *Costa Rica Carbono Neutro 2021: Un proyecto país que se pone cuesta arriba*. Recuperado el 28 de Agosto de 2014, de <http://www.crhoy.com/costa-rica-carbono-neutro-2021-un-proyecto-pais-que-se-pone-cuesta-arriba/>

Mechanical Engineering. (18 de Diciembre de 2012). *Bucket Elevator Part | Bucket Elevator Guide | Bucket Elevator How It Works*. Recuperado el 07 de Setiembre de 2014, de <http://www.mechanicalengineeringblog.com/date/2012/12/>

Miliarium Ingeniería Civil y Medio Ambiente. (s.f.). *Cálculo de pérdidas de carga en tuberías*. Recuperado el 16 de Setiembre de 2014, de <http://www.miliarium.com/Prontuario/MedioAmbiente/Aguas/PerdidaCarga.asp>

Ministerio de Ciencia e Innovación Español. (Octubre de 2008). *Biomasa*. Recuperado el 29 de Agosto de 2014, de http://www.energiasrenovables.ciemat.es/suplementos/sit_actual_renovables/biomasa.htm

Ministerio de Industria, Turismo y Comercio Español. (2007). *Energía de la biomasa*. Recuperado el 25 de Setiembre de 2014, de http://www.energiasrenovables.ciemat.es/adjuntos_documentos/Biomasa.pdf

Moreno, M. A. (Enero de 2001). *Apuntes de Control PID*. Recuperado el 27 de Setiembre de 2014, de <http://es.slideshare.net/jaderguerrero/blanco/control-pid-8127889?related=1>

Nassir Sapag Chain, R. S. (1985). Fundamentos de preparación y evaluación de proyectos. En R. S. Nassir Sapag Chain, *Fundamentos de preparación y evaluación de proyectos* (págs. 289-322). Bogotá Colombia: McGraw Hill.

Nebiosur. (31 de Agosto de 2011). *Buenas prácticas de almacenamiento de pellets de madera*. Recuperado el 04 de Octubre de 2014, de ENPLUS: http://nebiosur.sitioenpruebas.com/wp-content/uploads/2013/10/buenas-practicas-de-almacenamiento-de-pellets-de-madera_v1.3.pdf

Negocios verdes. (s.f.). Obtenido de <http://www.negociosverdes.mx/biomasa-la-energia-de-la-naturaleza/>

Netto, R. S. (s.f.). *Fisicanet*. Recuperado el 24 de Agosto de 2014, de Física-Termodinámica: http://www.fisicanet.com.ar/fisica/termodinamica/ap03_fuentes_de_energia.php

Probio. (2013). *¿Que es la biomasa?* Recuperado el 09 de Setiembre de 2014, de <http://www.probio.gub.uy/cms/>

Reynoso, F. O. (01 de Junio de 2009). *Condiciones de succión en las Bombas Centrífugas*. Recuperado el 22 de Setiembre de 2014, de <https://es.scribd.com/doc/19014910/Condiciones-de-succion>

Rubio, B. (5 de Enero de 2010). *Cambiar la caldera comunitaria: cuestión de ahorro y eficiencia*. Recuperado el 02 de Setiembre de 2014, de http://www.consumer.es/web/es/vivienda/comunidades_vecinos_y_legislacion/2010/01/05/190251.php?page=2

SERRADORA BOIX SL. (Abril de 2013). *Manual para la certificación de pellets de madera para usos térmicos*. Recuperado el 04 de Setiembre de 2014, de European Pellet Council: http://www.serradoraboix.com/media/docs/certificacions/enplus_manual_es.pdf

Soto, M. (11 de Setiembre de 2013). *Costa Rica crea mercado local de carbono*. Recuperado el 06 de Octubre de 2014, de La Nación: <http://www.nacion.com/archivo.html&date=1378908000>

Thermal Engineering. (s.f.). *Costo de Generación de Vapor*. Recuperado el 23 de Setiembre de 2014, de http://www.thermal.cl/prontus_thermal/site/artic/20110602/asocfile/20110602102250/articulo_precio_generacion_vapor.pdf

TLV Compañía Especialista en Vapor. (2014). *Aplicaciones Principales para el Vapor de Agua*. Recuperado el 18 de Setiembre de 2014, de <http://www.tlv.com/global/LA/steam-theory/principal-applications-for-steam.html>

TLV Compañía Especialista en Vapor. (2014). *Tipos de vapor de Agua*. Recuperado el 18 de Setiembre de 2014, de <http://www.tlv.com/global/LA/steam-theory/types-of-steam.html#superheat>

Torres, F. (11 de Diciembre de 2012). *El Eucalipto es el árbol que más CO2 captura en Chile*. Recuperado el 01 de Octubre de 2014, de Veoverde: <http://www.veoverde.com/2012/12/el-eucalipto-es-el-arbol-que-mas-co2-captura-en-chile/>

Torres, F. (11 de Diciembre de 2012). *Veoverde*. Recuperado el 04 de Octubre de 2014, de El eucalipto es el árbol que más CO2 captura en Chile: <http://www.veoverde.com/2012/12/el-eucalipto-es-el-arbol-que-mas-co2-captura-en-chile/>

Universidad de Salamanca. (s.f.). *Departamento de Ingeniería Mecánica*. Recuperado el 03 de Setiembre de 2014, de Transportadores por rosca: <http://dim.usal.es/areaim/guia%20P.%20I/rosca%20helicodal.htm>

Yunus Cengel, M. B. (2009). *Termodinámica*. En M. B. Yunus Cengel, *Termodinámica* (págs. 910-913). México: McGraw Hill.

Zavaleta, A. G. (28 de Agosto de 2012). *Bombas Hidráulicas*.

Decreto Ejecutivo N°26789 – MTSS: Reglamento de calderas.

Decreto Ejecutivo N°36551 – MTSS: Reglamento sobre emisión de contaminantes atmosféricos provenientes de calderas y hornos de tipo indirecto.

L.F Moody, "Friction Factor for Pipe Flow", Trans. ASME, vol. 66, 1944.

Capítulo 6 . Apéndices

Apéndice 1. Eficiencia instantánea promedio del 16 de Julio del 2014.

Hora	Caldera 1 (Kg/h)	Caldera 3 (Kg/h)	Total (kJ/kg)	Eficiencia (%)	Hora	Caldera 1 (Kg/h)	Caldera 3 (Kg/h)	Total (kJ/kg)	Eficiencia (%)
06:00:00 a.m.	5660	7232	12892	78,4	06:00:00 p.m.	5759	5890	11649	70,8
07:00:00 a.m.	6286	4817	11103	67,5	07:00:00 p.m.	5785	6608	12393	75,3
08:00:00 a.m.	6414	6276	12690	77,1	08:00:00 p.m.	4977	7461	12438	75,6
09:00:00 a.m.	5421	3394	8815	53,6	09:00:00 p.m.	5095	6444	11539	70,1
10:00:00 a.m.	5999	3696	9695	58,9	10:00:00 p.m.	5940	4195	10135	61,6
11:00:00 a.m.	5311	4828	10139	61,6	11:00:00 p.m.	6385	5343	11728	71,3
12:00:00 p.m.	6524	5066	11590	70,4	12:00:00 a.m.	6115	7196	13311	80,9
01:00:00 p.m.	4744	5698	10442	63,5	01:00:00 a.m.	5486	4927	10413	63,3
02:00:00 p.m.	5837	5584	11421	69,4	02:00:00 a.m.	5679	4101	9780	59,4
03:00:00 p.m.	6385	5304	11689	71,0	03:00:00 a.m.	5226	5515	10741	65,3
04:00:00 p.m.	6303	6934	13237	80,5	04:00:00 a.m.	5906	5095	11001	66,9
05:00:00 p.m.	5064	6386	11450	69,6	05:00:00 a.m.	6099	5038	11137	67,7

Elaboración propia (Microsoft Excel)

Apéndice 2. Eficiencia instantánea promedio del 17 de Julio del 2014.

