



Universidad del Bío-Bío
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería en Maderas
Escuela Ingeniería Civil Química



ESTUDIO Y MODELACIÓN DE LA MEZCLA DE BIOMASA Y VARIABLES DE PROCESOS PARA LA PRODUCCIÓN DE VAPOR EN LA PLANTA ENERGÍA PACÍFICO S.A.

Informe de Habilitación Profesional presentado en conformidad a los requisitos
para obtener el título de Ingeniero Civil Químico

JAVIER IGNACIO AGUAYO SANHUEZA

Profesor Tutor: Dr. Serguei Alejandro Martin.

Ingeniero Supervisor: Lester Merino S.

Concepción, 21 de agosto de 2020.

RESUMEN

El control de las variables de proceso en la combustión de la biomasa para la generación de energía, constituye un asunto de interés desde el punto de vista del rendimiento de la biomasa y la estabilidad en la generación de la energía. Es por ello que es de suma importancia establecer las variables que afectan significativamente al proceso. Diversos estudios se realizan al momento de diseñar una planta para la generación de energía con biomasa, con el fin de que esta funcione de manera óptima. Sin embargo, la falta de control de ciertas variables, como la humedad de la biomasa, densidad aparente, temperatura ambiente entre otros, hace imposible que se obtengan los mismos resultados de diseño.

El presente trabajo de Habilitación Profesional se centra en estudiar la influencia de las variables de proceso, como también la influencia de las proporciones en la cual se mezcla la biomasa, ya que, la empresa Energía Pacífico S.A. utiliza una mezcla de diversas biomásas para combustionar. Esta influencia obtenida con el Análisis de Varianza (ANOVA, por sus siglas en inglés) da paso a la generación de modelos que predice el vapor neto con la mezcla de biomasa y las variables de proceso, todo realizado con la base de datos de la empresa de dos años (2018 y 2019). También se procedió a dividir la base de datos en dos períodos (Período 1; otoño-invierno, Período 2; primavera-verano), para evitar que las estaciones climáticas afecten el estudio estadístico. Posteriormente con una iteración de la influencia entre el modelo de variables de proceso y el modelo de mezcla, que maximice el Coeficiente de Determinación (R^2) se obtuvo el Modelo general para ambos períodos.

Finalmente se realizó una validación de los modelos generales obtenidos, con datos reales de la empresa. Esta validación tiene como fin demostrar de manera empírica la predicción del modelo, ya que, no se utilizaron ecuaciones de ningún tipo. Los modelos se obtuvieron con ajustes lineales y cuadráticos. El modelo general del Período 1 obtuvo un R^2 de 99,51 % y el modelo general Período 2 con un valor de 97,57 %, con errores promedios de 2,42% y 1,38% para los Períodos 1 y 2 respectivamente.

AGRADECIMIENTOS

Agradecer en primer lugar a mi familia, por su apoyo incondicional durante todo mi proceso de formación como Ingeniero, fueron un pilar fundamental en los ámbitos, económico y emocional.

Por sobre todo a mi madre que siempre ha estado presente ante cualquier necesidad, valorando su esfuerzo a pesar de las adversidades.

También agradecer a mis amigos, Jorge y Felipe, que han sido un apoyo vital en todos los aspectos desde que los conocí y mayor aún durante mi formación profesional. Agradecer también a mi compañero y amigo Lucas, por el apoyo brindado en el transcurso de nuestra formación profesional, en donde nuestra amistad fue creciendo.

A la Empresa agradecer la oportunidad de poder desarrollar mi Habilitación Profesional, en especial a mi supervisor Don Lester Merino, por entregar la información necesaria para el desarrollo de este trabajo. Por último agradecer a mi profesor guía, Dr. Serguei Alejandro por guiarme en los aspectos técnicos del informe.

NOMENCLATURA

PC	Poder calorífico, kcal/kg.
PCS	Poder calorífico superior, kcal/kg.
PCI	Poder calorífico inferior, kcal/kg.
en	Es el valor medio de capacidad calorífica efectiva del calorímetro, J/K.
m_1	Es la masa de la muestra de combustible, en gramos.
m_2	Es la masa del coayudante de la combustión, en gramos.
$w(H)_d$	Es el contenido de hidrógeno, en porcentaje de la masa del biocombustible sin humedad.
$w(O)_d$	Es el contenido de oxígeno, en porcentaje de la masa del biocombustible sin humedad.
$w(N)_d$	Es el contenido de nitrógeno, en porcentaje de la masa del biocombustible sin humedad.
Q_{fuse}	Es la contribución de calor de la combustión de la mezcla, J.
Q_{ign}	Es la contribución de calor de la oxidación del hilo de ignición, J.
Q_n	Es la contribución de calor de la formación del ácido nítrico, J.
x_{ur}	Fracción másica de Astilla Urbana.
x_{se}	Fracción másica de Astilla Seca.
x_{vi}	Fracción másica de la Viruta Polín.
x_{ch}	Fracción másica de Chips.
x_{as}	Fracción másica de Aserrín.
x_{co}	Fracción másica de Corteza.
x_{cor}	Fracción másica de Coronta.
x_{lo}	Fracción másica de Lodo.
x_{nu}	Fracción másica de Cascara de Nuez.
x_{ca}	Fracción másica de Carozos.
x_{ag}	Fracción másica de Chips Agrícola.

Tabla de Contenidos

RESUMEN	i
AGRADECIMIENTOS	ii
NOMENCLATURA	iii
1. INTRODUCCION	8
2. PLANTAMIENTO SITUACION PROBLEMA	9
3. ASPECTOS GENERALES DEL PROCESO	11
3.1 Almacenamiento y mezclado de biomasas	11
3.1 Descripción general del proceso de combustión de la caldera (Biochamm BGV 90.000)	12
4. REVISION BIBLIOGRAFICA	17
4.1 Tipos y propiedades de las biomasas	17
4.1.1 Tipos de biomasas.....	17
4.1.2 Composición elemental de la biomasa	18
4.1.3 Humedad	18
4.1.4 Poder calorífico.....	19
4.1.5 Densidad aparente.....	22
4.2 Antecedentes de la combustión de biomasa	23
4.2.1 Influencia de factores físico-químicos en la combustión de biomasa	23
4.2.2 Alcances del modelamiento para procesos de combustión de biomasa	24
5. OBJETIVOS	27
5.1 Objetivo general	27
5.2 Objetivos específicos	27
6. METODOLOGIA	28
6.1 Pre-tratamiento de los datos	28
6.2 Ajuste de modelo lineal de mezcla para la producción de Vapor.....	28
6.3 Ajuste de modelo de las variables de proceso para la producción de Vapor.....	29
6.4 Modelamiento general.	29
6.5 Validación del modelo obtenido.....	29
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	30

7.1	Ajuste de modelo lineal a la mezcla (Período 1 y 2)	30
7.2	Ajuste de modelo de las variables de proceso	33
7.3	Modelamiento General.....	36
8.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	42
8.1	Conclusiones	42
8.2	Recomendaciones	43
9.	REFERENCIAS	44
10.	ANEXOS	46

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Promedio mensual de vapor generado el año 2019 (Elaboración propia).	9
Tabla 2. Tipos de biomosas utilizadas para la generación de energía.	17
Tabla 3. Composición elemental, propiedades físicas y poder calorífico de las biomosas.	18
Tabla 4. Porcentaje contenido de humedad en residuos.	19
Tabla 5. Contenido de humedad y Poder calorífico de biomosas (estudio 1).	20
Tabla 6. Contenido de humedad y Poder calorífico de biomosas (estudio 2).	21
Tabla 7. Comparación del valor predicho con el valor experimental del calor de transferencia por radiación.	25
Tabla 8. Parámetros del modelo de mezcla Período 1.	30
Tabla 9. Análisis de Varianza modelo de mezcla Período 1.	30
Tabla 10. Parámetros del modelo de mezcla Período 2.	31
Tabla 11. Análisis de Varianza modelo de mezcla Período 2.	32
Tabla 12. Parámetros del modelo de variables de proceso Período 1.	33
Tabla 13. Parámetros del modelo de variables de proceso Período 2.	33
Tabla 14. Análisis de Varianza de modelo de variables de proceso Período 1.	34
Tabla 15. Análisis de Varianza de modelo de variables de proceso Período 2.	34
Tabla 16. Contribución de cada modelo al Modelo General Período 1.	36
Tabla 17. Contribución de cada modelo al Modelo General Período 2.	36
Tabla 18. Validación del Modelo general Período 1.	37
Tabla 19. Validación del Modelo general Período 2.	37
Tabla 20. Rango de operación de variables para el Modelo general Período 1.	38
Tabla 21. Rango de operación de variables para el Modelo general Período 2.	38

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Layout de Calles de biomasa (Fuente: EPSA).	11
Figura 2. Esquema general del proceso de generación de vapor.	12
Figura 3. Silo de alimentación Caldera.	12
Figura 4. Vista superior de parrilla de Caldera. a) secado biomasa, b) gasificación, c) combustión y d) ceniza y escoria.	13
Figura 5. Resumen circuito de gases de combustión.....	15
Figura 6. Resumen Circuito agua y vapores.	16
Figura 7. Típicas densidades aparentes de biomasa no procesada (Clarke, 2011).	22
Figura 8. Supuestos del modelo de mezcla para el Período 1; a) normalidad, b) varianza constante, c) independencia.	31
Figura 9. Supuestos del modelo de mezcla para el Período 2; a) normalidad, b) varianza constante, c) independencia.	33
Figura 10. Supuestos del modelo variables de proceso; a) normalidad, b) varianza constante, c) independencia, (Período 1).	35
Figura 11. Supuestos del modelo variables de proceso; a) normalidad, b) varianza constante, c) independencia, (Período 2).	35
Figura 12. Grafica de dispersión de Valor Predicho vs. Valor Real Modelo general Período 1. ..	40
Figura 13. Grafica de dispersión de Valor Predicho vs. Valor Real Modelo general Período 2. ..	40
Figura 14. Relación entre valores simulados (z_1) y los valores observados (y_1) para un modelo sin sesgo. $y=z$ es la recta que representa la exactitud ideal (Medina & Vargas, 2010).....	41

1. INTRODUCCION

La Planta Energía Pacífico S.A. (EPSA) ubicada en San Francisco de Mostazal en la VI Región, pertenece al grupo de Empresas Coipasa y con otras empresas participan en todo el ciclo de residuos del sector agrícola, residuos de madera de la zona central de Chile y podas urbanas, desde la recolección de los residuos hasta su transformación en productos de envase de cartón corrugado y generación de energía, evitando una disposición final en un lugar donde no genere más que una alteración al ecosistema. Así Energía Pacífico produce energía eléctrica renovable no convencional y de esta forma se reducen las emisiones de CO₂ con respecto a las emisiones generadas por la combustión de carbón y combustibles fósiles.

La principal demanda de energía eléctrica y vapor de proceso, es generada por la Compañía Papelera Pacífico (CPP), la cual está conjunta a EPSA. CPP, utiliza vapor para el proceso de secado de fibras recicladas y la energía eléctrica para el funcionamiento de los equipos. La energía no utilizada es vendida al Sistema Eléctrico Nacional (SEN). La demanda de vapor considerada para producir 15,6 MW/h es de 82 ton/h y además entregan un estimado de 45 ton/h de vapor a CPP.

La empresa está en constante búsqueda de mejoras al proceso de generación de energía, con el fin de obtener una mayor eficiencia en la combustión del combustible orgánico utilizado, lo que conlleva una serie de estudios de diferentes factores que tienen un impacto significativo, algunos de estos estudios están enfocados en la forma de alimentación de combustible, exceso de oxígeno (flujo de aire primario), distribución de la biomasa sobre la parrilla de combustión entre otros.

En este trabajo se inicia con el planteamiento del problema, destacando los puntos principales del problema señalado, posteriormente se señalan los aspectos teóricos del proceso y una revisión bibliográfica enfocada a lo pertinente del problema expuesto. El objetivo general y los objetivos específicos generan actividades claves para el desarrollo del estudio. En la metodología se describe detalladamente el procedimiento de cada actividad a realizar, con el fin de cumplir adecuadamente con los objetivos planteados. Finalmente se presentan los resultados obtenidos con sus respectivas discusiones, dando paso a las conclusiones y recomendaciones para la empresa.

2. PLANTAMIENTO SITUACION PROBLEMA

En la generación de energía de la Planta Energía Pacífico S. A., se observa una variabilidad diaria en su producción, mostrada por la generación de vapor neto reportado. La principal causa que produce esta inestabilidad son las variables de proceso y las distintas proporciones de biomásas que alimentan a la caldera, dentro de estas variables existen unas más críticas o significativas para el proceso.

EPSA utiliza una mezcla de biomasa, provenientes de diversos sectores industriales e incluso residuos originados en el sector agrícola, provocando una variación significativa en los factores que están involucrados en la producción de energía, tales como la humedad, densidad aparente, poder calorífico entre otros.

La identificación de las variables críticas del proceso es clave para mejorar la estabilidad del proceso, junto con esto contribuir a una mayor eficiencia en el uso de la biomasa utilizada en la generación de vapor.

Establecer un modelo estadístico que prediga una variable de respuesta (producción de vapor en ton/día) aportará a un mejor desempeño de la planta de generación de energía. La capacidad máxima de producción diaria de la planta de vapor es de 2160 toneladas, pero como se muestra en la Tabla 1, ningún valor promedio alcanza la capacidad permitida.

Tabla 1. Promedio mensual de vapor generado el año 2019 (Elaboración propia).

