

MÁSTER EN
TECNOLOGÍAS
AVANZADAS PARA EL
DESARROLLO
AGROFORESTAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Optimización de las medidas en los sectores de Caldera de Biomasa y Digestores de la empresa Ence unidad Pontevedra



Universidad de Valladolid

Alumno: Cecilia M. de Souza

Tutor: Enrique Relea Gangas



AGRADECIMIENTOS

Me gustaría agradecer a la Fundación Carolina por el apoyo, la oportunidad y por proporcionar la beca de estudios. A la Universidad de Valladolid y al tutor del Trabajo Fin de Máster Enrique Relea por su competencia, apoyo y dedicación. A la empresa Ence - Pontevedra y todos aquellos que me han enseñado sobre el proceso de producción de celulosa y energía en España. A mis compañeros en Palencia por la amistad y experiencias compartidas. A mi familia, que mismo lejos, me apoyaron y incentivaron. Sobre todo, a Dios.



Resumen

Las empresas necesitan tener seguridad de los resultados que les proporcionan sus equipos de medida, por eso, a través de proyectos de optimización de medidas, es posible lograr informaciones con menores errores y consecuentemente mejorar el control de la calidad del proceso, las características del producto y permitir ahorro de costos debido a la disminución de fallos. De esta manera, con el apoyo del equipo de ingeniería de procesos de la empresa Ence/Pontevedra, fue posible mejorar y optimizar mediciones en los sectores de Caldera de Biomasa y Digestores. En el sector de Caldera de Biomasa fueron calibrados el medidor de sequedad de microondas y el medidor de humedad con el equipo de infrarrojo. Para el medidor de microondas fueron calibradas 3 curvas para distintos tipos de biomasa externa (biomasa comprada de otras empresas) y una curva para biomasa interna (corteza del parque de madera). Las curvas calibradas tuvieron los siguientes resultados de R^2 ajustado: 96,4% para Pino Astillado, 89,9% para Mezcla de Aprovechamiento Forestal, 70,6% para Orujillo y 56,6% para corteza del Parque de Madera. En el equipo de infrarrojo fue calibrada una curva considerando la mezcla total de biomasa interna y externa, presentando un excelente resultado con el R^2 ajustado de 99,4%. En el sector de Digestores, fueron fiabilizados los factores utilizados para el cálculo del peso de astillas en dos cintas de abastecimiento de los digestores: BC22 y BC8. El factor de 0,88 en la cinta BC22 se ha cambiado para 1,00 y el factor de 0,82 de la cinta BC8 se ha cambiado para 0,85.

Palabras claves: Optimización de medidas, Fiabilidad, Empresa ENCE/Pontevedra, Caldera de Biomasa, Digestores.



Sumario

1. La empresa Ence.....	6
2. Proyectos Optimización en la empresa Ence unidad Pontevedra	6
3. Optimización de las medidas sequedad de la biomasa con el equipo de microondas (BMA) para la gestión del parque de biomasa	8
3.1 Introducción.....	8
3.2 Metodologías.....	12
3.3 Resultados.....	14
3.4 Conclusiones.....	17
4. Optimización de las medidas humedad de la biomasa con el equipo de infrarrojo cercano (Process Sensors) para la gestión de producción de energía	18
4.1 Introducción.....	18
4.2 Metodologías.....	18
4.3 Resultados.....	20
4.4 Conclusiones.....	21
5. Optimización del factor de conversión del peso de astillas en la báscula dinámica para el abastecimiento de los digestores	21
5.1 Introducción.....	21
5.2 Metodologías.....	22
5.3 Resultados.....	24
5.4 Conclusiones.....	26
6. Conclusiones Generales.....	27
7. Bibliografía.....	27



Índice de Figuras

Figura 1: Producción de la biomasa en el parque de maderas a partir del descortezamiento de los troncos realizado por el tambor descortezador.	9
Figura 2: Participación de la biomasa externa Ence/Pontevedra – entre enero a abril de 2018.	10
Figura 3: Representación de una caldera con lecho fluidificado.....	10
Figura 4: Principio de la medición de la humedad por el equipo de microondas.	12
Figura 5: Tipos de biomosas calibrados: Corteza del Parque de Madera (1), Mezcla de Aprovechamiento Forestal (2), Pino Astillado (3) y Orujillo (4).	13
Figura 6: Etapas del proceso de colecta de muestras, análisis y calibración.	13
Figura 7: Calibración de las curvas de cuatro tipos de biomasa.....	16
Figura 8: Foto del equipo de infrarrojo – medidor de humedad.	19
Figura 9: Calibración de la curva para el equipo medidor de humedad – infrarrojo.	20
Figura 10: Medición de la humedad de biomasa por el equipo de infrarrojo después de la calibración.	21
Figura 11: Localización de las cintas para carga de astillas y básculas para medición del peso de astillas.	22
Figura 12: Fotos del test de la báscula de astillas.....	23
Figura 13: Pantallazo de la página del software para cálculo del peso de las astillas.	24
Figura 14: Gráfica de probabilidad de las diferencias de los factores observados.	25
Figura 15: Gráfica de linealidad y sesgo del sistema de medición para las cintas BC8 y BC22.	25
Figura 16: Gráfica con los valores medios de los factores actualizados para las cintas BC8 y BC22.....	26

Índice de Tablas

Tabla 1: Planificación de los números de muestras para hacer la calibración.....	14
Tabla 2: Numero de muestras analizadas para cada tipo de biomasa.	15
Tabla 3: Tabla para comparación del factor de corrección del peso actual con el factor corregido.	24



1. La empresa Ence

Ence Energía y Celulosa es una empresa española dedicada a la transformación de madera procedente de cultivos forestales para uso industrial con la producción de pasta de celulosa. Con sus fábricas en Pontevedra (Galicia) y Navia (Asturias) la empresa es considerada líder europeo en fabricación de celulosa de eucalipto, con una capacidad de producción de 930.000 toneladas/año de celulosa de alta calidad (ENCE, 2018).

La fábrica trabaja con madera producida en su mayor parte en cultivos forestales de Galicia, así como con otros procedentes del Norte de Portugal. La mayor parte de la producción de celulosa es convertida por los clientes de Ence en papel tisú y más del 85% de su producción es exportada a Europa, donde se encuentran los más exigentes clientes del mercado mundial. Por eso, utiliza tecnologías respetuosas con el medio ambiente y procesos de mejora continua para reforzar su competitividad y su calidad (ENCE, 2018).

En relación al tipo de celulosa producido, la fábrica de Ence en la capital de las Rías Baixas (Pontevedra) se trata de una de las dos únicas fábricas de Europa que produce pasta de papel totalmente libre de cloro, lo que ha hecho de su fábrica gallega una de las primeras del mundo en desempeño ambiental en su sector.

Además de la producción de celulosa, es la primera empresa española en producción de energía renovable con biomasa agroforestal. Genera esta energía en sus plantas de Huelva, Mérida, Ciudad Real, Jaén y Lucena, Córdoba (España) y también en las plantas de cogeneración con biomasa derivada del proceso de extracción de celulosa de sus fábricas situadas en Navia y Pontevedra.