Hora	Caldera 1 (Kg/h)	Caldera 3 (Kg/h)	Total (kJ/kg)	Eficiencia (%)	Hora	Caldera 1 (Kg/h)	Caldera 3 (Kg/h)	Total (kJ/kg)	Eficiencia (%)
06:00:00 a.m.	6940	10590	17530	113,81	06:00:00 p.m.	7459	4806	12265	79,6
07:00:00 a.m.	5130	4533	9663	62,74	07:00:00 p.m.	7009	5713	12722	82,6
08:00:00 a.m.	4527	4534	9061	58,83	08:00:00 p.m.	7568	5553	13121	85,2
09:00:00 a.m.	3972	5455	9427	61,20	09:00:00 p.m.	5381	4478	9859	64,0
10:00:00 a.m.	3877	5733	9610	62,39	10:00:00 p.m.	5893	5110	11003	71,4
11:00:00 a.m.	5266	5732	10998	71,40	11:00:00 p.m.	4707	4583	9290	60,3
12:00:00 p.m.	6935	5398	12333	80,07	12:00:00 a.m.	5804	7049	12853	83,4
01:00:00 p.m.	6460	5283	11743	76,24	01:00:00 a.m.	5090	5664	10754	69,8
02:00:00 p.m.	6271	5228	11499	74,66	02:00:00 a.m.	7839	6039	13878	90,1
03:00:00 p.m.	6888	4958	11846	76,91	03:00:00 a.m.	5478	3967	9445	61,3
04:00:00 p.m.	6656	6173	12829	83,29	04:00:00 a.m.	5211	4928	10139	65,8
05:00:00 p.m.	6335	6558	12893	83,71	05:00:00 a.m.	5986	7241	13227	85,9

Elaboración propia (Microsoft Excel)

Apéndice 3. Eficiencia instantánea promedio del 18 de Julio del 2014.

Hora	Caldera 1 (Kg/h)	Caldera 3 (Kg/h)	Total (Kg/h)	Eficiencia (%)	Hora	Caldera 1 (Kg/h)	Caldera 3 (Kg/h)	Total (Kg/h)	Eficiencia (%)
06:00:00 a.m.	5333	5081	10414	66,51	06:00:00 p.m.	5370	4394	9764	62,4
07:00:00 a.m.	4777	4287	9064	57,89	07:00:00 p.m.	5816	6679	12495	79,8
08:00:00 a.m.	4942	5493	10435	66,65	08:00:00 p.m.	6629	5125	11754	75,1
09:00:00 a.m.	5260	4000	9260	59,14	09:00:00 p.m.	6670	4611	11281	72,1
10:00:00 a.m.	5064	5300	10364	66,19	10:00:00 p.m.	5502	6259	11761	75,1
11:00:00 a.m.	5385	7350	12735	81,34	11:00:00 p.m.	5436	4935	10371	66,2
12:00:00 p.m.	5041	5151	10192	65,10	12:00:00 a.m.	5881	3258	9139	58,4
01:00:00 p.m.	4975	4740	9715	62,05	01:00:00 a.m.	4278	13196	17474	111,6
02:00:00 p.m.	6977	5610	12587	80,39	02:00:00 a.m.	5656	6517	12173	77,7
03:00:00 p.m.	4376	4329	8705	55,60	03:00:00 a.m.	6400	4024	10424	66,6
04:00:00 p.m.	7210	5919	13129	83,85	04:00:00 a.m.	6930	4178	11108	70,9
05:00:00 p.m.	6481	5488	11969	76,45	05:00:00 a.m.	6856	3354	10210	65,2

Elaboración propia (Microsoft Excel)

Apéndice 4. Eficiencia instantánea promedio del 19 de Julio del 2014.

Hora	Caldera 1 (Kg/h)	Caldera 3 (Kg/h)	Total (Kg/h)	Eficiencia (%)	Hora	Caldera 1 (Kg/h)	Caldera 3 (Kg/h)	Total (Kg/h)	Eficiencia (%)
06:00:00 a.m.	6708	6331	13039	88,41	06:00:00 p.m.	2553	3920	6473	43,9
07:00:00 a.m.	3021	6652	9673	65,59	07:00:00 p.m.	3174	4037	7211	48,9
08:00:00 a.m.	3596	6592	10188	69,08	08:00:00 p.m.	3627	3581	7208	48,9
09:00:00 a.m.	6038	6184	12222	82,87	09:00:00 p.m.	5557	6951	12508	84,8
10:00:00 a.m.	3690	5785	9475	64,24	10:00:00 p.m.	5581	4809	10390	70,4
11:00:00 a.m.	5988	3890	9878	66,98	11:00:00 p.m.	6200	6296	12496	84,7
12:00:00 p.m.	7074	6797	13871	94,05	12:00:00 a.m.	4960	6424	11384	77,2
01:00:00 p.m.	6710	3490	10200	69,16	01:00:00 a.m.	7394	6542	13936	94,5
02:00:00 p.m.	6706	3538	10244	69,46	02:00:00 a.m.	6389	3160	9549	64,7
03:00:00 p.m.	6682	8118	14800	100,35	03:00:00 a.m.	7000	4811	11811	80,1
04:00:00 p.m.	5845	4893	10738	72,81	04:00:00 a.m.	6395	4852	11247	76,3
05:00:00 p.m.	3893	4193	8086	54,83	05:00:00 a.m.	5438	5336	10774	73,1

Elaboración propia (Microsoft Excel)

Apéndice 5. Eficiencia instantánea promedio del 20 de Julio del 2014.

Hora	Caldera 1 (Kg/h)	Caldera 3 (Kg/h)	Total (Kg/h)	Eficiencia (%)	Hora	Caldera 1 (Kg/h)	Caldera 3 (Kg/h)	Total (Kg/h)	Eficiencia (%)
06:00:00 a.m.	6803	5949	12752	84,74	06:00:00 p.m.	5032	4565	9597	63,8
07:00:00 a.m.	5524	4269	9793	65,08	07:00:00 p.m.	5501	4860	10361	68,8
08:00:00 a.m.	5697	4661	10358	68,83	08:00:00 p.m.	5599	4088	9687	64,4
09:00:00 a.m.	6508	4209	10717	71,22	09:00:00 p.m.	7886	5997	13883	92,3
10:00:00 a.m.	7533	4044	11577	76,93	10:00:00 p.m.	6900	5095	11995	79,7
11:00:00 a.m.	5429	4923	10352	68,79	11:00:00 p.m.	5780	4426	10206	67,8
12:00:00 p.m.	5253	4710	9963	66,21	12:00:00 a.m.	7659	6521	14180	94,2
01:00:00 p.m.	4791	4756	9547	63,44	01:00:00 a.m.	7616	3563	11179	74,3
02:00:00 p.m.	6681	5389	12070	80,21	02:00:00 a.m.	6400	5589	11989	79,7
03:00:00 p.m.	5966	4421	10387	69,02	03:00:00 a.m.	6068	4440	10508	69,8
04:00:00 p.m.	6864	6637	13501	89,72	04:00:00 a.m.	6820	6339	13159	87,4
05:00:00 p.m.	6823	5990	12813	85,14	05:00:00 a.m.	6640	3224	9864	65,5

Elaboración propia (Microsoft Excel)

Apéndice 6. Eficiencia instantánea promedio del 21 de Julio del 2014.