Mes	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
Vapor ton/día	1741,98	1802,25	1878,15	1784,64	1767,41	1698,2
Mes	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Vapor ton/día	1689,78	1737,26	1670,29	1805,66	1789,57	1775,47

Con un modelo se podrían realizar pruebas con el fin de acercarse al valor nominal mencionado. También se podría maximizar, pero existiría el caso en el que aparezcan variables no controlables, por lo que no sería posible establecer condiciones óptimas para la generación de vapor.

3. ASPECTOS GENERALES DEL PROCESO

3.1 Almacenamiento y mezclado de biomásas

La biomasa adquirida por los distintos proveedores es descargada y almacenada en sus respectivas canchas de acopio, para posteriormente ser mezclada en las proporciones que se le indiquen al operador de terreno.

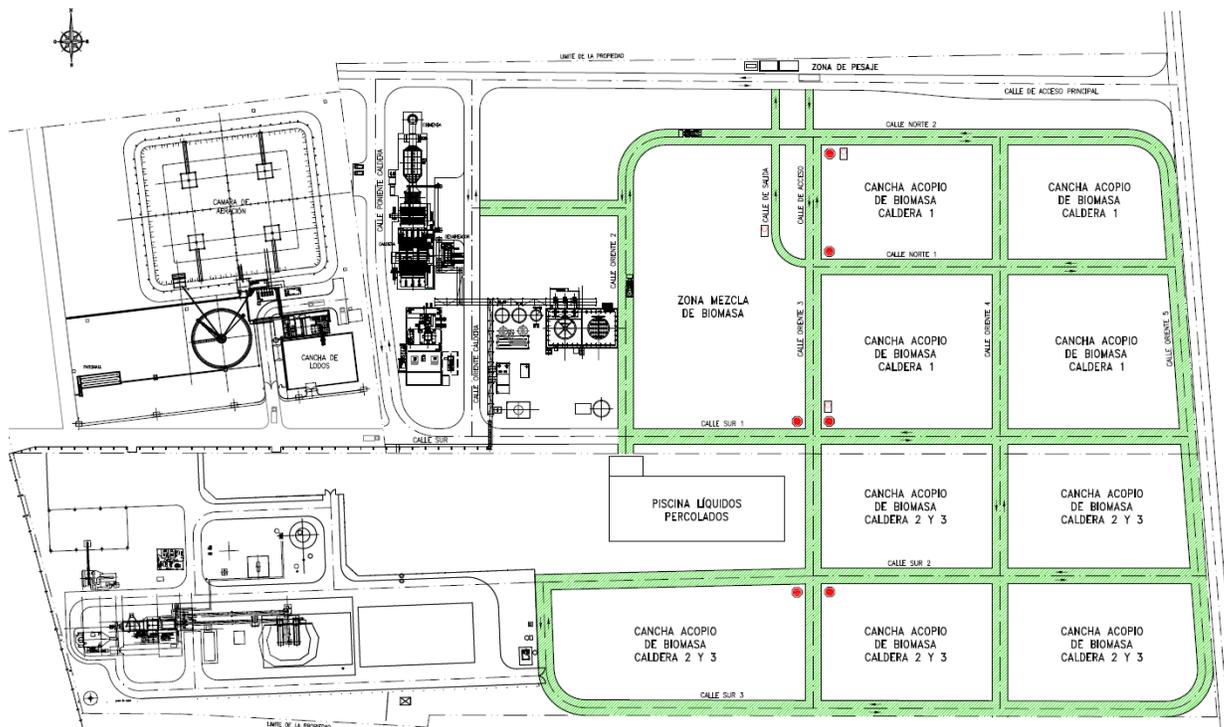


Figura 1. Layout de Calles de biomasa (Fuente: EPSA).

La Zona de Mezcla indicada en la Figura 1, es dividida en dos partes, en una de ellas se prepara la mezcla de biomásas y en la otra se tiene acopiada una mezcla ya preparada, de la cual es alimentada la caldera. Cada mezcla realizada es de aproximadamente de 1000 m^3 , esta mezcla es llevada por cargadores frontales hacia las rastras y posteriormente a las cintas de transporte (cinta 1 y 2), la cinta 2 cuenta con una trampa de materiales sólidos como, piedras, metales, plásticos entre otros.

Todas las Canchas de acopio de biomasa de la Caldera 1 poseen una carpeta de PEAD (Polietileno de Alta Densidad) con el propósito de evitar que líquidos percolados generados por la descomposición de la misma biomasa penetren napas subterráneas de agua.

3.1 Descripción general del proceso de combustión de la caldera (Biochamm BGV 90.000)

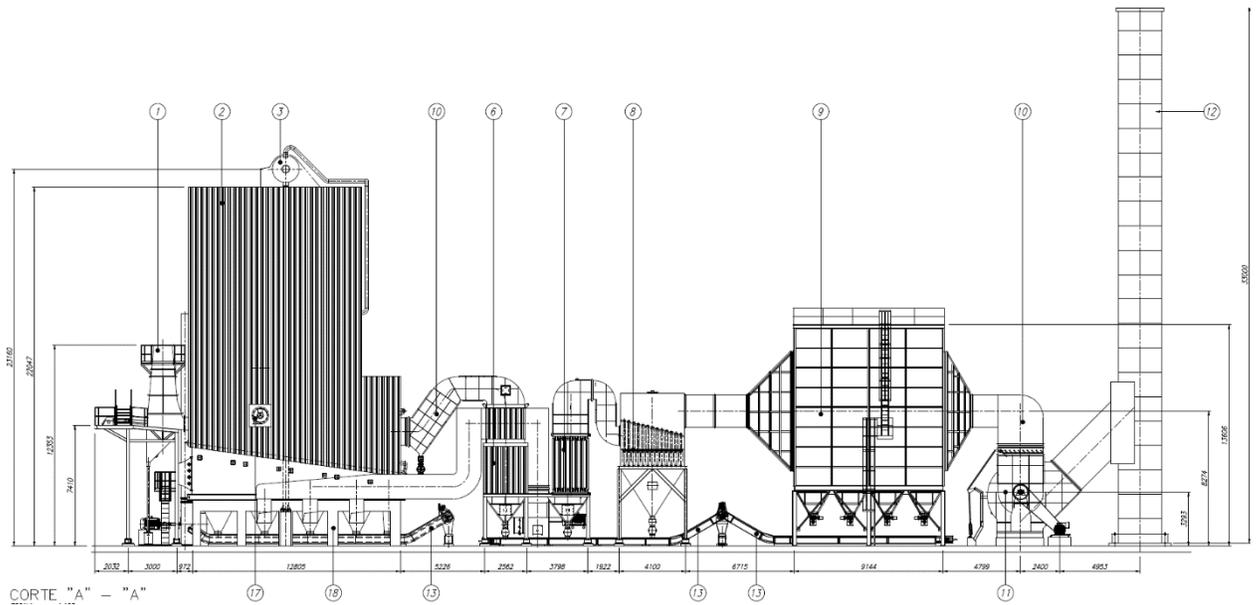


Figura 2. Esquema general del proceso de generación de vapor.

- Alimentación de biomasa

En la Figura 2, el equipo 1 es el Silo de alimentación que es suministrado de biomasa con la cintra de transporte 2. En la Figura 4 se muestra a detalle la estructura de este equipo.

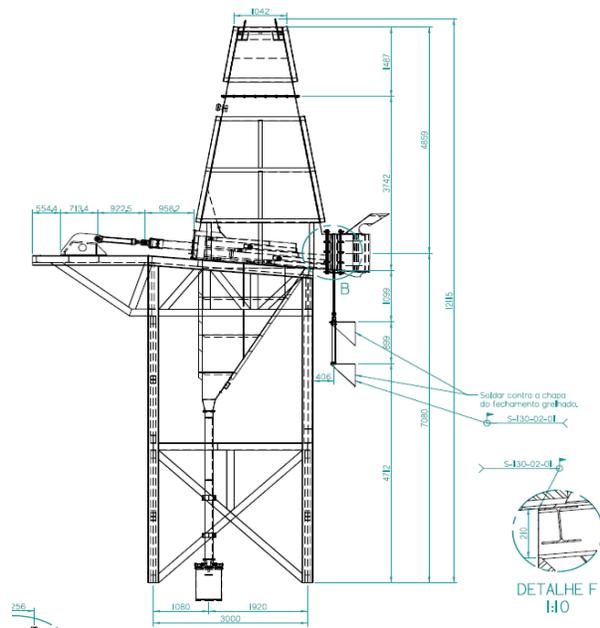


Figura 3. Silo de alimentación Caldera.

El Silo de alimentación tiene una capacidad de 60 m³ de biomasa, la cual es movida por 6 cilindros hidráulicos que están conectados a 5 bandejas con 3 de ellas móviles y de esta forma la mezcla de biomasa llega a la primera etapa de la caldera.

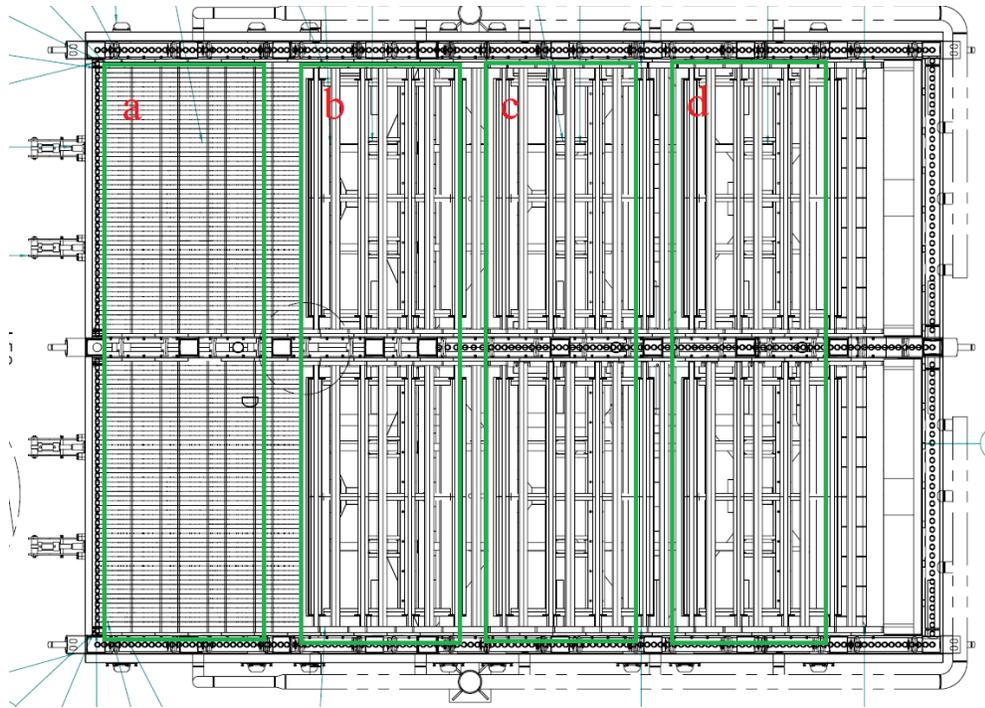


Figura 4. Vista superior de parrilla de Caldera. a) secado biomasa, b) gasificación, c) combustión y d) ceniza y escoria.

La parrilla esta compuesta por segmentos metalicos por los cuales se desplaza la biomasa en cada sección, a, b, c, y d, existen 8 filas y cada fila contiene 54 de estos segmentos.

- a) Secado biomasa: etapa en la cual se evapora el agua contenida en la biomasa (Parrilla 1).
- b) Gasificación: proceso termo-químico que transforma los compuestos orgánicos, en gases con mayor poder calorífico (Parrilla 2). (Rincón, Gómez, & Klose, 2011)
- c) Combustión: etapa en la cual se combustionan los gases y solidos presentes en esta región (Parrilla 3).
- d) Ceniza y escoria: esta etapa solo tranporta la ceniza y escoria generada en la combustión (Parrilla 4).

Las temperaturas del aire bajo las Parrillas son las siguientes;

Parrilla 1: 150 a 160°C.

Parrilla 2: 150 a 160°C.

Parrilla 3: 130 a 150°C.

Parrilla 4: 130 a 150°C.

Circuito de gases de combustión

Los gases se generan principalmente en las etapas b) y c) de la Figura 4, en primera instancia estos gases adquieren una temperatura 1300 a 1400°C (entiéndase que estos gases son de pre y post-combustión), ubicados en la zona inferior izquierda del equipo 2 de la Figura 2 y a medida que asciende estos alcanzan una temperatura de 800°C. La parte derecha del hogar de la Caldera está separada por una pared intermedia, por lo que permite el paso de los gases por el lado superior de izquierda a derecha y los mismo con la biomasa en zona inferior, esta pared intermedia es similar a las paredes de la Caldera, de tubo y membrana (paredes conformadas por tubos, pero separados entre sí, por placas metálicas), véase en Anexo 1. Los gases al ir descendiendo por el lado derecho de la Figura 2 en el equipo 2, comienza la disminución de temperatura, ya que, están presentes los serpentines del, sobre calentador primario y secundario, luego el pre-evaporador. A la salida de la Caldera los gases están a una temperatura de 350°C aproximadamente, estos gases pasan por un haz de tubos para calentar el aire primario a una temperatura entre 150 - 170°C en verano, y entre 135 - 145°C en invierno, seguido de esto pasa por los Economizadores 2 y 1 (equipo 6 y 7 respectivamente, Figura 2), continuando por un filtro de multiciclones (equipo 8 en la Figura 2), con el fin de retener las cenizas y escorias arrastras por la corriente de gases. Las partículas más pequeñas son finalmente retenidas por el precipitador electroestático, el cual cuenta con 2 campos eléctricos, compuestos por placas y electrodos suspendidos que generan un campo magnético que atrapan las partículas de cenizas ionizadas contenidas en los gases de combustión.