La empresa tiene actualmente 254 MW de potencia instalada en energía renovable a partir de biomasa, siendo cogenerada la electricidad y el calor que necesita para sus actividades industriales y vendido el excedente de su producción al Sistema Eléctrico Nacional. La producción anual de energía eléctrica es de más de 1.400 GWh.

2. Proyectos Optimización en la empresa Ence unidad Pontevedra

Según Míkva et. al (2016), una organización que quiere tener éxito y ser competitiva, siempre debe estar orientada al cliente, responder de manera flexible a todas las necesidades y requisitos, así como a los cambios rápidos e inesperados en el mercado y proporcionar a sus clientes productos de alta calidad.



Ence como líder europeo en la producción de celulosa a partir de eucalipto y también productora de energía renovable, está enfocada en ofrecer de manera eficiente soluciones a las necesidades de los clientes y la calidad de los productos a un precio competitivo. De esta manera, posee un equipo de ingeniería de procesos que busca la mejora continua de los procesos para proporcionar la mejor calidad del producto para sus clientes.

Uno de los puntos principales para mejorar la calidad se basa en los análisis y comparaciones del proceso, donde es importante que las mediciones sean correctas, pues es gracias a la medición que se conocen las deficiencias de calidad y se puede actuar en las acciones correctoras, sirviendo para que la organización aprenda con sus errores (Merino et. al, 2003).

De los muchos proyectos de mejora que la empresa tiene, todos en una parte del proceso implican la optimización o fiabilización de medidas. De esta manera, para lograr un alto nivel de calidad en el servicio, este Trabajo Final de Máster desarrollado en Ence tiene como objetivo optimizar los procesos de los siguientes sectores:

- Caldera de Biomasa: Optimización de las medidas de sequedad de la biomasa con el uso del equipo de microondas (BMA- biomass moisture analyzer). El objetivo es mejorar la gestión de abastecimiento de la caldera de biomasa, además de agilizar y reducir los costes de la medición de sequedad que actualmente es hecha en laboratorio solamente para el pago de la biomasa externa (pago de la materia seca comprada).
- Caldera de Biomasa: Optimización de las medidas de humedad de la biomasa en la cinta de la caldera por un equipo online de infrarrojo cercano (Process Sensors). El objetivo es aumentar la precisión de las medidas para mejorar la gestión de abastecimiento de la caldera de biomasa y ser un indicador de cuándo y cuánto fuel debe ser utilizado para la producción de energía.
- Digestores: Optimización del factor de conversión del peso de las astillas en la báscula dinámica ubicada en la entrada de los digestores. El objetivo es aumentar la precisión de este factor, siendo posible mejorar la gestión de consumo de químicos e indicar el consumo real de madera en el proceso.



3. Optimización de las medidas sequedad de la biomasa con el equipo de microondas (BMA) para la gestión del parque de biomasa

3.1 Introducción

La energía renovable con biomasa tiene un enorme potencial de desarrollo, principalmente porque este es uno de los tipos de energía renovable que presenta un balance económico positivo por los beneficios generados dada su capacidad de creación de empleo, de desarrollo del medio rural y de contribución a la mejora del medio ambiente, tanto a través de la captura de CO₂ como del cuidado y limpieza de los montes, con una reducción del riesgo de incendios.

De esta manera, España, siendo considerada el segundo país de la Unión Europea en superficies forestales, posee grandes ventajas para producción de energía renovable a partir de biomasa. Aprovechando este potencial, Ence fue la primera empresa de España en producción de energía renovable con biomasa forestal y agrícola.

Del total de 254 MW que la compañía cuenta de potencia instalada en energía renovable a partir de biomasa, la fábrica de Pontevedra tiene 35 MW año siendo prácticamente autosuficiente en materia de energía, es decir, genera casi toda la energía renovable que consume en su proceso industrial. (ENCE, 2018).

Para ello, la empresa utiliza como materia prima residuos del proceso de producción de la pasta celulósica, en distintos procesos:

- Caldera de Recuperación: utiliza el llamado licor negro, que se obtiene como resultado del proceso de cocción de la madera (sustancia con alto contenido de lignina).
- Caldera de Biomasa: utiliza como combustible la biomasa interna (principalmente corteza de los troncos de madera) y la biomasa externa (compra de biomasa de otras fábricas, residuos de podas, entre otros).

La caldera de biomasa funciona con combustibles basados en desechos naturales, pudiendo utilizar como combustibles el pellet, la leña, el hueso de aceituna, etc. En Ence Pontevedra los combustibles para la caldera de biomasa provienen de dos fuentes, la biomasa interna con 60-70% de participación y la biomasa externa representando 40-30% del total.

La biomasa interna en su mayor parte es compuesta por un residuo de la producción de celulosa que es la corteza de los troncos de madera. Parte de la madera que llega a la fábrica viene con corteza, que es indeseable en el proceso de producción de celulosa pues tiene un pequeño contenido de fibras de celulosa y posee compuestos químicos que dificultan el proceso de blanqueo del producto final.

Debido a esto, se elimina la corteza de la madera en un equipo llamado tambor descortezador que, al moverse en su propio eje, hace que las maderas en su interior se friccionen entre sí (fuerza de rozamiento), eliminando la corteza (figura 1).

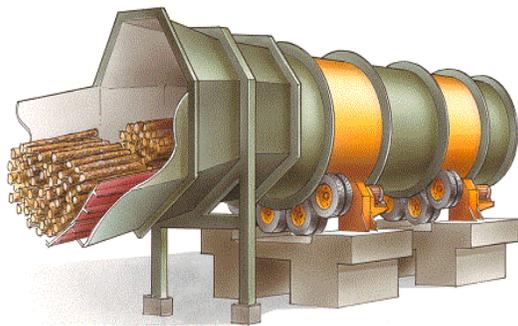


Figura 1: Producción de la biomasa en el parque de maderas a partir del descortezamiento de los troncos realizado por el tambor descortezador.

Además de la corteza se pueden utilizar como biomasa interna en menor proporción:

- Nudos: el desecho de los digestores cuando la madera es mal cocida.
- Biolodos: residuos de la depuradora.
- Barreduras: son los residuos de corteza, pequeños trozos de madera, que quedan en el suelo del parque de madera.

A diferencia de la biomasa interna, la biomasa externa es comprada, es decir, son los residuos de otras empresas. Hay distintos tipos de biomasa externa como, por ejemplo: mezcla de aprovechamiento forestal (corteza, hojas, astillas), orujillo, residuos de aserrados, paja, corteza de pino o de eucalipto, etc.

La mayor proporción de la biomasa externa utilizada es del tipo mezcla de aprovechamiento forestal, pino astillado-triturado, orujillo y pino corteza restos, respectivamente (figura 2).

Para abastecer las necesidades industriales, estas biomásas son quemadas en calderas de biomasa, y a partir de la combustión de estos materiales se produce energía térmica y eléctrica mediante turbinas.