Hora	Caldera 1 (Kg/h)	Caldera 3 (Kg/h)	Total (Kg/h)	Eficiencia (%)	Hora	Caldera 1 (Kg/h)	Caldera 3 (Kg/h)	Total (Kg/h)	Eficiencia (%)
06:00:00 a.m.	6414	6740	13154	80,60	06:00:00 p.m.	5451	5092	10543	64,6
07:00:00 a.m.	5309	4635	9944	60,93	07:00:00 p.m.	6713	5658	12371	75,8
08:00:00 a.m.	5825	8145	13970	85,60	08:00:00 p.m.	6472	5716	12188	74,7
09:00:00 a.m.	5675	4841	10516	64,44	09:00:00 p.m.	6879	5582	12461	76,4
10:00:00 a.m.	5626	6172	11798	72,29	10:00:00 p.m.	6218	6776	12994	79,6
11:00:00 a.m.	5285	6314	11599	71,07	11:00:00 p.m.	6514	4960	11474	70,3
12:00:00 p.m.	6465	6284	12749	78,12	12:00:00 a.m.	6757	3155	9912	60,7
01:00:00 p.m.	6177	3872	10049	61,58	01:00:00 a.m.	6296	3391	9687	59,4
02:00:00 p.m.	5969	3972	9941	60,91	02:00:00 a.m.	5969	7621	13590	83,3
03:00:00 p.m.	5956	7259	13215	80,98	03:00:00 a.m.	5427	4773	10200	62,5
04:00:00 p.m.	6120	3234	9354	57,32	04:00:00 a.m.	6019	7006	13025	79,8
05:00:00 p.m.	5979	5637	11616	71,18	05:00:00 a.m.	6253	5336	11589	71,0

Elaboración propia (Microsoft Excel)

Apéndice 7. Eficiencia instantánea promedio del 22 de Julio del 2014.

Hora	Caldera 1 (Kg/h)	Caldera 3 (Kg/h)	Total (Kg/h)	Eficiencia (%)	Hora	Caldera 1 (Kg/h)	Caldera 3 (Kg/h)	Total (Kg/h)	Eficiencia (%)
06:00:00 a.m.	6685	3590	10275	61,95	06:00:00 p.m.	5873	4887	10760	64,9
07:00:00 a.m.	6234	3710	9944	59,95	07:00:00 p.m.	5188	4488	9676	58,3
08:00:00 a.m.	6377	3979	10356	62,44	08:00:00 p.m.	5070	5539	10609	64,0
09:00:00 a.m.	5735	4202	9937	59,91	09:00:00 p.m.	7084	4600	11684	70,4
10:00:00 a.m.	5257	7898	13155	79,31	10:00:00 p.m.	6880	4400	11280	68,0
11:00:00 a.m.	5926	6498	12424	74,90	11:00:00 p.m.	7043	4888	11931	71,9
12:00:00 p.m.	6391	9192	15583	93,95	12:00:00 a.m.	6950	5675	12625	76,1
01:00:00 p.m.	5362	4109	9471	57,10	01:00:00 a.m.	7121	5864	12985	78,3
02:00:00 p.m.	5669	3689	9358	56,42	02:00:00 a.m.	8370	5501	13871	83,6
03:00:00 p.m.	4537	4902	9439	56,91	03:00:00 a.m.	5880	4800	10680	64,4
04:00:00 p.m.	8482	4692	13174	79,42	04:00:00 a.m.	5395	5880	11275	68,0
05:00:00 p.m.	4618	5997	10615	64,00	05:00:00 a.m.	5380	4900	10280	62,0

Elaboración propia (Microsoft Excel)

Apéndice 8. Eficiencia instantánea promedio del 23 de Julio del 2014.

Hora	Caldera 1 (Kg/h)	Caldera 3 (Kg/h)	Total (Kg/h)	Eficiencia (%)	Hora	Caldera 1 (Kg/h)	Caldera 3 (Kg/h)	Total (Kg/h)	Eficiencia (%)
06:00:00 a.m.	8044	5781	13825	82,68	06:00:00 p.m.	5197	4804	10001	59,8
07:00:00 a.m.	8044	5781	13825	82,68	07:00:00 p.m.	4319	5142	9461	56,6
08:00:00 a.m.	5928	4652	10580	63,28	08:00:00 p.m.	4834	4907	9741	58,3
09:00:00 a.m.	5632	5003	10635	63,61	09:00:00 p.m.	4573	5860	10433	62,4
10:00:00 a.m.	5760	7035	12795	76,52	10:00:00 p.m.	5200	5280	10480	62,7
11:00:00 a.m.	5764	6516	12280	73,44	11:00:00 p.m.	6400	5817	12217	73,1
12:00:00 p.m.	5803	6814	12617	75,46	12:00:00 a.m.	6020	5230	11250	67,3
01:00:00 p.m.	7803	6576	14379	86,00	01:00:00 a.m.	5900	7196	13096	78,3
02:00:00 p.m.	4924	4298	9222	55,15	02:00:00 a.m.	5831	6444	12275	73,4
03:00:00 p.m.	4660	4711	9371	56,05	03:00:00 a.m.	6311	7633	13944	83,4
04:00:00 p.m.	6475	6580	13055	78,08	04:00:00 a.m.	5516	7782	13298	79,5
05:00:00 p.m.	4722	4789	9511	56,88	05:00:00 a.m.	5695	4051	9746	58,3

Elaboración propia (Microsoft Excel)

Apéndice 9. Eficiencia instantánea promedio del 24 de Julio del 2014.

Hora	Caldera 1 (Kg/h)	Caldera 3 (Kg/h)	Total (Kg/h)	Eficiencia (%)	Hora	Caldera 1 (Kg/h)	Caldera 3 (Kg/h)	Total (Kg/h)	Eficiencia (%)
06:00:00 a.m.	3805	5328	9133	59,30	06:00:00 p.m.	5237	5007	10244	66,5
07:00:00 a.m.	5758	5073	10831	70,32	07:00:00 p.m.	5300	4819	10119	65,7
08:00:00 a.m.	6226	3530	9756	63,34	08:00:00 p.m.	5950	4510	10460	67,9
09:00:00 a.m.	6672	4618	11290	73,30	09:00:00 p.m.	4527	6079	10606	68,9
10:00:00 a.m.	5283	4703	9986	64,83	10:00:00 p.m.	4800	5922	10722	69,6
11:00:00 a.m.	4678	4093	8771	56,95	11:00:00 p.m.	5039	5598	10637	69,1
12:00:00 p.m.	4594	5599	10193	66,18	12:00:00 a.m.	6288	6419	12707	82,5
01:00:00 p.m.	6465	6931	13396	86,97	01:00:00 a.m.	3900	6327	10227	66,4
02:00:00 p.m.	4804	6833	11637	75,55	02:00:00 a.m.	6137	6428	12565	81,6
03:00:00 p.m.	4782	6872	11654	75,66	03:00:00 a.m.	6277	7510	13787	89,5
04:00:00 p.m.	8788	1408	10196	66,20	04:00:00 a.m.	6129	7580	13709	89,0
05:00:00 p.m.	4815	5102	9917	64,39	05:00:00 a.m.	6158	7447	13605	88,3

Elaboración propia (Microsoft Excel)

Apéndice 10. Eficiencia instantánea promedio del 25 de Julio del 2014.