Estos gases son atraídos gracias al ventilador de tiro inducido (VTI), que genera una presión de vacío en el circuito de gases y el hogar de la caldera, equipo 11 de Figura 2. Finalmente, los gases son eliminados por una chimenea de 33 metros de altura a una temperatura de 160°C.

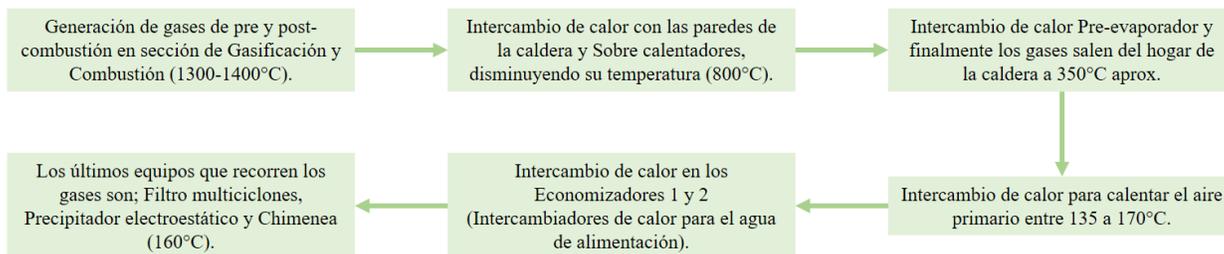


Figura 5. Resumen circuito de gases de combustión.

Circuito de agua y vapores

El agua que ingresa a la caldera es almacenada en los tanques de condesado y de planta Demi (Desmineralizadora de agua) e impulsados por una bomba centrífuga multi-etapas a una presión de 95 bar. Antes de ingresar a la Caldera el agua recorre el Economizador 1 y 2 (Intercambiadores de calor de tubo y carcasa), por dentro de un serpentín y por la carcasa los gases de combustión, con esto se logra que el agua ingrese a 190°C al Domo. La temperatura del agua de alimentación antes de los economizadores es de 130°C.

Cuando el agua sale del Economizador 2, se envía directamente al Domo (equipo 3 de la Figura 2), luego desciende por los DownComer (2 tuberías de 12 pulgadas, unas en lado poniente y otra por el lado oriente de la Caldera) en donde una fracción del agua se va al pre- evaporador que se encuentra dentro de la caldera (zona inferior derecha) y el resto a un colector bajo las rejillas de la caldera, el cual alimenta a los colectores inferiores de la caldera. Los colectores son tuberías que, en el caso del colector inferior, alimenta las tuberías de las paredes de la caldera y el colector del DownComer está ubicado de forma perpendicular al movimiento de la biomasa. El agua y vapor saturados son generados en las paredes y en el pre- evaporador, desde aquí enviados al colector superior y finalmente al Domo. El Domo es un recipiente de 11 metros de largo, con un diámetro de 1.7 metros, este opera con un 50% de agua saturada y el resto en vapor, que se envía a los sobrecalentadores primario y secundarios, en donde el vapor saturado a 280°C y 70 bar logra una temperatura de 480°C y 65 bar de presión, con estas condiciones es enviado directamente a la turbina generadora. Del vapor total que entra, el 56% se condensa en un intercambiador de calor de tubos y carcasa a la salida de la turbina generadora, el resto del vapor es enviado a la Planta Papelera conjunta a Energía Pacífico, como vapor de proceso.

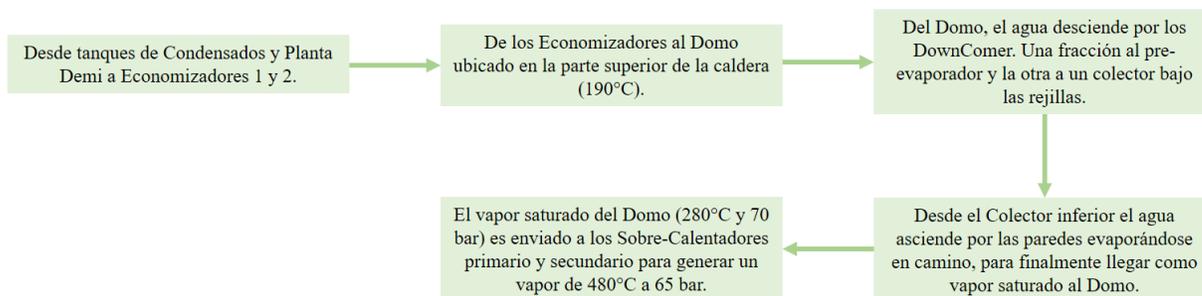


Figura 6. Resumen Circuito agua y vapores.

Toda la información con respecto al proceso de la empresa, fue entregada a través de reuniones con el supervisor, Don Lester Merino S. Además, la información fue complementada con isométricos y planos entregados por la empresa.

4. REVISION BIBLIOGRAFICA

4.1 Tipos y propiedades de las biomásas

4.1.1 Tipos de biomásas

“El aumento en la producción de energía ha causado un incremento considerable la emisión de gases de efecto invernadero, producidos por la combustión de combustibles fósiles y carbón mineral, de hecho la producción de CO₂ ha crecido de 4 millones de toneladas a más de 28 millones de toneladas por año en los últimos 60 años” (Esen & Yuksel, 2013). Debido a los altos niveles de CO₂ asociado al calentamiento global y el creciente costo de combustibles fósiles, surge la oportunidad de encontrar nuevas fuentes limpias y renovables de energía (Yilmaz & Selim, 2013).

La empresa EPSA, utiliza una amplia variedad de biomásas, el uso de estas depende de varios factores para realizar la mezcla que alimentará la caldera, algunos de los factores a considerar, son la oferta de los proveedores, como también la disponibilidad de stock en las canchas de acopio, otra variable es la estación climática en que se encuentra operando la empresa, ya que, esto varía de acuerdo a la cosecha de algunos productos agrícolas que generan residuos orgánicos sólidos.

Tabla 2. Tipos de biomásas utilizadas para la generación de energía.

ASTILLAS URBANAS
ASTILLAS SECAS
CHIPS
ASERRIN
VIRUTA POLIN
LODO
CORTEZA
CAROZO
CASCARA DE NUEZ
CORONTAS
CHIPS AGRÍCOLA

Fuente: Energía Pacífico S.A.

Generalmente la empresa utiliza, en mayor proporción, seis de las biomásas que se relacionan en la Tabla 2. Estas son; astillas urbanas, Astillas secas, chips, aserrín, corteza y chips agrícola.

4.1.2 Composición elemental de la biomasa

La composición elemental representa la masa en porcentaje de los distintos elementos que posee la composición química de los materiales.

Tabla 3. Composición elemental, propiedades físicas y poder calorífico de las biomasas.

Mat/Comp	Unidad	Astilla seca	Viruta polín	Aserrín	Coronta	Carozos	Cascara Nuez	Lodo
Humedad BH	%Bv	7,17	9,94	42,24	6,56	4,71	9,13	64,16
Humedad BS	%Bs	7,72	11,04	73,13	7,02	4,94	10,05	179,02
Cenizas	%	0,86	2,47	1,1	1,53	1,04	1,78	5,28
Azufre	%	0,03	0,02	0,02	0,04	0,07	0,02	0,14
PCS	Kcal/Kg	4,773	4,707	4,747	4,462	5,411	4,780	4,117
PCI	Kcal/Kg	4,463	4,403	4,436	4,157	5,067	4,479	3,804
Carbono	%	49,87	49,23	50,68	47,58	54,12	50,88	44,00
Hidrógeno	%	5,93	5,83	5,97	5,83	6,64	5,67	6,01
Cloro	%	0,01	0,11	0,01	0,29	0,11	0,11	0,01
Oxígeno teórico	%	43,3	42,34	42,22	44,73	38,02	41,54	44,56

La composición elemental es entregada por el proveedor Tirsa, en un catálogo de las biomasas que venden a EPSA. Esta composición elemental es útil al momento de calcular el poder calorífico teórico a cierta humedad utilizando la Ecuación 4.

4.1.3 Humedad

La humedad es la cantidad de agua que un cierto material posee y se expresa como un porcentaje del peso que tiene con respecto al peso seco del mismo. Estos materiales tienen la característica de ser higroscópicos, es decir, que tienen la capacidad de absorber agua del medio circundante, esto quiere decir que absorben la humedad del aire, por lo que su contenido de humedad está directamente relacionado con la humedad relativa (cantidad de agua en el aire en forma de vapor). Otro aspecto importante es el área superficial del combustible orgánico (biomasa), ya que, esto permite un mayor contacto con el medio (Wong & Villers, 2006).

Para la determinación del contenido de humedad de una muestra, se realiza un procedimiento básico de gravimetría. Para ello, una muestra de biomasa es secada en estufa a 105°C por un tiempo de 24 horas, transcurrido este tiempo se procede a llevar la muestra a un desecador para que se enfríen. La muestra es inicialmente pesada para conocer su masa húmeda.

Con estos valores, masa seca y húmeda (en gramos) se puede calcular el contenido de humedad, de acuerdo a la Ecuación 1.

$$\% \text{ Humedad} = \left(\frac{\text{peso muestra}_{\text{húmeda}} - \text{peso muestra}_{\text{seca}}}{\text{peso muestra}_{\text{húmeda}}} \right) * 100 \quad (\text{Ecuación 1})$$

Un estudio reportado por Garcés (2016), informó valores de contenido de humedad de residuos sólidos urbanos. En este trabajo informa la variabilidad que presentan los residuos que van desde el 2% hasta el 70% en contenido de humedad (Tabla 4).

Tabla 4. Porcentaje contenido de humedad en residuos.

Residuo	% Humedad
Materia orgánica	70
Papel	6
Cartón	5
Plásticos	2
Textiles	10
Madera	24
Vidrio	2

En el año 2011 EPSA solicitó a la empresa Proterm realizar una serie de estudios sobre la combustión de la biomasa en la caldera. Los resultados con respecto a la humedad presente en la biomasa, dieron un promedio de 42,5%, con un mínimo y máximo de 39,6 y 47,8% respectivamente (Donoso, 2011).

4.1.4 Poder calorífico

El poder calorífico es la energía liberada en forma de calor por un kilogramo de combustible quemado a ciertas condiciones de presión y temperatura. El poder calorífico es el valor absoluto de la entalpía en otras palabras (Ecuación 2).

$$PC = \left| \frac{Q}{m} \right| \quad (\text{Ecuación 2})$$

Poder calorífico superior PCS o HHV por sus siglas en inglés, es aquel desprendido al final de la combustión, cuando el agua del producto se encuentra en fase líquida. PCS es representado en la Ecuación 3.

$$PCS = \frac{e_n \cdot \theta - Q_{fuse} - Q_{ign} - Q_N - m_2 \cdot q_{v2}}{m_1} - \frac{Q_s}{m_1} \quad \text{(Ecuación 3)}$$

Poder calorífico inferior PCI o LHV por sus siglas en inglés, es aquel que se encuentra cuando el agua del producto está en forma de vapor. La Ecuación 4 representa el PCI.

$$PCI = \{PCS - 212,2w(H)_d - 0,8[w(O)_d + w(N)_d]\} * (1 - 0,01M) - 24,43M \quad \text{(Ecuación 4)}$$

Es de gran importancia indicar que en todos los procesos industriales es de mayor interés el poder calorífico inferior (PCI), esto debido a que el calor de la condensación del vapor de agua en los productos de la combustión no resulta utilizable (Kollmann, 1959).

Energía Pacífico, solicitó en dos oportunidades a la Universidad de Chile, específicamente al Departamento de Desarrollo en productos forestales, en los años 2015 (estudio 1) y 2020 (estudio 2) respectivamente, a que determinaran el poder calorífico y contenido de humedad de distintas muestras de biomásas utilizadas en su proceso de generación de energía.

Los resultados se muestran a continuación:

Tabla 5. Contenido de humedad y Poder calorífico de biomásas (estudio 1).

MUESTRA		CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	PODER CALORÍFICO (Kcal/Kg)	
N°	Identificación	(base húmeda)	Inferior	Superior
1	Aserrín	69,4	No hubo ignición	4.688
2	Astillas secas	51,9	2.392	4.691
3	Chips	55,9	1.613	4.793
4	Astillas urbanas,	57,8	1.891	4.362
5	Carozo	42,6	3.340	5.272

6	Corontas	41,1	2.711	4.518
7	Corteza	58,5	1.370	4.593
8	Lodo orgánico	88,2	No hubo ignición	4.312
9	Alperujo	49,9	2.170	4.651
10	Caña Maíz	74,8	1.330	4.205
11	Viruta Polín	54,5	1.697	4.538
12	Cáscara de arroz	12,7	3.200	3.524

Fuente: Carmona & Elgueta, 2015.

Tabla 6. Contenido de humedad y Poder calorífico de biomásas (estudio 2).

MUESTRA		HUMEDAD INICIAL	PODER CALORÍFICO (Kcal/Kg)	
N°	Identificación	(% b.s.)	Inferior	Superior
1	Astillas secas	7,3	4.347	4.690
2	Mezcla sin Lodo	8,7	4.164	4.541
3	Astilla urbana	8,9	4.302	4.722
4	Corteza	74,1	4.132	5.165
5	Aserrín	41,2	2.367	4.639
6	Chips agrícola	9,9	3.989	4.427
7	Chips	20,8	3.683	4.650
8	Mezcla con Lodo	14,8	3.895	4.572

Fuente: Carmona & Elgueta, 2020.

Las diferencias entre los estudios 1 y 2, de poder calorífico de las Tablas 5 y 6, donde en algunas biomásas no se logró la ignición, esto se debe principalmente al alto porcentaje de humedad. Por otro lado, en algunas biomásas se obtuvo un poder calorífico inferior a distintos

porcentajes de humedad, lo que deja en evidencia lo significativo que es trabajar con biomásas a bajo porcentaje de humedad.