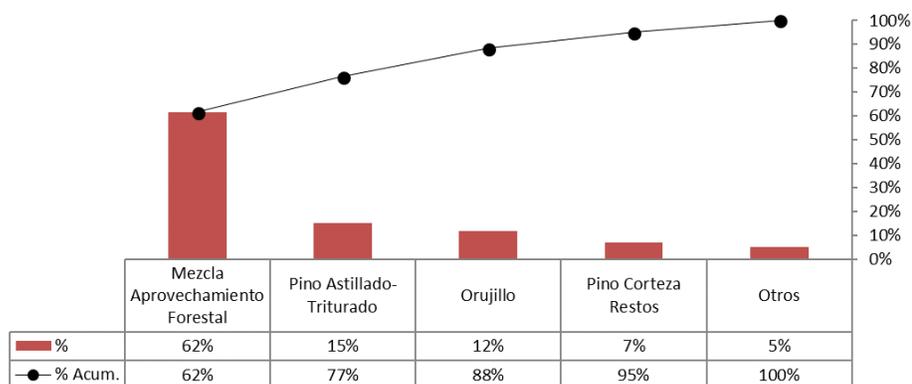


Figura 2: Participación de la biomasa externa Ence/Pontevedra – entre enero a abril de 2018.

La Caldera de Biomasa de Pontevedra es una caldera que emplea una tecnología de “lecho fluidificado burbujeante”, y está diseñada para la combustión de corteza/biomasa (figura 3). La fluidificación es el fenómeno por el cual un lecho de partículas sólidas levita en el seno de un gas, adquiriendo un comportamiento que se asemeja al de un fluido. Es una tecnología de combustión que permite una mayor flexibilidad en el uso de combustible, y una mejor transferencia del calor producido durante la combustión (Sher et al., 2017).

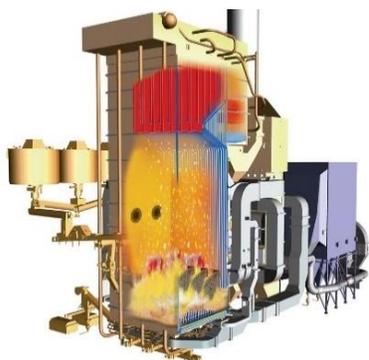


Figura 3: Representación de una caldera con lecho fluidificado.

Un lecho fluido está formado por el combustible en pedazos (aproximadamente es un 2-5% del peso total del lecho) y el lecho propiamente dicho (cenizas, arena, caliza, material adicional), siendo la temperatura limitada a 850-900°C, no permitiendo la fusión ni la sinterización del lecho (Sher et al., 2017).

El proceso para obtención de energía es la combustión. En las calderas de biomasa la combustión se lleva a cabo en tres fases (Nussbaumer, 2003):

- FASE 1 - Secado de la biomasa: tiene por finalidad evaporar el agua contenida en la corteza. Esto requiere de un tiempo de permanencia de la corteza en el lecho



fluido sin que se lleve a cabo la combustión. En este punto es importante que el lecho presente una homogeneidad en turbulencia y temperatura para un rápido secado y evitándose así un retardo en el secado y posterior acumulación de corteza en el lecho.

- FASE 2 - Gasificación parcial: las partículas más pequeñas se queman rápidamente encima del lecho fluidificado y las partículas más gruesas se mezclan en el lecho secándose y gasificándose parcialmente.
- FASE 3 - Combustión de biomasa seca y productos de gasificación: los gases producidos en la gasificación de la corteza y la corteza tras su secado combustionan en el lecho liberando gases a alta temperatura.

Cuando el combustible se introduce en el lecho se calienta rápidamente y, superada su temperatura de ignición, se enciende y pasa a formar parte de la masa incandescente del hogar. Esta energía, en parte, es retenida por la arena de fluidificación y otra parte va contenida en los gases de combustión. Toda esta energía es transferida a los tubos de la caldera para aumentar la temperatura del agua y producir vapor.

Para una mayor producción de energía, es importante que la biomasa tenga un alto valor de poder calorífico y bajo contenido de agua. Para eso la empresa ya posee una curva de poder calorífico inferior para cada tipo de biomasa que en mayor proporción es consumida en la caldera, pero cómo las mezclas de biomasa son muy variadas, y además el análisis de poder calorífico es caro y difícil de evaluar, la empresa identificó la necesidad de gestionar la biomasa a partir de la humedad (cantidad de agua en el material) o de la sequedad (cantidad de materia seca en el material) que es una otra manera de cuantificar el contenido del agua.

Teniendo en cuenta la dosificación de cada tipo de biomasa y los valores del contenido de agua en ella, es posible gestionar mejor la producción de energía y poder tomar decisiones de cuál tipo y la cantidad ideal de biomasa que se debe quemar en la caldera, sin necesidad de consumir fuel que tiene un alto valor comercial.

Cuando se trata de consumo de biomasa externa, para la compra del material, la empresa también necesita saber el contenido de agua en la biomasa para realizar el pago. Para eso, el laboratorio de la empresa utiliza la metodología de estufa para obtener este valor. Es un análisis caro y se tarda 24 horas para tener el resultado final.

De esta manera, viene la necesidad de adoptar un equipo que mida la humedad o sequedad en el patio de biomasa (interna y externa), para mejorar la gestión del parque separando la biomasa más húmeda de la más seca, y haciendo el mix ideal, para producción de energía evitando el consumo de fuel. Además se consigue determinar el contenido de agua de biomasa externa de una forma práctica, rápida y eficiente para el pago del material seco.

Para esto, el objetivo del proyecto es la utilización del mismo equipo de microondas (BMA) que actualmente es utilizado para medir sequedad en astillas, para medir la sequedad en la biomasa.

3.2 Metodologías

Ence posee en uno de sus laboratorios un medidor de sequedad llamado BMA que funciona por el método de microondas. La medición se basa en las propiedades eléctricas y únicas del agua que contiene cada muestra de biomasa (Senfit, 2018).

El analizador BMA está conectado a un ordenador, que funciona como un interfaz para el usuario y también como almacenamiento de datos, siendo posible también exportarlos en un archivo de Excel (figura 4).



Figura 4: Principio de la medición de la humedad por el equipo de microondas.

La metodología de la fiabilización del equipo se basa en la creación de distintas curvas de calibración para cada tipo de biomasa. Para esto, los resultados del medidor de sequedad fueron comparados con los valores de sequedad obtenidos de la misma muestra por el método de medición por estufa.

De esta forma, fueron calibradas cuatro diferentes curvas para los tipos de biomasa más utilizados como combustibles en la caldera (figura 5):

- Corteza del Parque de Madera (biomasa interna)
- Mezcla de Aprovechamiento Forestal (biomasa externa)

- Pino Astillado (biomasa externa)
- Orujillo (biomasa externa)



Figura 5: Tipos de biomazas calibrados: Corteza del Parque de Madera (1), Mezcla de Aprovechamiento Forestal (2), Pino Astillado (3) y Orujillo (4).

Las etapas de la metodología se recogen en la figura 6. Diariamente, muestras de estos cuatro tipos de biomasa fueron recogidas en el patio de almacenamiento de biomasa (1). La cantidad diaria recogida dependía del funcionamiento del parque de madera (para producción de corteza) y de la llegada de los camiones de biomasa externa. Las muestras eran puestas en bolsas herméticas e identificadas por el tipo de biomasa, hora, fecha y la empresa de origen (2).



Figura 6: Etapas del proceso de colecta de muestras, análisis y calibración.