Hora	Caldera 1 (Kg/h)	Caldera 3 (Kg/h)	Total (Kg/h)	Eficiencia (%)	Hora	Caldera 1 (Kg/h)	Caldera 3 (Kg/h)	Total (Kg/h)	Eficiencia (%)
06:00:00 a.m.	6019	7732	13751	87,42	06:00:00 p.m.	5734	6184	11918	75,8
07:00:00 a.m.	6265	4384	10649	67,70	07:00:00 p.m.	5744	5973	11717	74,5
08:00:00 a.m.	4377	4939	9316	59,23	08:00:00 p.m.	7078	4900	11978	76,2
09:00:00 a.m.	6038	6987	13025	82,81	09:00:00 p.m.	6738	4954	11692	74,3
10:00:00 a.m.	5347	5026	10373	65,95	10:00:00 p.m.	6776	4975	11751	74,7
11:00:00 a.m.	4870	4549	9419	59,88	11:00:00 p.m.	6258	5900	12158	77,3
12:00:00 p.m.	4293	5168	9461	60,15	12:00:00 a.m.	5800	4620	10420	66,2
01:00:00 p.m.	5289	6552	11841	75,28	01:00:00 a.m.	5560	4400	9960	63,3
02:00:00 p.m.	5395	7138	12533	79,68	02:00:00 a.m.	4890	4274	9164	58,3
03:00:00 p.m.	5426	5701	11127	70,74	03:00:00 a.m.	4900	4084	8984	57,1
04:00:00 p.m.	5438	6715	12153	77,26	04:00:00 a.m.	6758	6692	13450	85,5
05:00:00 p.m.	3732	5589	9321	59,26	05:00:00 a.m.	4224	6821	11045	70,2

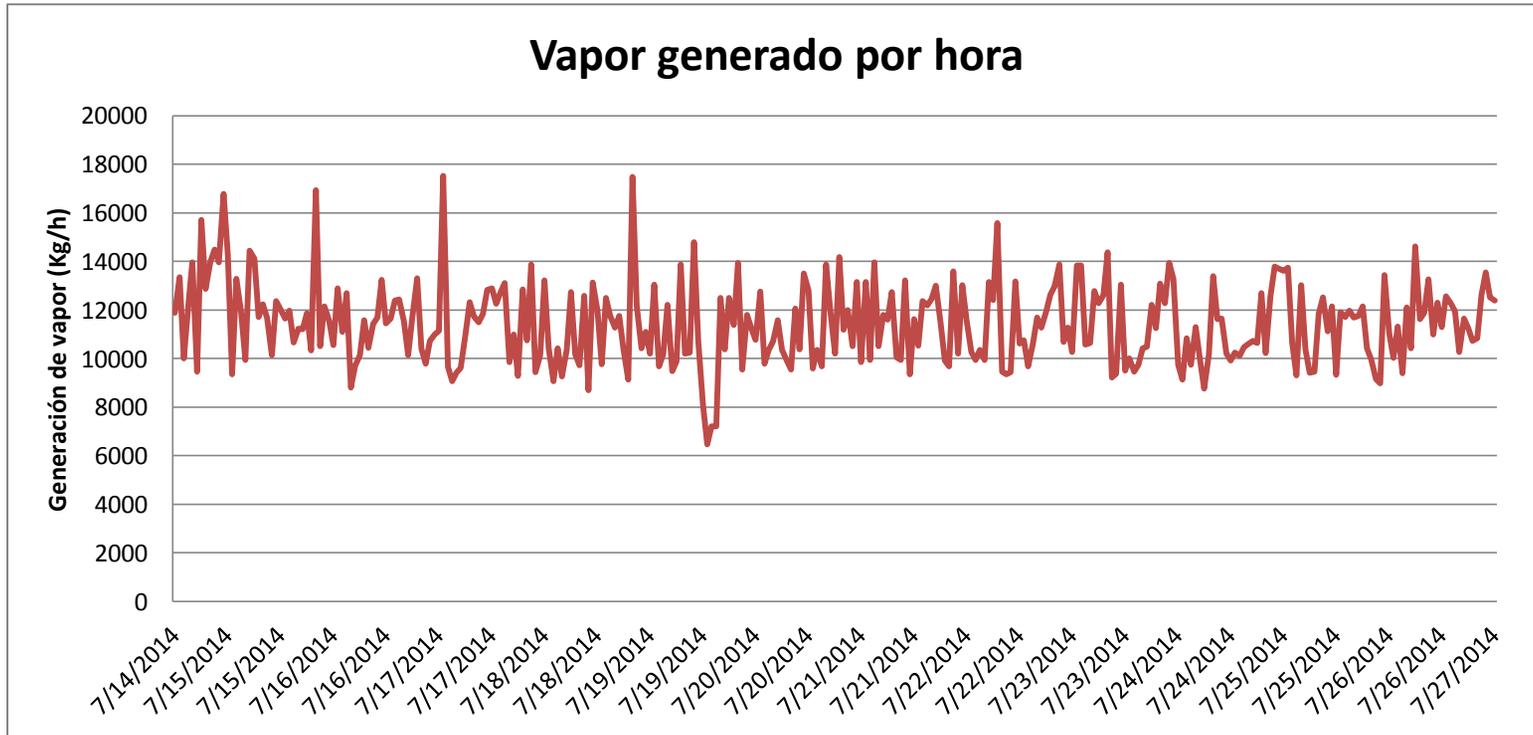
Elaboración propia (Microsoft Excel)

Apéndice 11. Eficiencia instantánea promedio del 26 de Julio del 2014.

Hora	Caldera 1 (Kg/h)	Caldera 3 (Kg/h)	Total (Kg/h)	Eficiencia (%)	Hora	Caldera 1 (Kg/h)	Caldera 3 (Kg/h)	Total (Kg/h)	Eficiencia (%)
06:00:00 a.m.	4851	5190	10041	62,97	06:00:00 p.m.	6721	5846	12567	78,8
07:00:00 a.m.	5934	5379	11313	70,95	07:00:00 p.m.	6580	5703	12283	77,0
08:00:00 a.m.	4449	4940	9389	58,88	08:00:00 p.m.	5209	6740	11949	74,9
09:00:00 a.m.	5502	6609	12111	75,95	09:00:00 p.m.	5041	5227	10268	64,4
10:00:00 a.m.	5764	4664	10428	65,40	10:00:00 p.m.	6889	4769	11658	73,1
11:00:00 a.m.	6987	7627	14614	91,65	11:00:00 p.m.	7280	3983	11263	70,6
12:00:00 p.m.	5819	5798	11617	72,85	12:00:00 a.m.	6158	4580	10738	67,3
01:00:00 p.m.	6370	5516	11886	74,54	01:00:00 a.m.	6230	4599	10829	67,9
02:00:00 p.m.	6410	6850	13260	83,16	02:00:00 a.m.	6526	6108	12634	79,2
03:00:00 p.m.	6237	4758	10995	68,95	03:00:00 a.m.	8101	5449	13550	85,0
04:00:00 p.m.	5194	7111	12305	77,17	04:00:00 a.m.	6457	6062	12519	78,5
05:00:00 p.m.	5978	5310	11288	70,79	05:00:00 a.m.	5954	6428	12382	77,6