4.1.5 Densidad aparente

La densidad aparente es definida como el peso por unidad de volumen de un material, puede ser expresado en kilogramos por metro cúbico (kg/m^3) o libras por pie cúbico (lb/ft^3). La mayoría de los residuos agrícolas poseen una baja densidad aparente, como se muestra en la Figura 7.

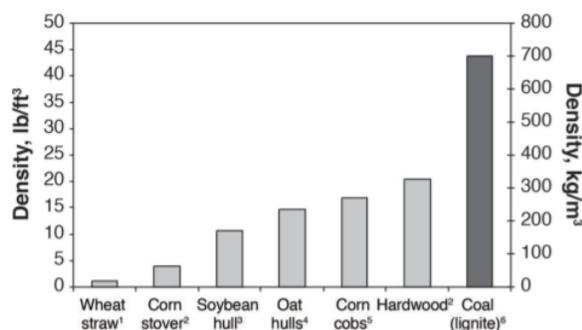


Figura 7. Típicas densidades aparentes de biomasa no procesada (Clarke, 2011).

Un kilogramo de diésel posee una energía neta de 10.363 kcal/kg y en promedio un kilogramo de mezcla de biomasa utilizada por EPSA contiene 3,859 kcal/kg, por ello lo importante de controlar la densidad aparente (Barros, 2016).

La biomasa es una fuente potencial de energía renovable, pero una de sus principales barreras para su uso generalizado, es que la biomasa contiene una energía menor a la que poseen los combustibles fósiles, es por ello que se requiere de más biomasa para obtener la misma energía. Cuando se combina una baja energía con una baja densidad, el volumen de alimentación a calderas u otros sistemas aumenta directamente. La compactación o densificación son formas de aumentar la densidad energética y superar la complejidad de manejar volúmenes excesivos.

Este valor se puede obtener mediante la norma ISO 17828:2015, la cual está establecida para biocombustibles sólidos.

4.2 Antecedentes de la combustión de biomasa

4.2.1 Influencia de factores físico-químicos en la combustión de biomasa

La combustión de biomasa es una serie de reacciones químicas de oxidación del carbono, dando paso al dióxido de carbono, y el hidrogeno es oxidado para generar agua. La deficiencia de oxígeno conduce a una combustión y la formación de muchos productos de combustión incompleta y un exceso de aire enfriaría el sistema. Los requisitos de aire dependen de la química y la física características del combustible. La combustión de la biomasa se refiere a la velocidad en que es quemada, productos de la combustión, exceso de aire para la combustión completa y la temperatura del fuego (Demirbas, 2005).

Los valores de las propiedades varían mucho, tales como la densidad, porosidad, área superficial interna están relacionadas con las especies de biomasa, mientras que la densidad aparente, tamaño de partícula y la distribución de la forma están relacionadas con la preparación del combustible. Dependiendo de la tecnología seleccionada para la combustión, existen varios pasos como pretratamiento de esta materia prima, algunos de estos pueden ser la densificación, lavado para reducir el contenido de sales, tamizado, secado entre otros (Khan, de Jong, & Jansens, 2008).

Las propiedades químicas importantes para la combustión son el análisis elemental, análisis de productos de pirolisis, poder calorífico superior, calor de pirolisis, poder calorífico de los volátiles y poder calorífico del carbón (Demirbas, 2004).

Un parámetro a favor de la biomasa es el contenido de material volátil (VM, por sus siglas en ingles), el cual es mayor de manera significativa en comparación al carbón. La biomasa suele estar compuesta por un 70-80% de VM, mientras que el carbón se compone de un 10-50% de VM. La biomasa generalmente tiene un contenido volátil muy alto. Estos volátiles se subdividen en gases como hidrocarburos ligeros, monóxido de carbono, dióxido de carbono, hidrogeno, agua y alquitranes. Los rendimientos dependen de la temperatura y la velocidad de calentamiento de la pirólisis. Debido a su alta fracción volátil, los biocombustibles son más fáciles de encender incluso a bajas temperaturas (Jenkins & Baxter, 1998).

4.2.2 Alcances del modelamiento para procesos de combustión de biomasa

Antes de comenzar esta sección es importante identificar de manera amplia las categorías de los modelos. Una división entre modelos se basa en el tipo de resultados que predicen. Los modelos deterministas ignoran la variación aleatoria y, por lo tanto, siempre predicen el mismo resultado desde un punto de partida determinado. Por otro lado, los modelos de naturaleza más estadística pueden predecir la distribución de posibles resultados, se dice que estos modelos son estocásticos (Marion & Lawson, 2008).

La mayoría de los estudios sobre la combustión en lechos fijos, presuponen un estado estacionario y no toman en cuenta los cambios de temperatura y composición del combustible, con el fin de tratar a los modelos matemáticamente y verificarlos experimentalmente. Generalmente en estos estudios se utilizan carbón y pellets de madera como base para los modelos, ya que, no hay problemas relacionados con el tamaño de partículas, baja densidad aparente y perfiles de temperatura no uniformes (Nunes, Matias, & Catalao, 2014).

Generalmente los estudios utilizan la modelación CFD (Computational Fluid Dynamics por sus siglas en inglés), esta es una herramienta computacional para predecir el comportamiento que involucran el flujo de fluidos, transferencia de calor y otros procesos físicos relacionados. Resuelve ecuaciones de flujo (en una forma especial) sobre una región de interés y con condiciones específicas (Ast Ingeniería, 2018).

En un estudio de Bhuiyan & Naser (2015) utilizaron el modelo CFD, considerando modelos Eulerianos-Lagrangianos de gas y modelamiento de fase de partículas. También acopla modelamientos anteriores de combustión de dos procesos más importantes llamados, desvolatilización y oxidación de carbonos y por último se agregan los modelos de Eddy-Breakup para representar la velocidad de reacción. En este trabajo se estudian tres tipos de mezclas de biomásas que co-combustionan con carbón y en dos niveles de proporción con el carbón (20 y 40%). El fin de este modelamiento es predecir la cantidad de transferencia de calor por radiación. Los resultados se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Comparación del valor predicho con el valor experimental del calor de transferencia por radiación.

Cases	Coal+20% Biomass			Coal+40% Biomass		
	Experiment, KW/m ²	Prediction, KW/m ²	Error, %	Experiment, KW/m ²	Prediction, KW/m ²	Error, %
Air	385	395.36	2.69	395	360.56	8.71
RR75	328	318.90	2.77	--	294.77	--
RR72	375	380.97	1.59	328	340.99	3.96
RR68	435	437.85	0.65	370	386.67	4.50

Otro estudio de Ma, Jones, Pourkashanian, & Williams(2006), utilizaron el modelamiento CFD, considerando de la misma forma los modelos Eulerianos-Langragianos, como también ecuaciones que representan la velocidad de calentamiento de las partículas de biomasa. En este estudio se busca predecir la liberación de Potasio y la formación de NO_x.

Otra forma de establecer un modelo que prediga cierta variable de respuesta, es a través de un análisis de componentes principales, como el estudio de Sutherland & Parente (2009), donde solo se basa en obtener el aporte de cada componente a la variable respuesta, el modelo ajustado a los datos permite obtener un mayor Coeficiente de Determinación (R²), dependiendo de cuál se elija (lineal, cuadrático, cúbico entre otros). Sin embargo, algunos modelos permiten obtener un mayor ajuste a los datos sin acercarse a valores físicamente posible o valores límites establecidos, pero aun así permite obtener un modelo con una base de datos, sin considerar todas las variables que se controlan en otros estudios. Este tipo de modelación no queda exenta de alguna modificación fuera del alcance estadístico, como, agregar otra variable que no pudo estar dentro del análisis, pero que si tiene cierto grado de significancia en la respuesta.

Complementando lo mencionado anteriormente, se puede obtener un modelo con una base de datos, pero para este caso hay que tener en consideración la modelación de variables de procesos y la modelación de la mezcla de biomasa. Para la modelación de variables de procesos, cada factor es independiente de los niveles de los otros factores. Sin embargo, en la modelación de mezclas, los factores son componentes o ingredientes de una mezcla, por lo tanto, el nivel de un factor afecta directamente al otro o a los demás factores (Gutiérrez Pulido & De La Vara Salazar, 2010).

El análisis de varianza (ANOVA), es una herramienta que se utiliza para separar la variación total observada en cada una de las fuentes que contribuye a la misma. En simples palabras

determina qué factores son significativos para la variable respuesta y no solo factores por sí solo, también interacciones e incluso factores con un orden distinto de 1. Para el modelamiento con datos estadísticos o el diseño de experimentos, en general se trabaja con un intervalo de confianza de 95%, esto quiere decir que el 5% de las veces que se utiliza el modelo o se realiza un experimento, el valor es erróneo (Gutiérrez Pulido & De La Vara Salazar, 2010).

En base a la información y los datos de proceso otorgada por EPSA, se logra identificar las variables críticas del proceso. Con estos antecedentes es posible establecer un Modelo Predictivo para el Vapor Neto generado. De acuerdo a la revisión bibliográfica revisada previamente, sobre el modelamiento matemático relacionado con los procesos de combustión de biomasa, indica que el método más adecuado a utilizar, sería un tratamiento estadístico de los datos mediante el Método de Mínimos Cuadrados o de manera general una regresión. Este método permite obtener modelos parciales de mezclas de biomasa y de variables de proceso, posteriormente es posible realizar una iteración entre ambos modelos para encontrar la ponderación o contribución de cada uno de estos modelos y finalmente obtener un Modelo General para nuestro estudio.

5. OBJETIVOS

5.1 Objetivo general

Desarrollar un modelo predictivo para la generación de vapor en función de la proporción de mezcla de biomasa y variables de proceso tales como, humedad de la mezcla, densidad aparente, flujo de agua de alimentación y consumo de biomasa.

5.2 Objetivos específicos

Analizar la influencia de los factores operacionales y las distintas mezclas de biomasa en el vapor generado.

Establecer los parámetros que acompañen a los factores operacionales y fracciones de biomasa del modelo matemático.

Validar el modelo obtenido con valores reales de operación.

6. METODOLOGIA

6.1 Pre-tratamiento de los datos

Para evaluar estadísticamente las variables, es necesario identificar los datos que no son representativos dentro de la operación normal de la empresa. Identificando valores que provoquen una interpretación errónea en los resultados, estos generalmente aparecen en fallas dentro del proceso y detenciones inesperadas. Por lo tanto, se seleccionan solo los valores que están dentro de un rango establecido para ciertas variables de estudio (fracciones de biomasa en la mezcla, flujo de agua, consumo de biomasa, densidad y humedad). Para esto solo fueron considerados datos en donde la producción de vapor de la empresa oscilaba entre 1450-2160 toneladas/día.

La clasificación de los datos se hace de acuerdo a dos Períodos: Período 1; otoño-invierno y Período 2; primavera-verano, con el fin de que las mezclas de biomasa sean las mismas, la humedad relativa no interfiera y que la temperatura ambiental tampoco sea una variable que se interprete de otra manera. Por otro lado, se establece el supuesto de exceso de aire el cual es equivalente a un 80 % según lo reportado por Donoso (2011), se considera este supuesto, ya que no existe una medición continua del oxígeno u otra medición relacionada con este componente.

De los datos ya tratados, solo el 87 % es utilizado para el análisis estadístico y su posterior modelamiento, el 13 % restante es utilizado para la validación del modelo general. La toma de la muestra fue realizada de manera aleatoria.

6.2 Ajuste de modelo lineal de mezcla para la producción de Vapor.

Para el ajuste lineal, se procedió a utilizar el método de mínimos cuadrados, el cual consiste en lo calcular lo señalado por las Ecuaciones 5 y 6.

$$S_{xy} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) (y_i - \bar{y}) \quad (\text{Ecuación 5})$$

$$S_{xx} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (\text{Ecuación 6})$$

Con los valores de S_{xy} y S_{xx} es posible obtener los parámetros β_i que acompañan a las distintas fracciones de biomasa en el modelo.

$$\beta_i = \frac{S_{xy}}{S_{xx}} \quad (\text{Ecuación 7})$$

$$E(y) = \sum_{i=1}^q \beta_i x_i \quad (\text{Ecuación 8})$$

Una vez obtenido todos los valores, se agregaron a la sumatoria representada en la Ecuación 8, que es finalmente el modelo obtenido. Para calcular el Coeficiente de Determinación del modelo o R^2 , se utiliza la Ecuación 9.

$$R^2 = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n error^2}{\sum_{i=1}^n (y - \bar{y})^2} \right) \quad (\text{Ecuación 9})$$

6.3 Ajuste de modelo de las variables de proceso para la producción de Vapor.

Para la obtención de un modelo predictivo con las variables de proceso, solo fueron utilizadas la humedad y densidad aparente de la mezcla de biomasa, flujo de agua de alimentación y consumo de biomasa. Se restringió a solo estas variables, ya que, son factores registrados por la empresa y los únicos que se relacionan de manera directa a la generación de energía (Anexo 9).

Este modelo se obtuvo a partir de un análisis estadístico de los datos, empleando el uso de softwares como Desing Expert 11 y Análisis de Datos de Excel, los cuales entregan de manera inmediata el Análisis de Varianza, modelo ajustado y Coeficiente de Determinación.

6.4 Modelamiento general.

Para la obtención del modelo general se realizó una iteración con el fin de obtener la ponderación de los modelos de mezcla y de variables de proceso al modelo general. Esto se llevó a cabo con la herramienta Solver de Excel, restringiendo el coeficiente de significancia de los modelos (entre 0,001 a 0,999), dando como función objetivo el Coeficiente de determinación. Al obtener estos valores de significancia, se procedió a sumar ambos modelos.