En seguida, eran llevadas para el laboratorio donde se ubica el equipo de microondas para los análisis de sequedad. La biomasa era molida en un molino del equipo (3) para tener un aspecto homogéneo, y posteriormente eran pesados 400 gramos del material (4). Finalmente, las muestras eran analizadas en el equipo (5, 6 y 7) de manera automática haciendo una compensación con la temperatura de la biomasa. Cada muestra fue analizada tres veces en el equipo de microondas para asegurar una buena repetitividad.



Después de medir la sequedad, inmediatamente, las muestras eran llevadas para otro laboratorio para medir la sequedad de referencia, mediante la metodología en estufa (8). También se hicieron triplicadas para asegurar una buena repetitividad, a partir del peso húmedo y del peso seco obtenido después de dejar en la estufa (9) a 120 grados por 24 horas. Las sequedades a partir de la metodología en estufa fueron calculadas según la fórmula siguiente:

$$\text{Sequedad (\%)} = 100 - \left(\frac{\text{Peso húmedo} - \text{Peso seco}}{\text{Peso húmedo}} \times 100 \right)$$

Los promedios obtenidos de cada muestra de los datos de estufa eran agregados en el programa del equipo (10) para hacer la calibración después de obtener el número ideal de muestras para cada tipo de biomasa (tabla 1).

Tabla 1: Planificación de los números de muestras para hacer la calibración.

Tipo Biomasa	N. Muestras Calibración (con repeticiones)	N. Muestras Calibración (sin repeticiones)
Mezcla A. Forestal	150	50
Orujillo	60	20
Corteza Parque de Maderas	150	50
Pino Astillado	60	20
Total	420	140

Para obtener el resultado de cada calibración, el equipo recalcula los datos de sequedades medidos a partir del resultado de la estufa, creando las curvas para cada tipo de biomasa conforme la foto presentada en la figura 6 en el número 11.

Los resultados de la calibración fueron evaluados utilizando el software Minitab para análisis del R^2 ajustado y de la correlación de Pearson entre los resultados de la estufa (referencia) y los resultados del equipo de microondas. También se analizaron los residuos estadísticos de la curva creada para cada tipo de biomasa.

3.3 Resultados

Después de analizar la sequedad de todas las muestras, la calibración fue hecha creando una curva para cada tipo de biomasa a partir de la comparación entre valores de sequedad del equipo, teniendo como referencia los datos de la estufa. En total fueron analizadas 188 muestras de biomasa, conforme la tabla 2.

En la figura 7, se observan los resultados obtenidos de la calibración, que fueron todos estadísticamente significativos. El tipo de biomasa que tuvo mejor resultado fue el Pino



Astillado con un R^2 ajustado de 96,4% y una correlación de Pearson de 98,2%, seguido de Mezcla de Aprovechamiento Forestal con R^2 ajustado de 89,9% y correlación de 94,8%, Orujillo con R^2 ajustado de 70,6% y correlación 84,5% y por último la corteza del Parque de Madera con R^2 de 56,5% y correlación de 75,4%.

Tabla 2: Numero de muestras analizadas para cada tipo de biomasa.

Tipo Biomasa	N. Muestras Calibración (con repeticiones)	N. Muestras Calibración (sin repeticiones)	Ideal (sin repeticiones)
Mezcla A. Forestal	279	93	50
Orujillo	63	21	20
Parque de Maderas	162	54	50
Pino Astillado	60	20	20
Total	564	188	140

Los residuos de un modelo ajustado son las diferencias entre las variables explicativas (valor referencia – estufa) y las respuestas observadas (medición del BMA) correspondiente de la predicción calculada utilizando la función de regresión. Para que una regresión sea valida es ideal que los residuos tengan tres criterios: normalidad, homogeneidad y independencia.

En relación al criterio de normalidad de los residuos, las gráficas de probabilidad normal y el histograma de residuos sugieren que todas las calibraciones tuvieron una distribución normal, presentando los errores (residuos) valores próximos a cero. Es decir, la relación entre las variables explicativas y la variable de respuesta es una relación estadísticamente válida e indica que el modelo se ajusta bien a los datos.

Las gráficas de residuos vs. ajuste y residuos vs. orden se utilizan para verificar el supuesto de que los residuos presentan una varianza constante (homogéneos) y que son independientes entre sí.

En todas las calibraciones se observa en la gráfica residuos vs. ajuste que los errores se ubican de manera homogénea en ambos lados del cero, aproximándose a este valor, lo que indica que no hay una tendencia de grupos y los datos pueden ser estudiados de manera conjunta.

En relación a las gráficas de residuos vs. orden, todos los casos, presentan los residuos ubicados alrededor de la línea central y no muestran tendencias ni patrones cuando están en orden cronológico (orden de observación). Esto indica que no hace falta estudiar otras variables que puedan influir en una tendencia de los errores a aumentar o disminuir con el orden de observación.