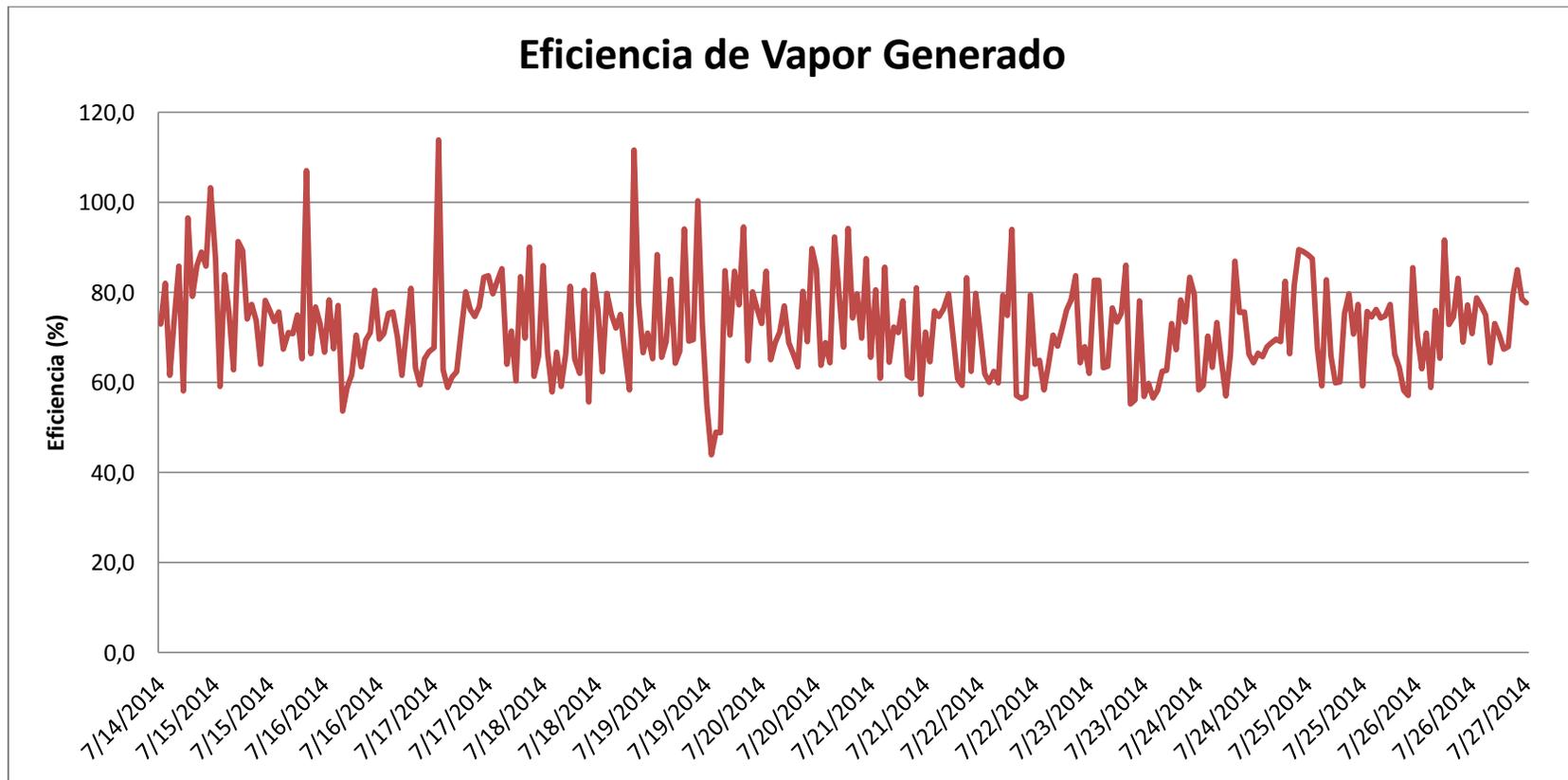
Elaboración propia (Microsoft Excel)

Apéndice 12. Gráfico de Vapor generado para el periodo de tiempo en estudio.



Elaboración propia (Microsoft Excel)

Apéndice 13. Gráfico de eficiencia promedio instantánea para el periodo de tiempo en estudio.



Elaboración propia (Microsoft Excel)

Apéndice 14. Tabla de cálculo de distancia equivalente para caída de presión por accesorios en la línea de succión de las bombas de agua.

Accesorio	Cantidad	Le (m)
Codo 6"	4	30
Codo 2,5"	2	9
Reducción 6-2.5	1	3,1
Te salida angular	1	2,5
Total		44,6

Elaboración propia (Microsoft Excel)

Apéndice 15. Puesta en Marcha de la caldera biomásica VYNCKE.

- **Encendido inicial, primer fuego y curado de refractario.**

El encendido inicial de la caldera se realizó mediante el uso de madera, corteza de árbol, chispa y alcohol. Al momento de realizar este procedimiento la madera estaba húmeda por lo que el proceso de combustión se dio de manera ineficiente, producto de esto se dio la formación de “rocas de ceniza” que alteraron la salida del aire primario de la cámara de combustión bloqueándolo. Cuando se alcanzó un tiempo de 72 horas a fuego bajo de aproximadamente 250°C se dio por terminado el curado del refractario y se comenzó la alimentación con pellet de manera normal.

- **Fallos en sistema de alimentación de pellet.**

Durante los primeros días de operación de la caldera se experimentaron fallos en el sistema de alimentación de pellet, protecciones activadas por sobrecarga de los motores, atascamientos de pellet, desprendimiento de los cangilones del sistema elevador, salida de polvo entre otros. Cada uno de estos inconvenientes se resolvió mediante modificaciones de cableado eléctrico, dosificación de combustible, sellado hermético del sistema, reemplazo de arandelas de presión de los cangilones del sistema elevador entre otras correcciones.

- **Fallos por sistema de abastecimiento de agua.**

Al realizar la operación de la caldera en las primeras semanas de funcionamiento se experimentaron faltantes de agua de alimentación, desencadenando el paro del equipo. Se determinó que el problema radicaba tanto en el caudal máximo de la bomba como en el tiempo de respuesta del programa y por consiguiente el variador de frecuencia de las bombas. El caudal máximo suple la demanda nominal de la caldera, por las características del proceso de producción se dan picos de consumo en los cuales la caldera no puede reaccionar a tiempo ni con el suficiente caudal para llevarlos.

La medida de prevención que se tomó fue el establecer el nivel de la caldera a un nivel alto de modo que la bomba se mantuviera siempre entre un 85 a un 100 % de su capacidad.

- **Fallos por sub dimensionamiento de protecciones.**

Durante la operación de la caldera se dieron algunas fallas por paro de motores de las válvulas de dosificación de pellet al tornillo alimentador, al revisar las protecciones del tablero se observa que las mismas se encuentran configuradas en máxima capacidad al límite de la corriente nominal del motor. Se realizó el cambio de las mismas para evitar que el fallo se repitiera.

- **Fallo de motor de tornillo alimentador.**

Se presentó un problema de sobrecarga del tornillo alimentador de la cámara de combustión de la caldera, el mismo trabajaba a más de 3 amperios de su corriente nominal por lo que las protecciones cedían. Al inspeccionar el sistema se determinó que la sobrecarga se debió al exceso de ceniza acumulado dentro de la cámara que provocó un atascamiento del material.

- **Ajuste de parámetros VYNCKE.**

Al momento de establecer el ajuste de los parámetros de combustión de la caldera se realizó de modo que la misma estuviera operando y produciendo vapor de manera regular. Pero este ajuste no se adapta al proceso productivo por lo que se presentaron problemas con la estabilidad del flujo de vapor.

- **Ajuste de parámetros en sitio.**

Este ajuste se da en conjunto con los operadores de caldera de Bridgestone y el personal de Eco Solutions, mediante el mismo se logra estabilizar la producción de vapor a un nivel máximo, se varían los parámetros de flujo de aire y porcentaje de combustible ingresando a la cámara de combustión, gracias a esto se logra adaptar la caldera al proceso de generación de vapor.

- **Capacidad de producción de vapor nominal.**

La caldera de biomasa está en capacidad de producir 9.2 toneladas de vapor por hora, el variar los parámetros para que alcance producciones mayores podría resultar en el deterioro anticipado de la misma y reducción de su vida útil, sobrecalentamiento de superficies y mal funcionamiento del sistema de filtrado provocando emisiones visibles.

- **Modificaciones de seguridad.**

Se han realizado muchas modificaciones de seguridad solicitadas por el departamento de seguridad y salud ocupacional de Bridgestone, sistema de freno anti caída en las escaleras del silo de almacenamiento, colocación de mamparas de protección contra superficies calientes, colocación de protecciones en muñoneras donde el eje sobresalga más de 5 centímetros, rotulación sobre procedimiento de bloqueo y tarjeteo de los equipos, entre otros.