6.5 Validación del modelo obtenido.

Para la validación del modelo general se consideran los 13% de datos reales mencionados en el apartado 5.1. Con estos datos se calcula el porcentaje de error en la predicción del modelo, para lo cual la variable respuesta debe estar en las mismas condiciones que los valores reales.

$$\% error = \left(\frac{|Valor_{Real} - Valor_{Predicho}|}{Valor_{Real}} \right) * 100 \quad (\text{Ecuación 10})$$

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1 Ajuste de modelo lineal a la mezcla (Período 1 y 2)

Para el Período 1 (otoño-invierno) se obtuvieron los siguientes parámetros;

Tabla 8. Parámetros del modelo de mezcla Período 1.

Tipo biomasa (x_i)	Parámetros Modelo β
Fracción Astilla urbana	2565,42
Fracción Astilla seca	1707,6772
Fracción Viruta	3189,3311
Fracción Chips	1236,6442
Fracción Aserrín	1866,6165
Fracción Corteza	3253,1937
Fracción Lodo	-868,012
Fracción Cascara Nuez	4754,64682
Fracción Chips Agrícola	-448,07

El Coeficiente de determinación de este modelo es de 56,2 %, con una falta de ajuste significativa como se muestra en la Tabla 9, pero el modelo lineal ajustado es significativo.

Tabla 9. Análisis de Varianza modelo de mezcla Período 1.

	Suma Cuadrados	gl	Cuadrados medios	Valor F	Valor p	
Modelo	2,899E+05	8	36233,67	4,01	0,0035	Significativo
Mezcla lineal	2,899E+05	8	36233,67	4,01	0,0035	
Falta Ajuste	1,389E+05	8	17359,57	3,39	0,0164	Significativo

La falta de ajuste de este modelo es esperada, ya que, solo considera la proporciones en las cuales se mezcló la biomasa y no considera otros factores del proceso como, el flujo agua, humedad de la biomasa, densidad entre otros. Estos factores cambian constantemente durante el proceso de combustión, es por aquello que este modelo no puede predecir de manera correcta el Vapor neto generado. Aun así, es importante conocer este modelo porque al tener presente distintas biombras, cada una de ellas aporta una energía diferente, como lo muestran sus poderes caloríficos en la Tabla 5 y 6.

Otro análisis estadístico que muestra este modelo, es que los supuestos del modelo se cumplen. Estos supuestos son: Normalidad, Varianza constante e independencia de los datos, como se muestra en la Figura 8. Esto es, la variable respuesta se debe distribuir de manera normal, con la misma varianza en cada tratamiento o corrida y las mediciones deben ser independientes.

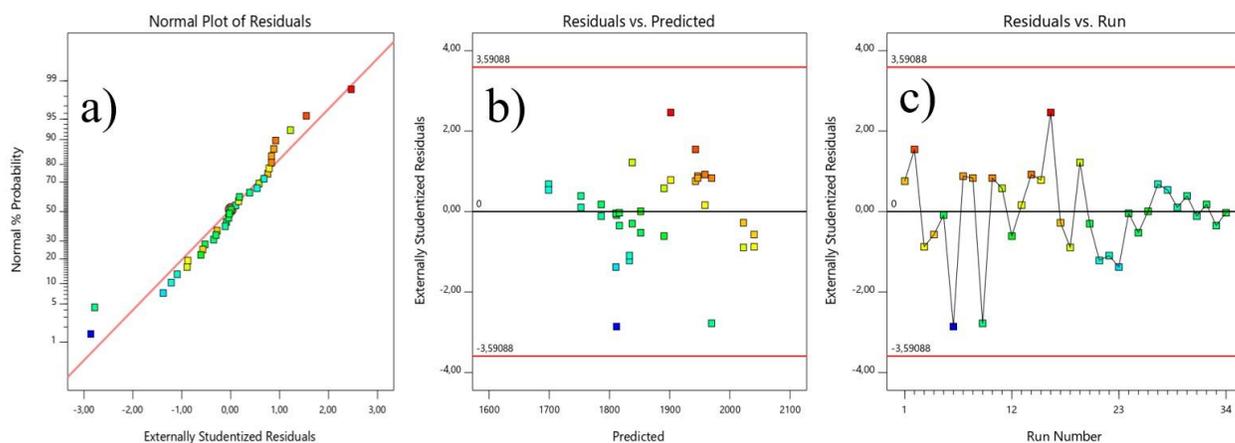


Figura 8. Supuestos del modelo de mezcla para el Período 1; a) normalidad, b) varianza constante, c) independencia.

Finalmente, la ecuación real de este modelo queda de la siguiente manera;

$$Vapor = [(2565,42 * x_{ur}) + (1707,6772 * x_{se}) + (3189,3311 * x_{vi}) + (1236,6442 * x_{ch}) + (1866,6165 * x_{as}) + (3253,1937 * x_{co}) - (868,012 * x_{lo}) + (4754,64682 * x_{nu}) - (448,07 * x_{ag})]$$

(Ecuación 11)

Para el Período 2 (primavera-verano) se obtuvieron los siguientes parámetros;

Tabla 10. Parámetros del modelo de mezcla Período 2.

Tipo biomasa (x_i)	Parámetro Modelo β
Fracción ASTILLA URBANA	-287,9761684
Fracción ASTILLA SECA	1252,738964
Fracción VIRUTA POLIN	2488,98046
Fracción CHIPS	3837,643881

Fracción ASERRIN	4384,452502
Fracción CORTEZA	-675,9040132
Fracción CORONTA	2126,435126
Fracción LODO	5450,273985
Fracción CASCARA NUEZ	-194,3474562
Fracción CAROZOS	-2199,188154
Fracción CHIPS AGRICOLA	1168,476005

El Coeficiente de determinación de este modelo es de 70,34 %, con una falta de ajuste significativa como se muestra en la Tabla 11, pero el modelo lineal ajustado es significativo al igual que en el Período anterior.

Tabla 11. Análisis de Varianza modelo de mezcla Período 2.

	Suma Cuadrados	gl	Cuadrados medios	Valor F	Valor p	
Modelo	2,069E+05	10	20688,75	3,79	0,0088	Significativo
Mezcla lineal	2,069E+05	10	20688,75	3,79	0,0088	
Falta Ajuste	60380,93	2	30190,46	15,74	0,0003	Significativo

Las justificaciones con respecto al bajo Coeficiente de Determinación y la falta de ajuste significativo, son las mismas que para el Período 1. De igual forma los supuestos del modelo se cumplen (Figura 9).

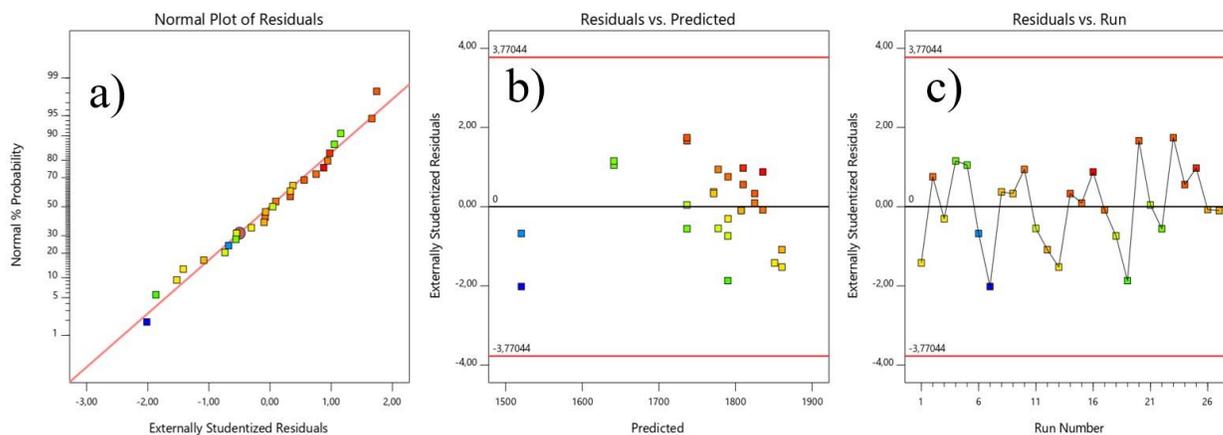


Figura 9. Supuestos del modelo de mezcla para el Período 2; a) normalidad, b) varianza constante, c) independencia.

La ecuación de este modelo queda de la siguiente manera;

$$\begin{aligned} Vapor = & \left[-(287,9761684 * x_{ur}) + (1252,738964 * x_{se}) + (2488,98046 * x_{vi}) + (3837,6438 * x_{ch}) \right. \\ & + (4384,45502 * x_{as}) - (675,90401 * x_{co}) + (2126,4351 * x_{cor}) + (5450,27398 * x_{lo}) \\ & \left. - (194,34745 * x_{nu}) - (2199,18815 * x_{ca}) + (1168,476005 * x_{ag}) \right] \end{aligned}$$

(Ecuación 12)

Con los modelos de mezclas del Período 1 y 2, se puede complementar los modelos de variables de procesos y de esta forma obtener un modelo general para ambos Períodos que prediga el vapor neto con un mínimo de error.

7.2 Ajuste de modelo de las variables de proceso

Los parámetros obtenidos para los modelos de variables de proceso en el Período 1 y 2, se muestran en las Tablas 12 y 13.

Tabla 12. Parámetros del modelo de variables de proceso Período 1.

Variable	Parámetros del modelo
Intercepto	1727,5643
Flujo agua de alimentación m3/h	-2,1163
Humedad %	-73,635
Densidad kg/m3	18152,52
Consumo de biomasa m3	0,1706
Interacción Humedad-Densidad	317,6737
(Flujo agua de alimentación) ²	0,000687
(Densidad) ²	-56600,595

Tabla 13. Parámetros del modelo de variables de proceso Período 2.

Variable	Parámetros del modelo
Intercepto	-59,424743
Flujo agua de alimentación m3/h	0,75601471
Humedad %	-1,5941191
Densidad kg/m3	335,850098
Consumo de biomasa m3	0,14777714

Los Coeficientes de Determinación obtenidos fueron de 96,06% y 97,45% para Período 1 y 2, respectivamente.

El modelo del Período 1 es de carácter cuadrático, ya que, de esta forma se logró un mejor ajuste, esto se explica por la alta variabilidad que posee este Período, en donde la densidad de las biomásas cambia constantemente y lo mismo ocurre con el Flujo de agua de alimentación, el cual se debe ir modificando continuamente, todo esto es producto de una menor temperatura ambiental y una mayor humedad relativa (entre los meses de abril y septiembre).

A diferencia el modelo del Período 2, solo fue necesario un ajuste de carácter lineal, ya que las condiciones ambientales en los meses de primavera y verano son estables, permitiendo que las variables de proceso mencionadas en el modelo no posean una alta variabilidad.

En las Tablas 14 y 15, de análisis de varianza se observa el buen ajuste de los modelos para ambos Períodos.

Tabla 14. Análisis de Varianza de modelo de variables de proceso Período 1.

	Suma cuadrados	gl	Cuadrados medios	Valor F	Valor p	
Modelo	4,955E+05	7	70779,96	90,45	< 0.0001	Significativo
Flujo agua	72474,94	1	72474,94	92,62	< 0.0001	
Humedad	5642,84	1	5642,84	7,21	0,0124	
Densidad	4779,70	1	4779,70	6,11	0,0203	
Consumo biomasa	8217,19	1	8217,19	10,50	0,0033	
Humedad-Densidad	5555,81	1	5555,81	7,10	0,0131	
Flujo agua²	60809,72	1	60809,72	77,71	< 0.0001	
Densidad²	11382,45	1	11382,45	14,55	0,0008	
Residual	20345,07	26	782,50			

Tabla 15. Análisis de Varianza de modelo de variables de proceso Período 2.

	Suma cuadrados	gl	Cuadrados medios	Valor F	Valor p	
Modelo	2,866E+05	4	71655,79	210,46	< 0.0001	Significativo
Flujo agua	30985,30	1	30985,30	91,01	< 0.0001	
Humedad	854,60	1	854,60	2,51	0,1274	
Densidad	1276,18	1	1276,18	3,75	0,0658	

Consumo biomasa	2520,98	1	2520,98	7,40	0,0125	
Residual	7490,26	22	340,47			

Aunque el Valor p de la Humedad y Densidad son mayores que 0,05 en la Tabla 15, fueron considerados para el modelo, porque permitieron que el Coeficiente de Determinación tuviera un valor más alto.

De la misma forma que los modelos de mezclas, estos también cumplieron con los supuestos del modelo, lo cual indica que el modelo es robusto.

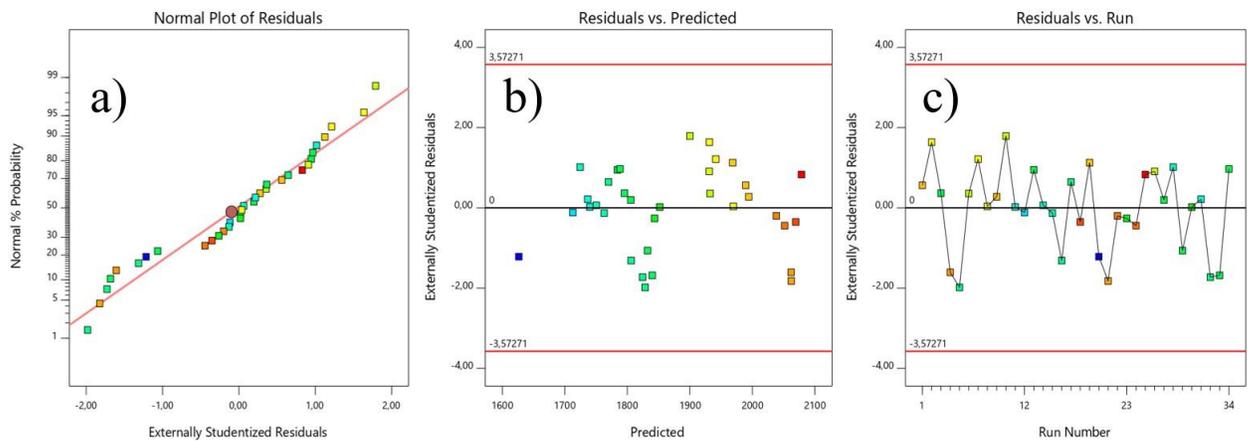


Figura 10. Supuestos del modelo variables de proceso; a) normalidad, b) varianza constante, c) independencia, (Período 1).