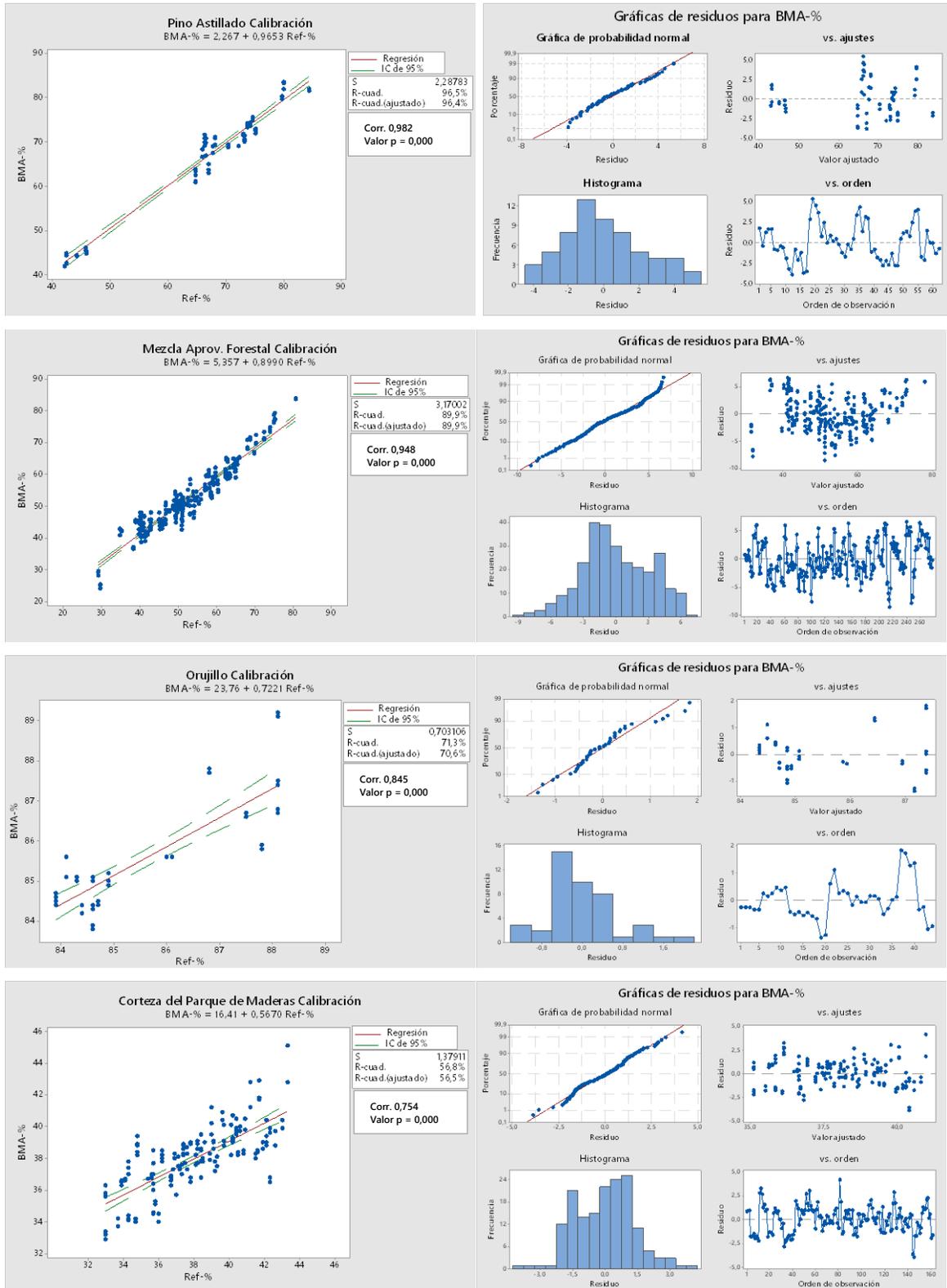


Figura 7: Calibración de las curvas de cuatro tipos de biomasa.



El buen resultado para los tipos de Pino Astillado y de Mezcla de Aprovechamiento Forestal se deben al aspecto de esta biomasa, una vez que estos dos tipos son los que más se parecen a astillas, es decir, el mismo material para el que el equipo ya está calibrado en el proceso de producción de celulosa, siendo más fácil reconocer el material y determinar la sequedad. Los otros materiales tienen un aspecto distinto de las astillas, ya que el Orujillo se usa con un formato de pellets y la Corteza del Parque de Maderas con una forma más parecido a fibras.

Otra de las posibles causas para que el material del Parque de Maderas tenga un peor ajuste es la facilidad de perder el contenido del agua en la muestra, es decir, como el material son partículas parecidas a fibras, son más finas y tienen mayor área específica, lo que facilita el secado. Además, este es el tipo que tiene mayor contenido de agua, cerca de 65 a 75% de humedad (o 35 a 25% de sequedad), lo que contribuye a una mayor facilidad para perderla durante el manejo de las muestras en los análisis.

Por esto, sería necesario mejorar la metodología para evitar los errores de la calibración para biomasa del Parque de Maderas. Una opción sería no realizar la etapa de la metodología de poner la muestra en el molino, pues la biomasa del Parque de Maderas son cortezas que tienen un aspecto homogéneo. Así, sería posible agilizar el proceso de medición de sequedad y evitar la exposición del material al aire, disminuyendo la pérdida del agua.

3.4 Conclusiones

Las curvas de calibración para los cuatro tipos de biomasa presentaron buenos resultados, siendo mejor para el Pino Astillado, Mezcla de Aprovechamiento Forestal y Orujillo, con R^2 ajustado de 96,4%, 89,9% y 70,6%, respectivamente.

La biomasa Corteza del Parque de Maderas (corteza), tuvo una peor calibración en relación a los otros tipos con el R^2 ajustado de 56,5%. La dificultad de obtener la mejor calibración es debido al mayor contenido de agua del material y la facilidad de perder humedad durante el manejo de la muestra en los análisis, por tener el formato de fibras con mayor área específica.

En relación a las ganancias del proyecto en relación a cuestiones financieras y de agilidad del proceso de medición del contenido de agua de las muestras del patio de almacenamiento, este resultado del tipo corteza del Parque de Maderas no influye mucho, una vez que, a diferencia de la biomasa externa, no es necesario un valor muy preciso,



pues no es un material que se compra. Es decir, no se utiliza el valor de sequedad para negociaciones del precio de la biomasa.

No obstante, para fines de gestión del patio de biomasa es importante buscar metodologías para evitar la rápida pérdida de agua del material, evitando los errores de la calibración para biomasa del Parque de Maderas, pues este tipo representa la mayor proporción de la biomasa total quemada en la caldera, cerca de 60-70%.

4. Optimización de las medidas humedad de la biomasa con el equipo de infrarrojo cercano (Process Sensors) para la gestión de producción de energía

4.1 Introducción

Además del proyecto de optimización de medidas de la sequedad de la biomasa en el patio de almacenamiento, la empresa también pretendía fiabilizar el equipo de infrarrojo localizado en una cinta de abastecimiento de la caldera.

Este equipo mide la humedad segundos antes de ser quemada. Es una medición continua a cada segundo, lo que ayuda en los análisis de la producción de energía. Si la mezcla de biomasa (interna y externa) está más o menos húmeda, el operador de la caldera sabe cuándo hay que dosificar más o menos fuel para obtener la producción de energía ideal.

Mientras el equipo está en funcionamiento, la unidad de mejora continua de la empresa observó que se podría mejorar la precisión para que el valor medido sea más próximo al real, siendo posible reducir el consumo de fuel que es una de las materias primas más caras en el proceso de producción de energía. De ahí viene la necesidad de optimizar las medidas del equipo infrarrojo.

4.2 Metodologías

El equipo Process Sensors es un sensor en línea que ofrece informaciones inmediatas para la operación sobre los parámetros de humedad con un procesamiento en tiempo real. Este sensor se localiza en la cinta de biomasa que alimenta la caldera (figura 8).

La metodología utilizada en este trabajo se basa en la comparación de la humedad obtenida en el equipo de infrarrojo con la humedad real en estufa. De esta manera, muestras de biomasa total (mezcla de biomasa interna y externa) eran recogidas en la cinta y eran secadas en estufa a 120 grados durante 24 horas para obtener humedad 0%. Después de obtener las muestras secas, se echaba agua de acuerdo con la humedad de

la muestra deseada. La preparación de 18 muestras fue hecha con humedades en un rango entre 30% hasta 70%, que es el rango de humedad en que las biomásas llegan a caldera.

Estas muestras preparadas eran puestas en la cinta de biomasa y analizadas en el equipo. En una misma muestra, se hacían cinco mediciones con el equipo, revolviendo y midiendo la muestra en distintos puntos, garantizando una buena repetitividad del proceso.



Figura 8: Foto del equipo de infrarrojo – medidor de humedad.

Después de medir la humedad en el equipo, inmediatamente, las muestras eran llevadas para otro laboratorio para medir la humedad por el método de la estufa. Para cada muestra se hicieron por triplicado pesando el peso húmedo y el seco después de dejar en la estufa a 120 grados por 24 horas. Las humedades fueron calculadas según la fórmula siguiente:

$$\text{Humedad (\%)} = \frac{\text{Peso húmedo} - \text{Peso seco}}{\text{Peso húmedo}} \times 100$$

Los promedios obtenidos de los datos de estufa eran comparados con el promedio de los resultados del equipo de infrarrojo y a partir de los resultados la empresa responsable por el equipo hacía los cambios de los parámetros del equipo (según la curva de calibración). Después del equipo ya calibrado, nuevas muestras fueron preparadas para medirlas en el infrarrojo y comprobar si el equipo era o no fiable.