- **Carros recolección de ceniza, implementación de tornillos y silo.**

Actualmente el proceso de recolección de ceniza se realiza de manera manual mediante carros metálicos que atrapan la ceniza en la salida de los filtros, se pretende implementar un sistema de tornillos sin fin automatizado para descargar la ceniza recolectada fuera del cuarto de calderas hacia un silo de almacenamiento para su posterior traslado.

Capítulo 7 . Anexos

Anexo 1. Diagrama de Moody para la determinación del factor de fricción de flujo en tuberías, tomado de L.F. Moody, Trans ASME, vol. 66, 1944.

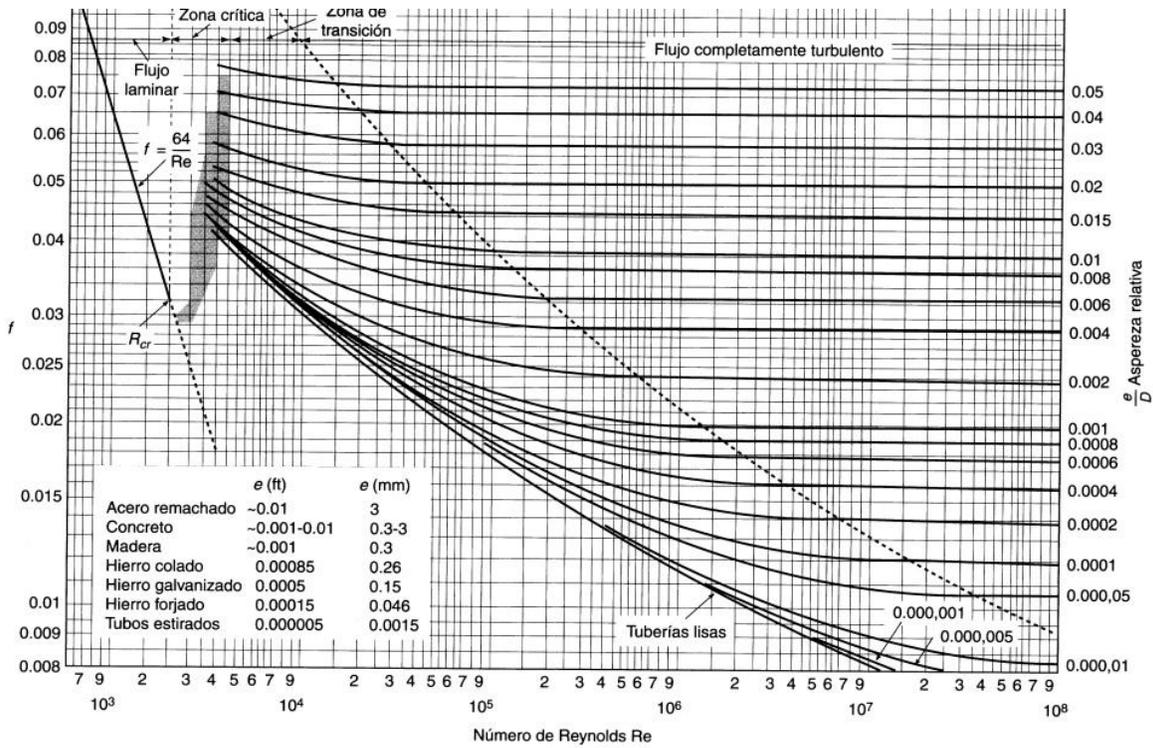


Diagrama de Moody. (De L.F. Moody, *Trans. ASME*, vol. 66, 1944.)

Anexo 2. Tabla de longitud equivalente por accesorios en tuberías, tomado de www.ingemecanica.com

Longitud equivalente de tubería en metros												
Componentes	Diagrama	Diámetro interior de tubería en mm (d)										
		25	40	50	80	100	125	200	250	300	400	
Válvula de bola abierta 100%		0.3 5	0.5 8	0.6 10	1.0 16	1.3 20	1.6 25	1.9 30	2.6 40	3.2 50	3.9 60	5.2 80
Válv. diafragma abierta 100%		1.5	2.5	3.0	4.5	6	8	10	-	-	-	-
Válv. angular abierta 100%		4	6	7	12	15	18	22	30	36	-	-
Válvula de globo		7.5	12	15	24	30	36	45	60	-	-	-
Válvula antirretorno de clapeta		2.0	3.2	4.0	6.4	8.0	10	12	16	20	24	32
Codo R=2d		0.3	0.5	0.6	1.0	1.2	1.5	1.8	2.4	3.0	3.6	4.8
Codo R=d		0.4	0.6	0.8	1.3	1.6	2.0	2.4	3.2	4.0	4.8	6.4
Ángulo 90°		1.5	2.4	3.0	4.5	6.0	7.5	9	12	15	18	24
T, salida en línea		0.3	0.4	1.0	1.6	2.0	2.5	3	4	5	6	8
T, salida angular		1.5	2.4	3.0	4.8	6.0	7.5	9	12	16	18	24
Reductor		0.5	0.7	1.0	2.0	2.6	3.1	3.6	4.8	6.0	7.2	9.8

Anexo 3. Preguntas y respuestas frecuentes, tomado de documentación proporcionada por Eco Solutions.

A continuación se detallan algunas de las preguntas y respuestas más comunes acerca del uso de pellets como combustible.

¿Que son pellets?

Los pellets es combustible hecho a base de desechos de madera y agrícolas. En Costa Rica anualmente se desechan alrededor de 400,000.00 toneladas de madera, los cuales se pueden convertir en pellets para substituir los combustibles fósiles tales búnker, diesel, gas LPG y Gas Natural. Adicional a este desperdicio, se pueden procesar plantaciones de ciclo corto, así como desechos agrícolas.

¿Por qué pellets?

El pellet es la biomasa con el menor % de humedad y la mayor densidad, con lo cual se obtiene la mayor capacidad calorífica, las mejores emisiones al medio ambiente y el menor % de ceniza en relación al resto de tipos de biomasa (astilla, leña, cascarilla de arroz, cascarilla de café, etc.).

¿Reduce las emisiones de CO2?

El pellet hecho a base de desechos de madera, es considerado carbono neutral; ya que durante la vida del árbol se absorbió la misma cantidad de CO2 que la cantidad producida al quemar este combustible. La ventaja del pellet que ofrece ECO Solutions, es que se produce localmente en Costa Rica por lo que el componente de transporte es el menor posible.

Por ejemplo con el Gas Natural, el cual presenta las menores emisiones entre los combustible fósiles; solo se reduce solamente un 30% del CO2 mientras que con los pellets reducimos el 100%.

¿Ayuda a reciclar y reutilizar?

Debido a que los pellets son producidos por desechos de madera y agrícolas, ayuda a reciclar y reutilizar todos los desperdicios que actualmente se dejan al aire libre en fincas, en vertederos o lechos de los ríos. No solo se recicla si no que se reducen los gases de efecto invernadero, ya que todos esos desperdicios orgánicos producen gas metano al descomponerse.

¿Cuánto ahorro hay en relación a combustible fósiles?

Con respecto al búnker hay un ahorro del 20%, con respecto al GAS LPG hay un 30% y con respecto al diesel hay un 50%.

Con respecto al gas natural importado se estima hay un ahorro del 10%, sin tomar en cuenta los impuestos que el gobierno le aplique al producto; con lo cual aumentaría el ahorro probablemente entre un 15% a un 20%.

¿El pellet paga impuestos?

No. Este producto está exento de impuestos por parte del Gobierno a diferencia con todos los combustibles fósiles, incluido el Gas Natural.

¿Desde cuándo existe el mercado de la biomasa?

El mercado industrial/comercial de la biomasa cuenta con más de 100 años en Europa y más de 50 años en países como Estados Unidos y Canadá.

En Centroamérica se conocía en aplicaciones como los ingenios, los cuales utilizan el bagazo para sus calderas o en aplicaciones con leña.