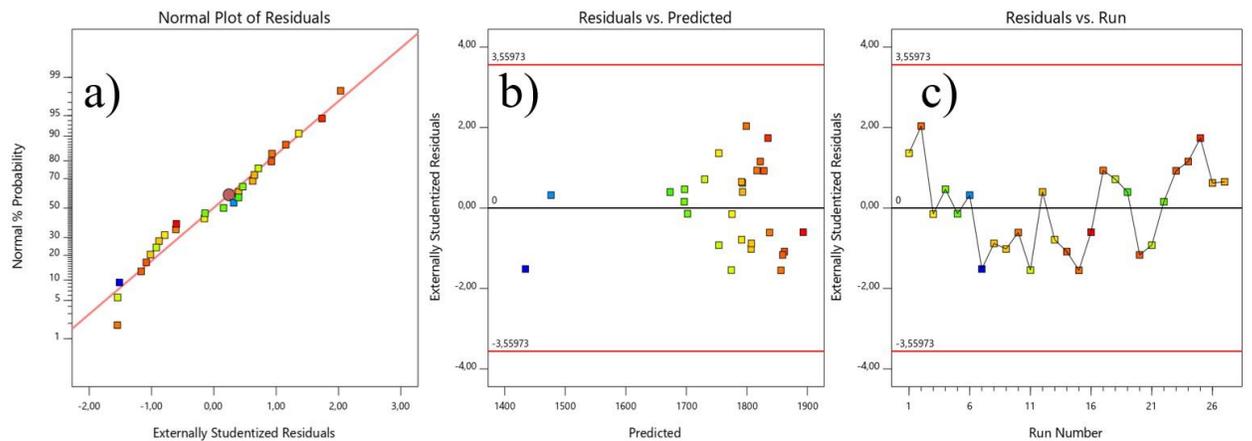


Figura 11. Supuestos del modelo variables de proceso; a) normalidad, b) varianza constante, c) independencia, (Período 2).

7.3 Modelamiento General.

El Modelo general para ambos Períodos se obtuvo a partir de una iteración con la herramienta Solver de Excel, como se explicó en la sección 6.4. Esta iteración tiene como objetivo encontrar la contribución del modelo de mezcla y del modelo de variables proceso.

Tabla 16. Contribución de cada modelo al Modelo General Período 1.

	Contribución
Modelo de Mezcla	6,07%
Modelo de Variables de proceso	93,93%

Tabla 17. Contribución de cada modelo al Modelo General Período 2.

	Contribución
Modelo de Mezcla	6,298%
Modelo de Variables de proceso	93,702%

Con estos valores es posible realizar una suma de ambos modelos para cada Período, con el máximo Coeficiente de Determinación obtenido por la iteración, el Modelo general Período 1 obtuvo un valor de 99,51% y el Modelo general Período 2 un valor de 97,57%. Estos valores tienen una representación del sentido matemático, por lo que la contribución de cada modelo podría estar errónea en un sentido físico, sin embargo, la validación de los modelos entrega un valor que se aproxima a lo que el modelo representa físicamente, este procedimiento se explica en la sección 6.5 y los resultados obtenidos se muestran en las Tablas 18 y 19, para el Período 1 y 2 respectivamente.

Como se observa en las Tablas 16 y 17, la contribución del modelo de mezcla aporta en promedio un 6,18% a los modelos generales, esta baja contribución en comparación a lo que proporcionan los modelos de variables de proceso se puede justificar con las propiedades macroscópicas que poseen estos biocombustibles, estas son; el contenido de humedad, poder calorífico, densidad aparente y temperatura de fusión de cenizas, las cuales son atribuidas a la preparación de los combustibles antes de que sean introducidos a la caldera, lo cual no tiene una relación directa con el tipo de biomasa, como se menciona en el estudio de Demirbas (2005). Esto

también se puede evidenciar con los poderes caloríficos superiores mostrados en las Tablas 3, 5 y 6, en donde estos valores son del mismo orden de magnitud y similares. Si es evidente que es conveniente agregar una mayor proporción de cierta biomasa a la caldera cuando esta está en una baja producción de energía, como por ejemplo agregar la Cascara de Nuez, pero no es porque posea un mayor poder calorífico superior, si no, que posee una baja propiedad higroscópica, por lo que su contenido de humedad siempre es menor a las otras biomásas.

Tabla 18. Validación del Modelo general Período 1.

Vapor real	Vapor predicho	%error
1735,97864	1714,450394	1,24012183
1998,5136	1952,569241	2,29892647
1786,93856	1778,099119	0,49466934
1682,28221	1727,33643	2,67816075
1825,90944	1810,979997	0,81764423
1890,29431	1758,045259	6,9962151

El error promedio obtenido es de 2,42 % para el Período 1 y para el Período 2 es de 1,38 %, esto representa que ambos modelos tienen una buena predicción para haber sido generado a partir de datos industriales, sin un mayor control de las variables como se evidencia en la sección 4.2.2, en donde el estudio de Bhuiyan & Naser (2015), obtuvieron en promedio un error 2,69% para el modelo obtenido a escala de laboratorio.

Tabla 19. Validación del Modelo general Período 2.

Vapor real	Vapor predicho	%error
1769,44	1680,692835	5,01555098
1687,92547	1685,534569	0,14164704
1778,50155	1793,762419	0,85807472
1864,7995	1865,852377	0,05646083
1819,89374	1804,0902	0,86837697

Cabe mencionar que los modelos son certeros en ciertos rangos de operación, ya que, en esos rangos fue estudiado (Tabla 20 y 21).

Tabla 20. Rango de operación de variables para el Modelo general Período 1.

Variable	Máximo	Mínimo
Fracción Astilla urbana	0,29268293	0,08333333
Fracción Astilla seca	0,27927928	0,12195122
Fracción Viruta	0,12195122	0
Fracción Chips	0,32407407	0,16260163
Fracción Aserrín	0,3	0
Fracción Corteza	0,13333333	0,02564103
Fracción Lodo	0,03361345	0
Fracción Cascara Nuez	0,08474576	0
Fracción Chips Agrícola	0,14772727	0,03278689
Flujo agua de alimentación m3/h	2295,8096	1130,90199
Humedad %	37,88	20,74
Densidad kg/m3	0,294	0,207
Consumo de biomasa m3	2689,54043	1913,70131

Tabla 21. Rango de operación de variables para el Modelo general Período 2.

Variabes	Máximo	Mínimo
Fracción Astilla urbana	0,3271028	0,08849558
Fracción Astilla seca	0,27868852	0,04273504
Fracción Viruta polín	0,06896552	0
Fracción Chips	0,21568627	0,11965812
Fracción Aserrín	0,26548673	0,12711864
Fracción Corteza	0,11214953	0
Fracción Coronta	0,04310345	0
Fracción Lodo	0,04123711	0
Fracción Cascara nuez	0,05084746	0
Fracción Carozos	0,07079646	0
Fracción Chips agrícola	0,17	0
Flujo agua de alimentación m3/h	2066,54893	1586,206
Humedad %	34,4	18,91
Densidad kg/m3	0,31	0,209
Consumo de biomasa m3	2440,87096	1755,56032

Utilizando los valores de las Tablas 16 y 17, se obtuvieron los siguientes Modelos generales;

Modelo General Período 1:

$$\begin{aligned} Vapor = & \{0,0607[(+2565,42 * x_{ur}) + (1707,6772 * x_{se}) + (3189,3311 * x_{vi}) + (1236,6442 * x_{ch}) \\ & + (1866,6165 * x_{as}) + (3253,1937 * x_{co}) - (868,012 * x_{lo}) + (4754,64682 * x_{nu}) - (448,07 * x_{ag})] \\ & + 0,9393 [(+1727,5643) - (2,1163 * F_{H2O}) - (73,635 * H) + (18152,52 * D) + (0,1706 * C_{bio}) \\ & + (317,6737 * H * D) + (0,000687 * F_{H2O}^2) - (56600,595 * D^2)] \} \end{aligned}$$

(Ecuación 13)

Modelo General Período 2:

$$\begin{aligned} Vapor = & \{0,06289[-(287,9761684 * x_{ur}) + (1252,738964 * x_{se}) + (2488,98046 * x_{vi}) \\ & + (3837,6438 * x_{ch}) + (4384,45502 * x_{as}) - (675,90401 * x_{co}) + (2126,4351 * x_{cor}) \\ & + (5450,27398 * x_{lo}) - (194,34745 * x_{nu}) - (2199,18815 * x_{ca}) + (1168,476005 * x_{ag})] \\ & + 0,93702 [(-59,424743) + (0,75601471 * F_{H2O}) - (1,5941191 * H) + (335,850098 * D) \\ & + (0,14777 * C_{bio})] \} \end{aligned}$$

(Ecuación 14)

F_{H2O} = Flujo de agua de alimentación, m^3/h .

H = Contenido de humedad de la mezcla de biomasa, %.

D = Densidad aparente de la mezcla de biomasa, kg/m^3 .

C_{bio} = Consumo de biomasa, $kg/día$.

La utilidad que se le pueda dar a los Modelos generales Período 1 y 2, son restringidos al momento de querer realizar una maximización en la generación de vapor, ya que, las variables de Humedad y Densidad no son controlables. Sin embargo, ambos modelos ayudarían a establecer el Flujo de alimentación de agua y Consumo de biomasa, conociendo la humedad de la mezcla, densidad y en base a que proporciones estén mezcladas las biombras, pero siempre considerando el rango de operación de las variables de las Tablas 20 y 21. Siguiendo estas restricciones no habría problema con la predicción, debido a que los residuales de los modelos son mínimos, véase Figura 12 y 13 en donde la cercanía que existe entre los valores predichos con los observados es mínima.

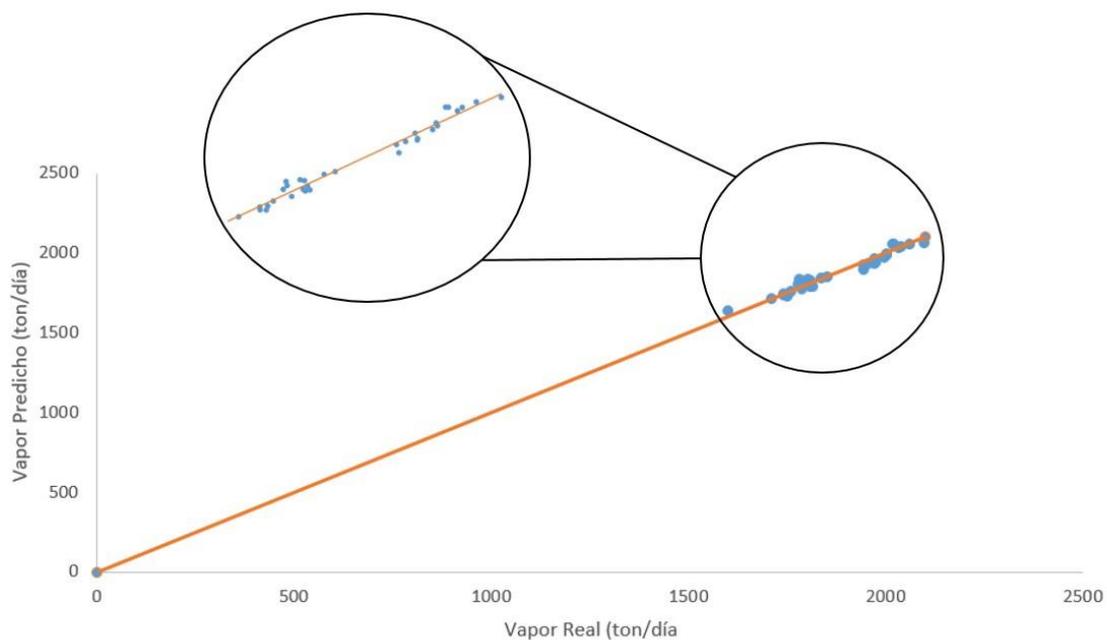


Figura 12. Grafica de dispersión de Valor Predicho vs. Valor Real Modelo general Período 1.