Los resultados de la calibración del equipo y de la medición de humedad de las muestras después de la calibración fueron evaluados utilizando el software Minitab. Se analizaron el R² del ajuste y de la correlación de Pearson entre los resultados de la estufa (referencia) y los resultados del equipo de infrarrojo. También se analizaron los residuos estadísticos de la curva creada para determinar la humedad de la biomasa.

4.3 Resultados

Al final, fueron hechas tres pruebas para la calibración del equipo con un total de 18 muestras (figura 9).

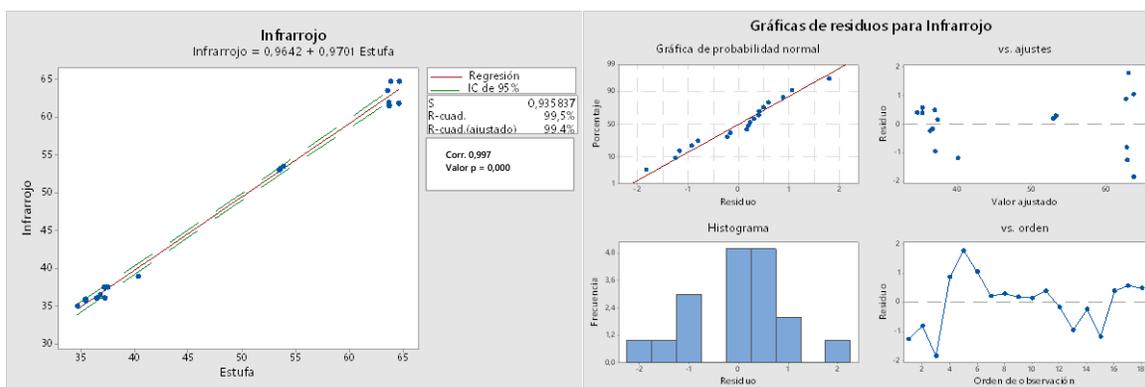


Figura 9: Calibración de la curva para el equipo medidor de humedad – infrarrojo.

La curva para calibración del equipo presento un buen resultado, con 99,4% de R^2 ajustado y una correlación de Pearson de 99,7%, es decir el equipo tiene una excelente precisión.

De acuerdo con las gráficas de probabilidad normal y el histograma de residuos, sugieren una distribución normal con errores próximo a cero, lo que indica que el modelo ajustado para el equipo BMA se ajusta bien a los datos.

Al analizar las gráficas de residuos versus ajuste y residuos versus orden, se observa que los errores tienen una varianza constante y que son independientes entre sí. Es decir, los errores se ubican de manera homogénea en ambos lados del cero aproximándose a este valor, sin tener una tendencia de grupos (los datos pueden ser estudiados de manera conjunta). Además, los errores no presentan tendencias cuando están en orden cronológico (orden de observación), indicando que no hace falta estudiar otras variables que puedan influir en una tendencia de los errores a aumentar o disminuir con el orden de observación.

Al realizar una nueva prueba con otras muestras de corteza comprobamos que el equipo sigue midiendo bien, con una precisión de 98,8%, lo que indica que el equipo es fiable (Figura 10).

A pesar del excelente resultado, se observa un punto atípico o también llamado "outlier" (círculo rojo en la figura 10). Al eliminar este punto se observa que mejora el ajuste, pero no influye mucho en la pendiente y la intersección de la ecuación ajustada: el R^2 ajustado

se cambia de 98,8% para 99,8% y la correlación de Pearson cambia de 99,5% para 99,9%. Esto indica que este punto fue un posible error en el manejo de la muestra durante el proceso de análisis en el equipo.

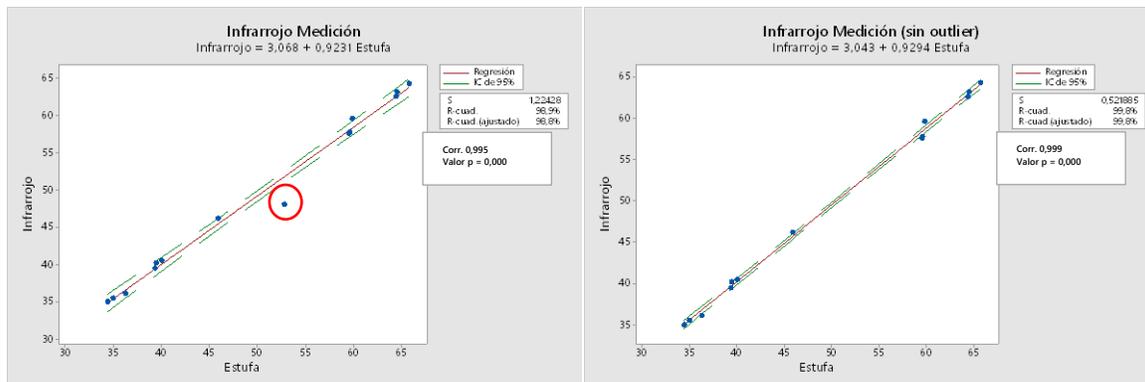


Figura 10: Medición de la humedad de biomasa por el equipo de infrarrojo después de la calibración.

4.4 Conclusiones

La curva de la calibración para el equipo de infrarrojo cercano presentó un excelente resultado, con un R^2 ajustado de 99,4%, de tal forma que después de la calibración la relación entre valores medidos y valores de referencia (análisis en estufa) presentaron un R^2 ajustado de 98,8%.

A partir de estos resultados, se considera el equipo fiable, contribuyendo para las tomas de decisiones de cuándo y cuanta cantidad de fuel debe ser añadida en la quema de biomasa, de acuerdo con los valores de las humedades.

5. Optimización del factor de conversión del peso de astillas en la báscula dinámica para el abastecimiento de los digestores

5.1 Introducción

En el proceso de producción de la pasta de celulosa las astillas de madera tienen que ser cocidas en un equipo llamado digestor. Este equipo funciona como una olla grande de presión para la que, de acuerdo con el peso, volumen y sequedad de las astillas, se calcula la cantidad de químicos, presión, temperatura y tiempo de cocción para producir la pasta celulósica.

Para saber del peso de astillas la empresa posee una báscula dinámica que tiene un factor de corrección para el cálculo del peso a partir del caudal de astillas (datos obtenidos

a cada segundo en tonelada/hora). Los factores son distintos de acuerdo con la cinta que mueve las astillas en la báscula, siendo el factor de 0,82 para la cinta BC8 y 0,88 para la cinta BC22.

La figura 11 presenta la pantalla del sistema de control del funcionamiento de la carga de astillas, siendo los cuadros en rojo las dos diferentes cintas y las flechas rojas donde se localizan las básculas para medición.