En Costa Rica, el pellet producido localmente; existe hace más de 2 años.

El mercado a nivel mundial cuenta con un crecimiento anual del 25%, siendo Estados Unidos, Canadá y Europa los mayores productores.

¿En Costa Rica hay suministro de pellets?

Correcto. La fábrica se encuentra en Muelle de San Carlos y es parte de un proyecto que contempla 3 fábricas más para poder abastecer todo el mercado Nacional.

¿Hay suficiente materia prima para producir pellets?

Si. Actualmente se está procesando únicamente un 10% del total del mercado que se puede procesar. Adicionalmente, se pueden producir pellets por medio de plantaciones de ciclo corto que nos darían hasta 2 cosechas por año.

¿Este proyecto cuenta con respaldo de instituciones Gubernamentales?

Si claro. Entidades como FONAFIFO, Oficina Nacional Forestal y la Cámara Costarricense Forestal, entre otras apoyan y respaldan este proyecto.

Anexo 4. Información técnica de la caldera, tomada de documentación proporcionada por Eco Solutions.

3.3. Technical data of the components



Boiler type	:	JH-HD	-
Medium	:	Saturated steam	
Maximum power	:	6	MW
Maximum steam flow	:	9.2	tph
Feed water temperature	:	105	°C
Operating pressure outlet boiler	:	18	barg
Efficiency of boiler with economizer	:	88	%*

All data will be confirmed after detailed engineering.

* Guaranteed efficiency : 88% +/- 2% calculated at LHV of 16500 Kj/kg & 105°C feeding water temperature.

Anexo 5. Tabla de propiedades termodinámicas del agua por temperatura, tomada de (Yunus Cengel, 2009)

TABLA A-4

Agua saturada. Tabla de temperaturas

Temp., T °C	Pres. sat., P _{sat} kPa	Volumen específico, m ³ /kg		Energía interna, kJ/kg			Entalpía, kJ/kg			Entropía, kJ/kg · K		
		Liq. sat., v _f	Vapor sat., v _g	Liq. sat., u _f	Evap., u _{fg}	Vapor sat., u _g	Liq. sat., h _f	Evap., h _{fg}	Vapor sat., h _g	Liq. sat., s _f	Evap., s _{fg}	Vapor sat., s _g
0.01	0.6117	0.001000	206.00	0.000	2374.9	2374.9	0.001	2500.9	2500.9	0.0000	9.1556	9.1556
5	0.8725	0.001000	147.03	21.019	2360.8	2381.8	21.020	2489.1	2510.1	0.0763	8.9487	9.0249
10	1.2281	0.001000	106.32	42.020	2346.6	2388.7	42.022	2477.2	2519.2	0.1511	8.7488	8.8999
15	1.7057	0.001001	77.885	62.980	2332.5	2395.5	62.982	2465.4	2528.3	0.2245	8.5559	8.7803
20	2.3392	0.001002	57.762	83.913	2318.4	2402.3	83.915	2453.5	2537.4	0.2965	8.3696	8.6661
25	3.1698	0.001003	43.340	104.83	2304.3	2409.1	104.83	2441.7	2546.5	0.3672	8.1895	8.5567
30	4.2469	0.001004	32.879	125.73	2290.2	2415.9	125.74	2429.8	2555.6	0.4368	8.0152	8.4520
35	5.6291	0.001006	25.205	146.63	2276.0	2422.7	146.64	2417.9	2564.6	0.5051	7.8466	8.3517
40	7.3851	0.001008	19.515	167.53	2261.9	2429.4	167.53	2406.0	2573.5	0.5724	7.6832	8.2556
45	9.5953	0.001010	15.251	188.43	2247.7	2436.1	188.44	2394.0	2582.4	0.6386	7.5247	8.1633
50	12.352	0.001012	12.026	209.33	2233.4	2442.7	209.34	2382.0	2591.3	0.7038	7.3710	8.0748
55	15.763	0.001015	9.5639	230.24	2219.1	2449.3	230.26	2369.8	2600.1	0.7680	7.2218	7.9898
60	19.947	0.001017	7.6670	251.16	2204.7	2455.9	251.18	2357.7	2608.8	0.8313	7.0769	7.9082
65	25.043	0.001020	6.1935	272.09	2190.3	2462.4	272.12	2345.4	2617.5	0.8937	6.9360	7.8296
70	31.202	0.001023	5.0396	293.04	2175.8	2468.9	293.07	2333.0	2626.1	0.9551	6.7989	7.7540
75	38.597	0.001026	4.1291	313.99	2161.3	2475.3	314.03	2320.6	2634.6	1.0158	6.6655	7.6812
80	47.416	0.001029	3.4053	334.97	2146.6	2481.6	335.02	2308.0	2643.0	1.0756	6.5355	7.6111
85	57.868	0.001032	2.8261	355.96	2131.9	2487.8	356.02	2295.3	2651.4	1.1346	6.4089	7.5435
90	70.183	0.001036	2.3593	376.97	2117.0	2494.0	377.04	2282.5	2659.6	1.1929	6.2853	7.4782
95	84.609	0.001040	1.9808	398.00	2102.0	2500.1	398.09	2269.6	2667.6	1.2504	6.1647	7.4151
100	101.42	0.001043	1.6720	419.06	2087.0	2506.0	419.17	2256.4	2675.6	1.3072	6.0470	7.3542
105	120.90	0.001047	1.4186	440.15	2071.8	2511.9	440.28	2243.1	2683.4	1.3634	5.9319	7.2952
110	143.38	0.001052	1.2094	461.27	2056.4	2517.7	461.42	2229.7	2691.1	1.4188	5.8193	7.2382
115	169.18	0.001056	1.0360	482.42	2040.9	2523.3	482.59	2216.0	2698.6	1.4737	5.7092	7.1829
120	198.67	0.001060	0.89133	503.60	2025.3	2528.9	503.81	2202.1	2706.0	1.5279	5.6013	7.1292
125	232.23	0.001065	0.77012	524.83	2009.5	2534.3	525.07	2188.1	2713.1	1.5816	5.4956	7.0771
130	270.28	0.001070	0.66808	546.10	1993.4	2539.5	546.38	2173.7	2720.1	1.6346	5.3919	7.0265
135	313.22	0.001075	0.58179	567.41	1977.3	2544.7	567.75	2159.1	2726.9	1.6872	5.2901	6.9773
140	361.53	0.001080	0.50850	588.77	1960.9	2549.6	589.16	2144.3	2733.5	1.7392	5.1901	6.9294
145	415.68	0.001085	0.44600	610.19	1944.2	2554.4	610.64	2129.2	2739.8	1.7908	5.0919	6.8827
150	476.16	0.001091	0.39248	631.66	1927.4	2559.1	632.18	2113.8	2745.9	1.8418	4.9953	6.8371
155	543.49	0.001096	0.34648	653.19	1910.3	2563.5	653.79	2098.0	2751.8	1.8924	4.9002	6.7927
160	618.23	0.001102	0.30680	674.79	1893.0	2567.8	675.47	2082.0	2757.5	1.9426	4.8066	6.7492
165	700.93	0.001108	0.27244	696.46	1875.4	2571.9	697.24	2065.6	2762.8	1.9923	4.7143	6.7067
170	792.18	0.001114	0.24260	718.20	1857.5	2575.7	719.08	2048.8	2767.9	2.0417	4.6233	6.6650
175	892.60	0.001121	0.21659	740.02	1839.4	2579.4	741.02	2031.7	2772.7	2.0906	4.5335	6.6242
180	1002.8	0.001127	0.19384	761.92	1820.9	2582.8	763.05	2014.2	2777.2	2.1392	4.4448	6.5841
185	1123.5	0.001134	0.17390	783.91	1802.1	2586.0	785.19	1996.2	2781.4	2.1875	4.3572	6.5447
190	1255.2	0.001141	0.15636	806.00	1783.0	2589.0	807.43	1977.9	2785.3	2.2355	4.2705	6.5059
195	1398.8	0.001149	0.14089	828.18	1763.6	2591.7	829.78	1959.0	2788.8	2.2831	4.1847	6.4678
200	1554.9	0.001157	0.12721	850.46	1743.7	2594.2	852.26	1939.8	2792.0	2.3305	4.0997	6.4302

Anexo 6. Resultados del mes de septiembre para el proyecto de sustitución, tomado del departamento de casa de fuerza de Bridgestone.