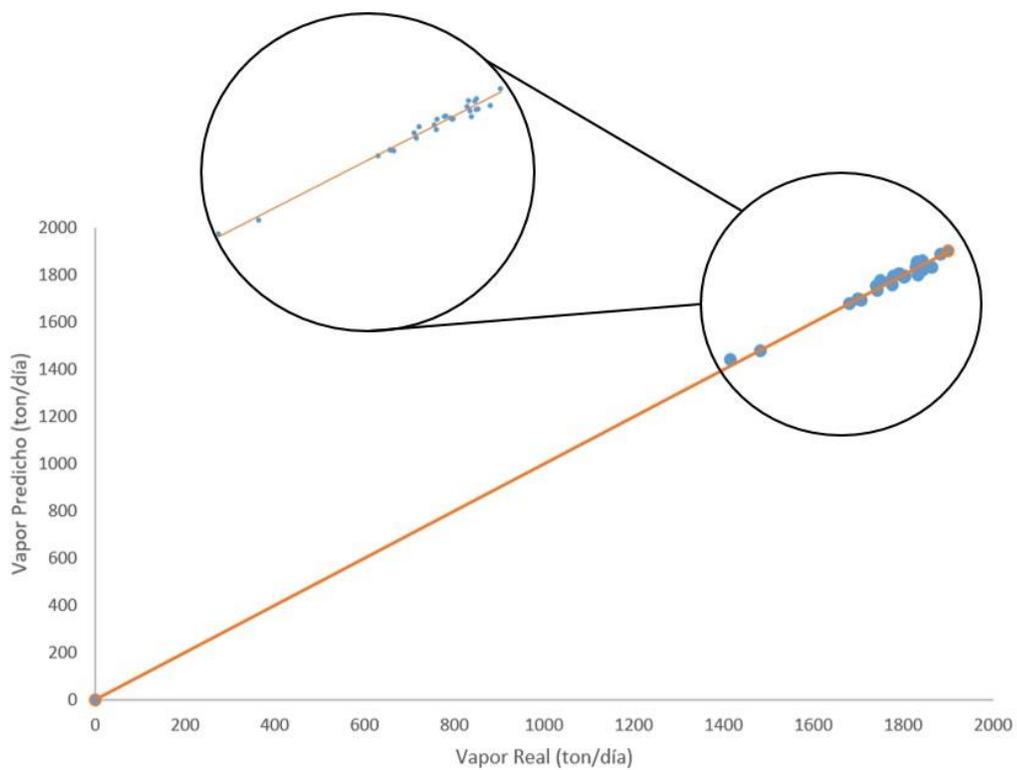


Figura 13. Grafica de dispersión de Valor Predicho vs. Valor Real Modelo general Período 2.

Mayer & Butler (1993), clasifican a las técnicas de validación en; evaluación subjetiva, técnicas visuales, medidas de desviación y pruebas estadísticas. Los índices o medidas para efectuar validación no presentan el carácter objetivo que se demanda de las pruebas o métodos estadísticos en el sentido de un mismo conjunto de datos. Por lo tanto, la Figura 12 y 13 son de carácter subjetiva y visual y se complementan con un estudio de Medina & Vargas (2010), en donde hacen una relación directa con análisis de validación de medidas de desviación y análisis gráficos, con esto se puede asegurar que el Modelo general Período 1 y 2 satisfacen esta medida, ya que, los puntos (valores predichos y observados) están adyacentes a la recta y no poseen ningún sesgo como lo valida la Figura 14.

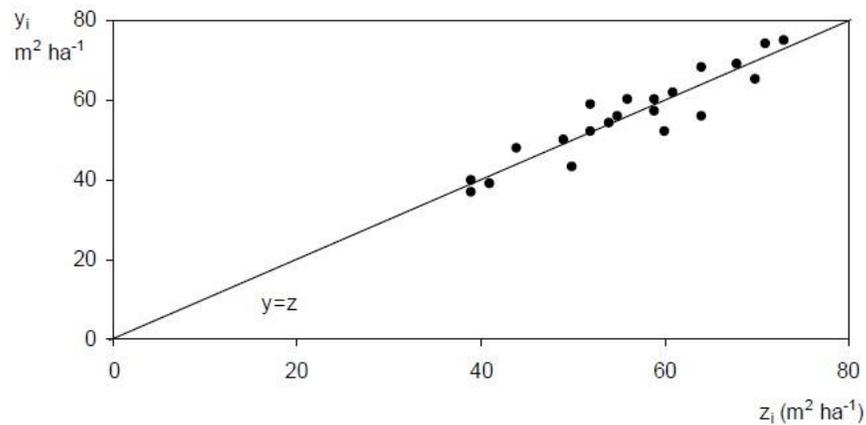


Figura 14. Relación entre valores simulados (z_1) y los valores observados (y_1) para un modelo sin sesgo. $y=z$ es la recta que representa la exactitud ideal (Medina & Vargas, 2010).

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1 Conclusiones

El análisis de la influencia de las variables de proceso y las distintas mezclas de biomasa, ayudó a definir qué variables van presente dentro de cada modelo, esto obtenido gracias al Análisis de Varianza.

Se logró obtener los parámetros que acompañan a las variables establecidas, esto en el orden de cuan influyentes son en la variable respuesta. Con esto se obtuvieron Coeficientes de Determinación máximos, que son la representación matemática de los Modelos generales. Los Coeficientes de Determinación fueron de 99,51 % y 97,57 % para Período 1 y 2 respectivamente.

La validación de los modelos matemáticos, permitió verificar la eficiencia que poseen estos modelos al momento de predecir el Vapor generado, dando de esta forma un sentido físico al procedimiento de iteración realizado.

8.2 Recomendaciones

Este trabajo se puede complementar agregando más variables de procesos, como la cantidad de oxígeno, ya que, es una variable importante para la combustión, según el informe de Donoso, 2011, en el cual se recomienda una operación con un 50% de exceso de aire. El registro constante de esta variable sería de utilidad para agregar al modelo, sin importar su forma de medición (porcentaje, flujo de aire primario, presión del aire primario entre otros).

Otras variables que se pudieran medir y registrar, son las humedades de cada biomasa, con esto se podría estimar la energía disponible de la mezcla, ya que de esta forma se puede calcular el poder calorífico a esa humedad. También tomar registro diario de la temperatura de aire primario a la entrada y salida del calentador de este aire. Estas dos variables mencionadas tienen directa relación con la combustión y la eficiencia del biocombustible.

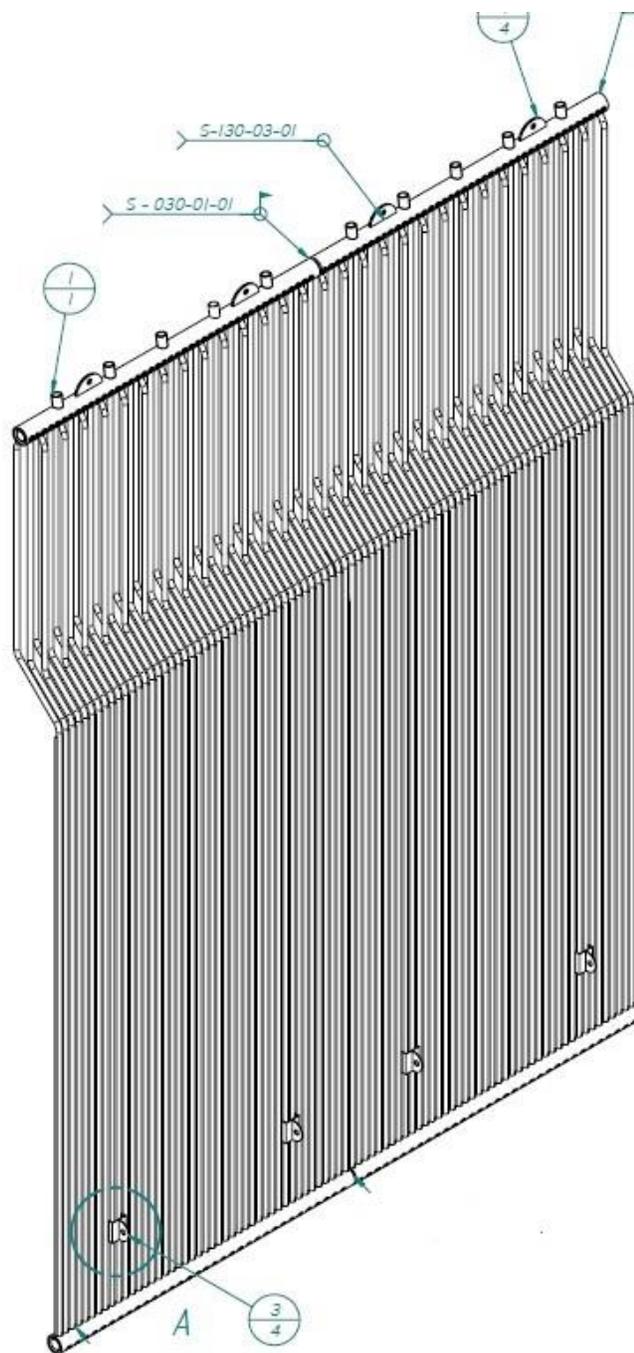
En apoyo a la evaluación de un proyecto de mejora para la empresa, se estimó el ahorro que generaría instalar un equipo para producir briquetas con el Aserrín y la Viruta polín. Esto generaría una densificación en la energía de estas biomásas y también una mayor estabilidad en la combustión, debido a que el aserrín y la viruta pasarían por un secador rotatorio, el cual bajaría la humedad de estas biomásas a un 12 %, lo que conlleva un aumento significativo del poder calorífico y por lo tanto el consumo volumétrico disminuiría en 5200 m³ mensuales (Almendras Roa, 2020).

9. REFERENCIAS

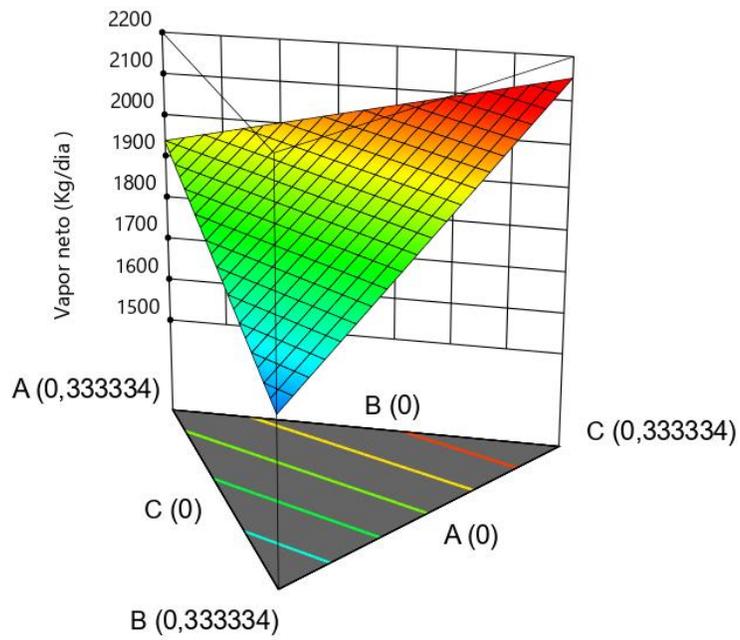
- Almendras Roa, L. (2020). *Diseño de un sistema de producción de briquetas de biomasa para una planta de generación de energía*. Concepción: Facultad De Ingeniería, Universidad de Concepción.
- Ast Ingeniería. (22 de Febrero de 2018). *ast-ingenieria*. Obtenido de http://www.ast-ingenieria.com/capacidades-soluciones/simulacion-cfd/cfd-simulation/view?set_language=en
- Barros, G. (2016). *Medición consumo específico neto de Central Diesel Inacal*. Concepción: Dóminet.
- Bhuiyan, A., & Naser, J. (2015). Numerical modeling of Biomass co-combustion with pulverized coal in a small scale furnace. *Procedia Engineering*, 505-509.
- Carmona, R., & Elgueta, R. (2015). *Determinación de poder calorífico en muestras de biomasa de Papelera Pacífico*. Santiago: Laboratorio de Bioenergía y Caracterización de Biomasa, Universidad de Chile.
- Carmona, R., & Elgueta, R. (2020). *Informe determinacion de humedad y poder calorífico superior e inferior en muestras de biomosas*. Santiago: Laboratotio de Bioenergía y Caracterización de Biomasa, Universidad de Chile.
- Clarke, S. (2011). Biomass Densification for Energy Production. *Factsheet*, 1-2.
- Demirbas, A. (2005). Potential applications of renewable energy sources, biomass combustion problems in boiler power systems and combustion related environmental issues. *Progress in Energy and Combustion Science*, 180-188.
- Demirbas, A. (2004). Combustion characteristics of different biomass fuels. *Progress in Energy and Combustion Science*, 222-228.
- Donoso, G. (2011). *Preevaluación de la combustión actual de la caldera Biochamm BGV 90.000*. Rancagua: Proterm.
- Esen, M., & Yuksel, T. (2013). Experimental evaluation of using various renewable energy sources for heating a greenhouse. *Energy and Buildings*, 346-348.
- Garcés, M. (2016). *Cuantificación del porcentaje de humedad y cenizas contenido en los residuos sólidos urbanos del Distrito Metropolitano de Quito*. Quito: Trabajo de fin de carrera, SEK.
- Gutiérrez Pulido, H., & De La Vara Salazar, R. (2010). *Análisis y Diseño de Experimentos*. Guadalajara: McGraw-Hill.
- Jenkins, B., & Baxter, L. (1998). Combustion properties of biomass. *Fuel Processing Technology*, 28-34.
- Khan, A., de Jong, W., & Jansens, P. (2008). Biomass combustion in fluidized bed boilers: Potential problems and remedies. *Fuel Processing Technology*, 23-28.