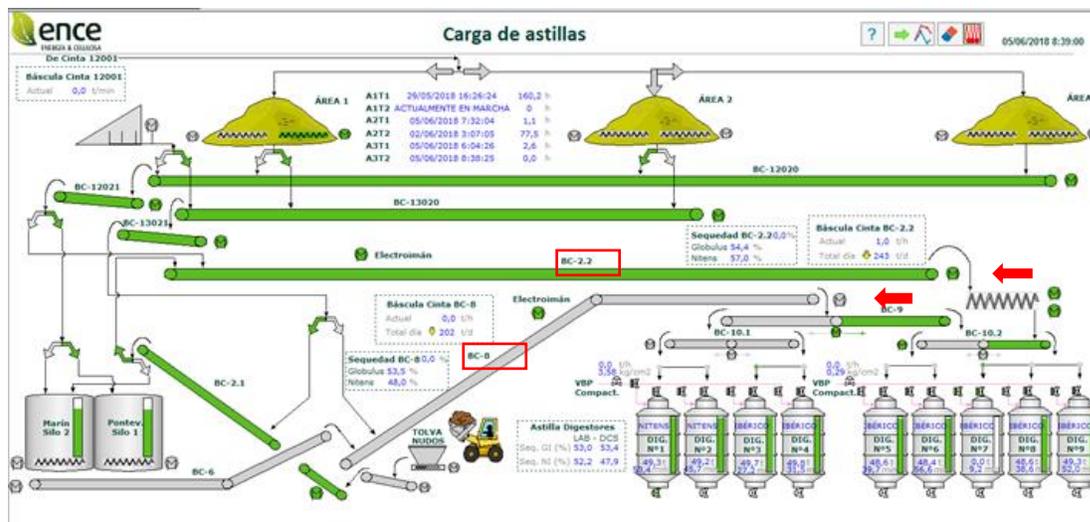


Figura 11: Localización de las cintas para carga de astillas y básculas para medición del peso de astillas.

A pesar de que la calibración de la báscula es realizada semanalmente, para evitar grandes oscilaciones en la velocidad de la cinta y consecuentemente variaciones en el caudal, en los últimos tiempos se observó la necesidad de cambiar el método de calibración haciendo también pruebas con un peso conocido de astillas. Así es posible una optimización del proceso con el cambio del factor de conversión del volumen en peso, y posiblemente, obtener una mayor precisión en la dosificación de los químicos.

5.2 Metodologías

Para optimizar el factor de conversión del peso en la báscula, fue construido un recipiente con una capacidad de 20 toneladas de astillas. La metodología se basa en cinco etapas:

1. Pesar un camión de astillas con aproximadamente 14-16 toneladas en una báscula ya fiabilizada. Con la diferencia entre el peso del camión lleno y vacío se obtiene el peso bruto y neto. Este peso será considerado como el Peso Real.
2. Las astillas son depositadas en un parque.



3. Con la ayuda de un camión pala se transfieren todas las astillas para el recipiente acoplado a una cinta que va en dirección a los digestores (figura 12).
4. Al empezar la carga en un digestor, el equipo de digestores debe ser accionado vía emisora para mover la cinta, para que las astillas pasen en la báscula dinámica (Peso Medido por Báscula).
5. En la oficina se hacen los cálculos del peso de astillas con ayuda del software de la empresa a partir del caudal de astillas (figura 13). Este valor es comparado con el peso real obtenido por el peso del camión.
6. Finalmente se hacen los cálculos del nuevo factor corregido. Primero se calcula el peso medido en la báscula sin el efecto del factor actual (Peso directo de la báscula):

$$\text{Peso directo de la báscula} = \frac{\text{Peso Medido Báscula}}{\text{Factor actual}}$$

Luego se calcula el factor corregido dividiendo el peso real por el peso directo de la báscula:

$$\text{Factor corregido} = \frac{\text{Peso Real}}{\text{Peso directo de la báscula}}$$

7. Las pruebas fueron realizadas para las dos cintas que mueven las astillas hasta la báscula: BC8 y BC22.



Figura 12: Fotos del test de la báscula de astillas.

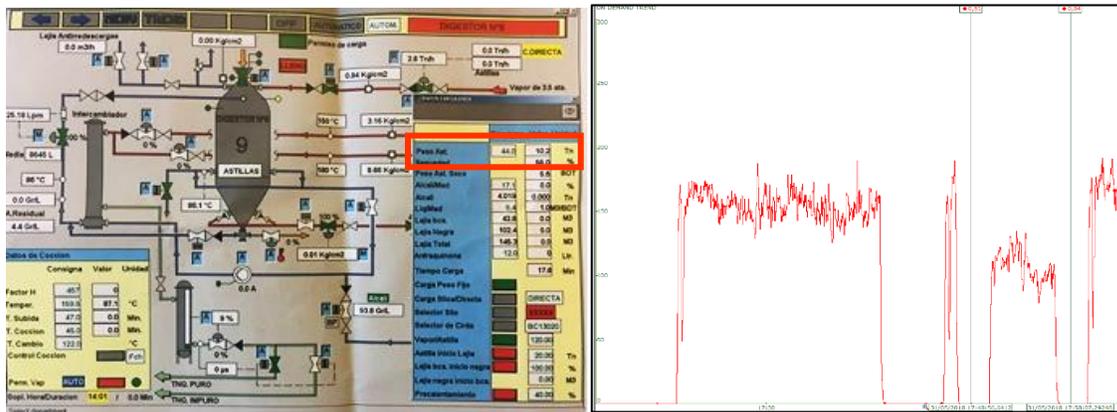


Figura 13: Pantallazo de la página del software para cálculo del peso de las astillas.

5.3 Resultados

Para cada cinta fueron hechas 5 pruebas de medidas del peso de astillas, y a partir de los valores del peso real y el peso medido se calculó un factor corregido que fue comparado con el factor de corrección del peso que era utilizado inicialmente (tabla 3).

Tabla 3: Tabla para comparación del factor de corrección del peso actual con el factor corregido.

Báscula en Cinta	BC8	BC8	BC8	BC8	BC8	BC8
	1	2	3	4	5	Promedio
Fecha Calibración Instr.	04/05/2018	10/05/2018	25/05/2018	31/05/2018	31/05/2018	
Fecha Prueba Peso Real	04/05/2018	11/05/2018	25/05/2018	31/05/2018	31/05/2018	
Peso Real	14,42	13,90	11,69	14,59	11,05	
Peso Medido Báscula	13,81	13,00	11,12	14,41	10,74	
Diferencia	-4,4%	-6,9%	-5,1%	-1,2%	-2,9%	-4,1%
Factor Actual Báscula	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	
Peso directo Báscula	16,84	15,85	13,56	17,58	13,09	
Factor corregido	0,86	0,88	0,86	0,83	0,84	0,85

Báscula en Cinta	BC22	BC22	BC22	BC22	BC22	BC22
	1	2	3	4	5	Promedio
Fecha Calibración Instr.	10/05/2018	16/05/2018	25/05/2018	31/05/2018	31/05/2018	
Fecha Prueba Peso Real	10/05/2018	16/05/2018	25/05/2018	31/05/2018	31/05/2018	
Peso Real	14,47	12,67	12,90	11,69	12,20	
Peso Medido Báscula	12,67	10,87	11,49	10,18	10,85	
Diferencia	-14,2%	-16,6%	-12,3%	-14,8%	-12,4%	-14,1%
Factor Actual Báscula	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	
Peso directo Báscula	14,40	12,35	13,06	11,57	12,33	
Factor corregido	1,00	1,03	0,99	1,01	0,99	1,00

A partir de la prueba fue posible evidenciar que cuando las astillas pasan por la BC8 la diferencia positiva entre los factores tiene un promedio de 4,1%, siendo menor que la diferencia en la cinta BC22 con una diferencia positiva de 14,1%. Esto muestra que

actualmente, en ambas las cintas, están poniendo madera en el proceso que no está siendo contabilizada correctamente.