Caldera	Vapor Generado	Energía	Energía
Caldera01	1.128.520 Kg	3.150.827.840 kJ	2.984.105,85 MBtu
Caldera02	2.552.232,5 Kg	7.125.833.140 kJ	6.748.778,86 MBtu
Caldera03	3.351.798 Kg	9.358.220.016 kJ	8.863.041,87 MBtu
Total	7.032,55 ton	19.634,88 GJ	18.595.926,58 MBtu
Sustitución			36,29 %
CO2 evitado			662,77 TCO2e

Análisis de costos

Costo de producir solo con bunker	239.111.083,99 colones
Costo de producción mixto	215.400.626,91 colones
Ahorro	23.710.457,08 colones
Porcentaje de Ahorro	9,92 %

Control Cruzado de Consumo

Consumo de Bunker (Teórico)	385.303,51 litros
Consumo de Bunker(Real)	353.273,36 litros
Consumo de Pellet (Teórico)	426.186,19 kg
Consumo de Pellet (Real)	453.962 kg

Para este análisis en el caso del costo de producción solo con bunker se toma el valor del total de vapor producido y su energía correspondiente, tomando en cuenta las eficiencias de las calderas se determina la cantidad de combustible bunker asociada a esa cantidad de energía y se calcula su costo, para el costo de producción mixto se incluye el precio del pellet y la cantidad de combustible gastado haciendo la suma del aporte de vapor por parte de la biomasa y por parte del bunker por separado.

Para el control cruzado se calcula teóricamente la cantidad de combustible asociada a la cantidad de energía producida y se compara con los datos de consumo reales.

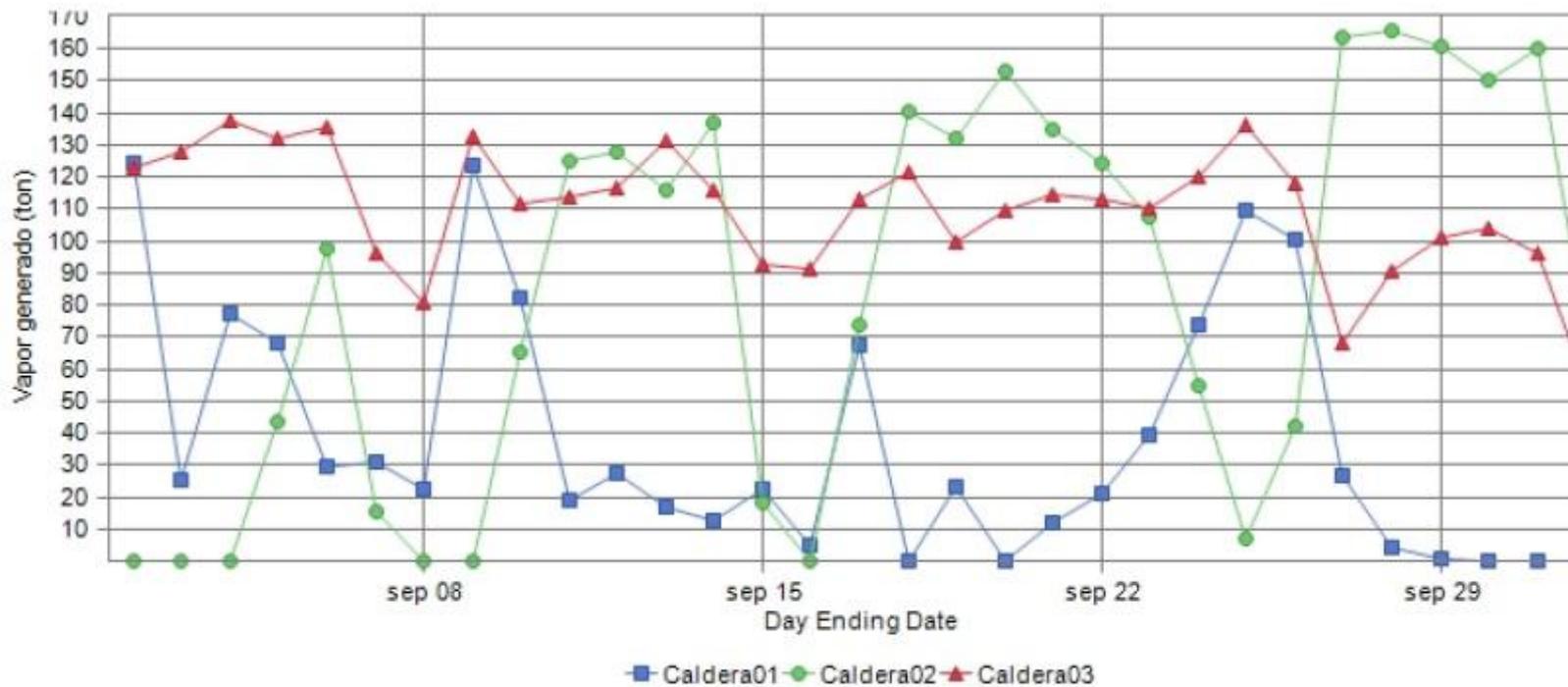
El bajo porcentaje de sustitución de vapor así como de ahorro se deben a que estas mediciones se realizaron durante el periodo de puesta en marcha y estabilización de la caldera por lo cual se dieron muchas paradas por fallas y por malos funcionamientos de los equipos.

Anexo 7. Gráfico de generación de vapor de las calderas de Bridgestone para el mes de setiembre, tomado del departamento de casa de fuerza de Bridgestone.

Vapor Generado

01/09/2014 6:00 to 01/10/2014 6:00

Time Zone: (UTC-06:00) América Central



Anexo 8. Resultados del proyecto de sustitución para la primera semana del mes de octubre, tomado del departamento de casa de fuerza de Bridgestone.

Caldera	Vapor Generado	Energía	Energía
Caldera01	120.712 Kg	337.027.904 kJ	319.194,51 MBtu
Caldera02	1.446.220 Kg	4.037.846.240 kJ	3.824.188,81 MBtu
Caldera03	805.917 Kg	2.250.120.264 kJ	2.131.058,05 MBtu
Total	2.372,85 ton	6.624,99 GJ	6.274.441,37 MBtu
Sustitución			60,95 %
CO2 evitado			375,56 TCO2e

Análisis de costos

Costo de producir solo con bunker	80.678.339,46 colones
Costo de producción mixto	67.242.832,61 colones
Ahorro	13.435.506,85 colones
Porcentaje de Ahorro	16,65 %

Como se observa en la imagen se obtienen mejores porcentaje de sustitución de vapor así como de ahorro para el periodo de tiempo en estudio, para el momento de la toma de datos la caldera se encuentra en una etapa de estabilización en donde las paradas del equipo y el tiempo que se ha detenido la producción de vapor se han reducido al mínimo posible.

Se ha superado el porcentaje de sustitución esperado de entre el 40-50% del consumo de vapor de la planta y se está muy cerca de llegar al valor de 20% de ahorro proyectado, resta hacer la comparación de los resultados del mes de octubre en su totalidad para determinar el cumplimiento de las metas propuestas teóricamente.