- Kollmann, F. (1959). *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe*, 2 vol. Madrid: Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias.
- Ma, L., Jones, J., Pourkashanian, M., & Williams, A. (2006). Modelling the combustion of pulverized biomass in an industrial combustion test furnace. *FUEL*, 1960-1964.
- Marion, G., & Lawson, D. (2008). An Introduction to Mathematical Modelling. *Bioinformatics and Statistics Scotland*, 1-2.
- Mayer, D., & Butler, D. (1993). Statistical Validation. *Ecological Modelling*, 21-23.
- Medina, S., & Vargas, L. (2010). COMPARACIÓN DE MEDIDAS DE DESVIACIÓN PARA VALIDAR MODELOS SIN SESGO, SESGO CONSTANTE O PROPORCIONAL. *Facultad de Matemáticas, Universidad Autónoma de Yucatán*, 260-262.
- Nunes, L., Matias, J., & Catalao, J. (2014). Mixed Biomass pellets for thermal energy production: A review of combustion models. *Applied Energy*, 139.
- Rincón, S., Gómez, A., & Klose, W. (2011). *Gasificación de biomasa residual de procesamiento agroindustrial*. Colombia: kassel.
- Sutherland, J., & Parente, A. (2009). Combustion modeling using principal component analysis. *Proceedings of the Combustion Institute*, 1563-1567.
- Wong, J., & Villers, M. (2006). Evaluación de combustibles y su disponibilidad en incendios forestales: un estudio en el Parque Nacional La Malinche. *Investigaciones Geográficas, UNAM*, 88-89.
- Yilmaz, S., & Selim, H. (2013). A review on the methods for biomass to energy conversion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.

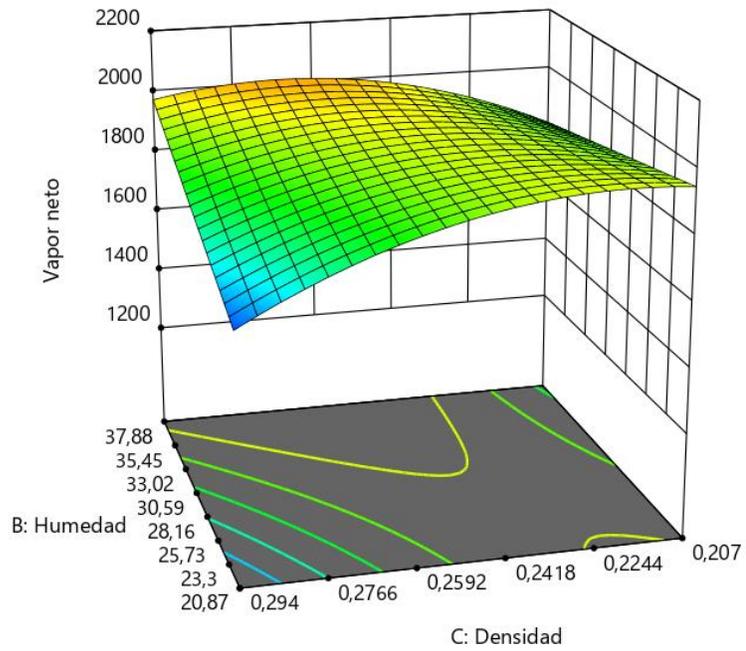
10. ANEXOS



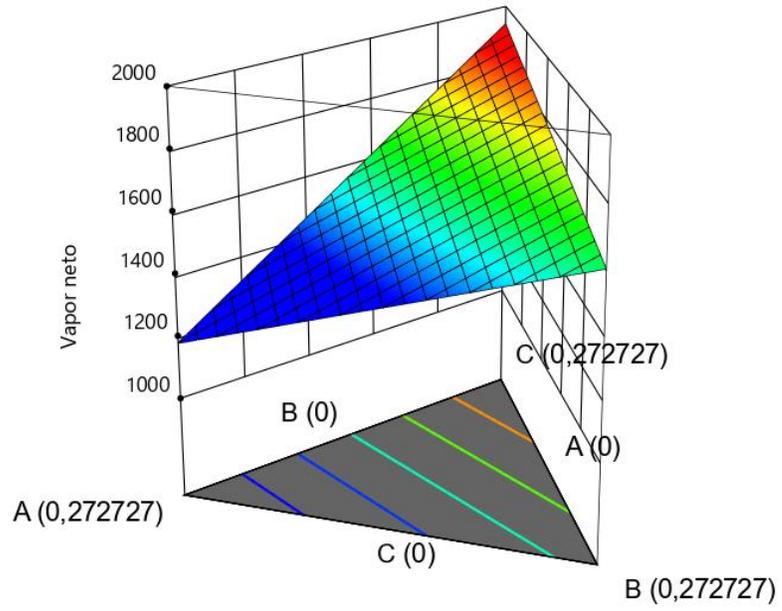
Anexo 1. Pared intermedia de la Caldera.



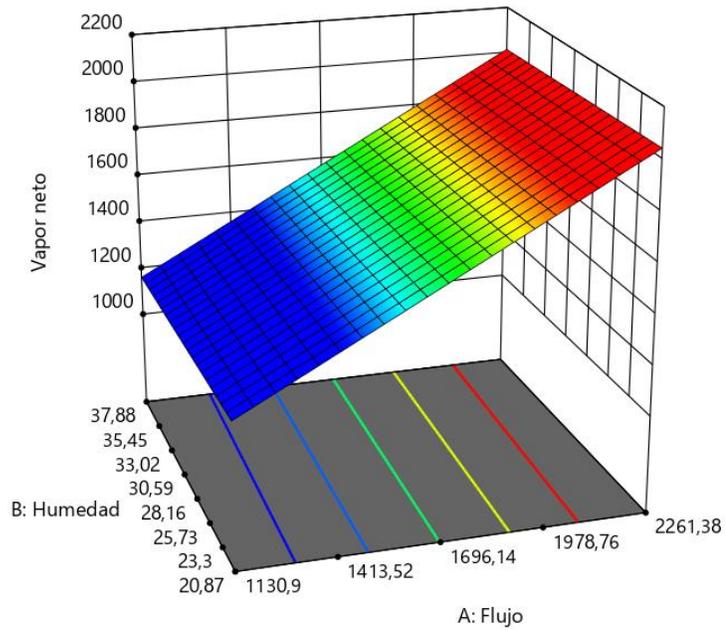
Anexo 2. Superficie de respuesta modelo de mezcla Período 1.



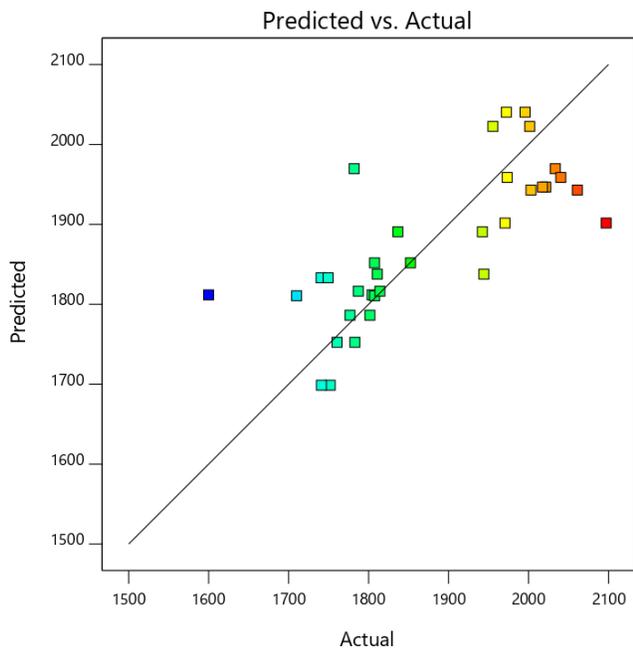
Anexo 3. Superficie de respuesta modelo de variables de proceso Período 1.



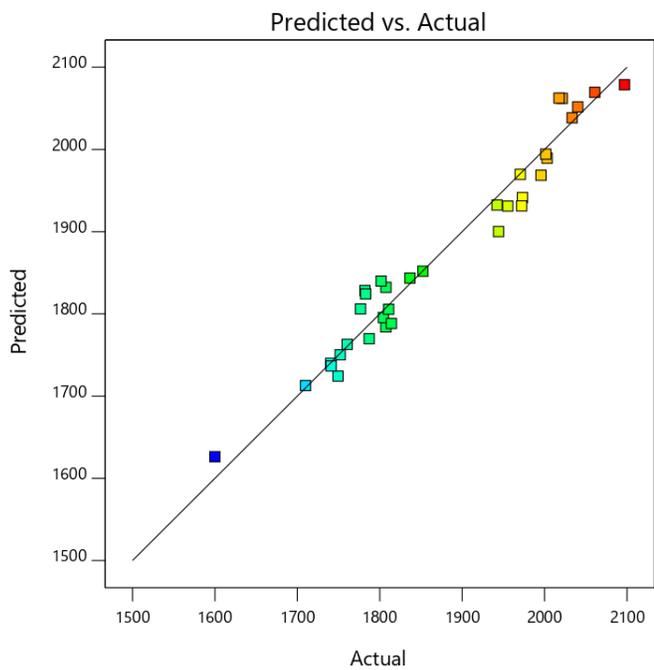
Anexo 4. Superficie de respuesta modelo de mezcla Período 2.



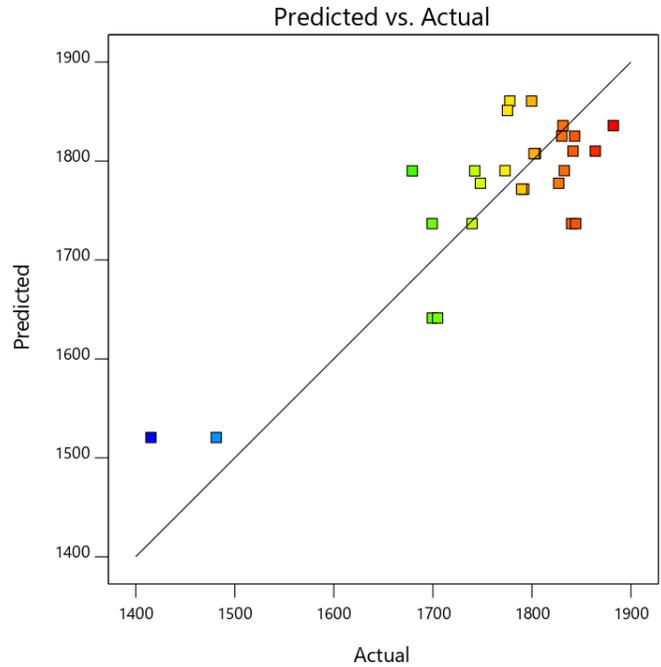
Anexo 5. Superficie de respuesta modelo de variables de proceso Período 2.



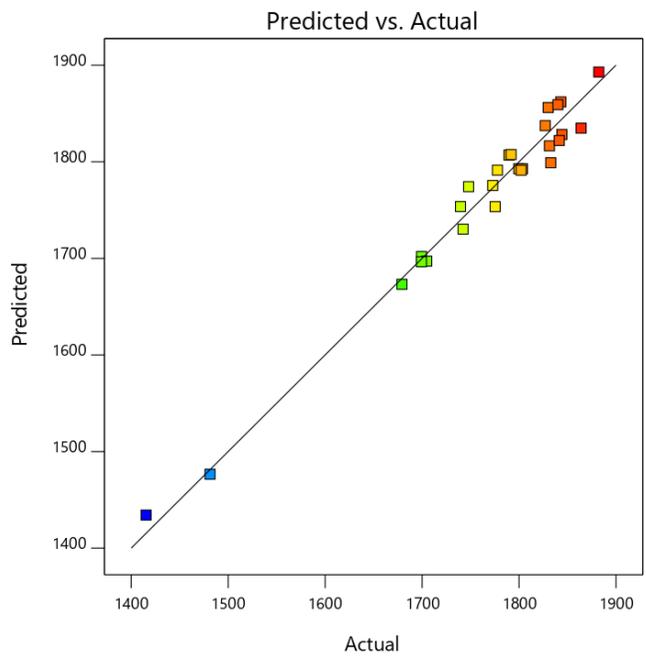
Anexo 6. Grafica de Valor predicho vs. Real, modelo mezcla Período1 (residuales).



Anexo 7. Grafica de Valor predicho vs. Real, modelo variables de proceso Período1 (residuales).



Anexo 8. Grafica de Valor predicho vs. Real, modelo mezcla Período 2 (residuales).



Anexo 8. Grafica de Valor predicho vs. Real, modelo variables de proceso Período2 (residuales).

VAPOR	Vapor Alta TON
	Vapor CPP C1
	Vapor CPP C 2 y 3
	Vapor CPP TOTAL
ENERGIA ELECTRICA	EE Generada MW
	EE Inyectada SIC MW
	EE Retirada SIC MW
	Consumo CPP MW
TIEMPOS ES/FS	Consumo EP MW
	TFS TG HR
AGUAS y CONDENSADO	TFS CALD HR
	Flujo Agua Alimentacion
	Salida Efluente M3
	Agua Planta Osmosis
CONSUMO BIOMASA	Cond CPP
	Consumo Paladas Acopio Mezcla
	Consumo Biomasa M3 Cal
	Consumo Biomasa M3 Pal
	Pesometro TON
	Densidad BH T/M3
	Humedad Día
	BDMT
	Kg Seco
	Factor conversion M3 / BDMT
	Peso H Teorico
	Dif Peso y Teo
	% Dif Peso
ESPECIFICOS	Esp VAP/BDMT >= 4,15
	Esp BDMT/MW <= 1,2
CALDERA 2 y 3	Densidad BH T/M3 C23
	Humedad Día C23
	VBP a CPP C 2 y 3
	Biomasa Cald 2 y 3 M3
	BDMT (Cald 2 y 3)
	KS (Cald 2 y 3)
	Esp VBP/BDMT C 2 y 3
	EE consumo MWH/D C2y3
	Tiempo E/S C2y3
ESECIFICOS CALDERA 1	Fuera de Servicio
	VAP/TBH
	Humedad C1
	M3 BH/VAP C1

	M3 BH/ MW C1
	M3/BDMT
	Esp VAP/BDMT
	Esp Pres. VAP/BDMT
	Esp BDMT/MW
	Esp Pres. BDMT/MW

Anexo 9. Tabla de todas las variables registradas por la empresa.