Al evaluar la distribución de los errores/diferencias, la figura 14 sugiere que los errores tienen una distribución normal. En la cinta BC22 hubo errores entre 12,4% y 16,6% y en la cinta BC8 hubo errores entre 1,2% y 6,9%.

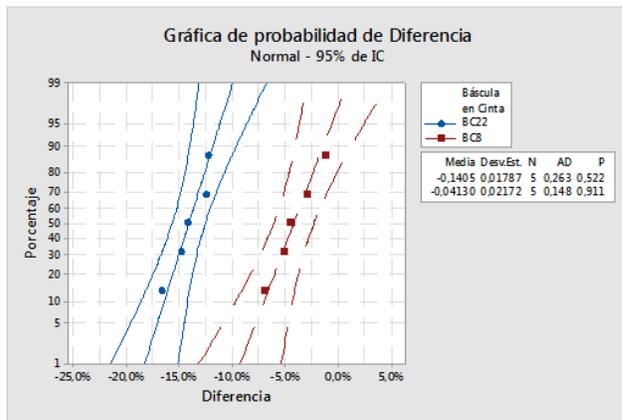


Figura 14: Gráfica de probabilidad de las diferencias de los factores observados.

Aplicando el estudio de linealidad para evaluar la exactitud de las mediciones en todo el rango esperado de mediciones, se observa que no hay linealidad, es decir, aunque el peso real (valor de referencia) aumente, la exactitud será la misma (figura 15).

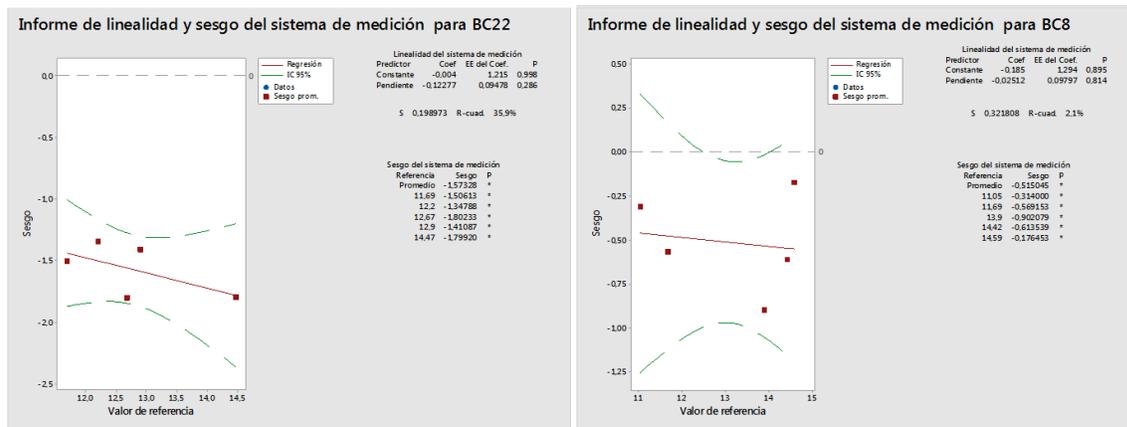


Figura 15: Gráfica de linealidad y sesgo del sistema de medición para las cintas BC8 y BC22.

En la figura 15 también presenta el análisis del sesgo que es la diferencia entre el peso medido por la báscula y un valor de referencia que es el peso real, indicando cuál es la exactitud del sistema de medición. De acuerdo con el análisis, se verifica que el sesgo existe, siendo mayor sobre todo en la BC22 con diferencia del peso de hasta 1,8 toneladas.

El valor negativo del sesgo indica que la báscula está subestimando el peso real de las astillas.

Con estos datos, los factores para corrección del peso de astillas deberían ser actualizados a los valores medios calculados, siendo 1,00 para la cinta BC22 y 0,85 para la cinta BC8, según la figura 16.

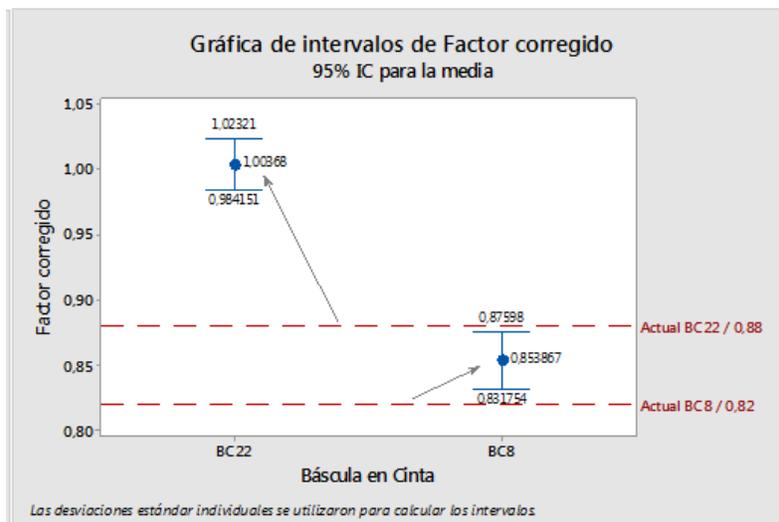


Figura 16: Gráfica con los valores medios de los factores actualizados para las cintas BC8 y BC22.

Considerando que en cada cinta se pasan diariamente 1600 toneladas de astillas (promedio de 40 cocciones, siendo utilizado aproximadamente 40 toneladas de astillas para cada cocción), el aumento de los factores de la BC22 y BC8, equivalen a 192 toneladas y 48 toneladas, respectivamente. Es decir, con esta optimización del proceso, se observó que 240 toneladas diarias no estaban siendo contabilizadas para cálculo de rendimiento, cantidad de químicos y etc.

5.4 Conclusiones

A partir de las mediciones de las diferencias de peso de la báscula dinámica en las cintas BC22 y BC8, fue posible mejorar la precisión del factor utilizado para el cálculo de peso de astillas. Por tanto, el factor de 0,88 en la cinta BC22 se cambió para 1,00 y el factor de 0,82 de la cinta BC8 se cambió para 0,85.

A partir de la medida optimizada, es posible mejorar la precisión para el cálculo de los químicos que son añadidos en los digestores en el proceso de cocción de la madera.



6. Conclusiones Generales

Las empresas necesitan tener seguridad de que los resultados que les proporcionan sus equipos de medida son correctos cuando se utilizan en actividades claves, y a partir de proyectos de optimización de medidas, es posible mejorar las características del producto, controlando la calidad, permitiendo conseguir mayores ingresos y ahorro de costos debido a la disminución de fallas o errores.

Con el sistema de gestión de calidad y el apoyo del equipo de ingeniería de procesos de la empresa Ence, fue posible mejorar variables en distintos procesos, proporcionando informaciones fiables para el control de parámetros básicos, teniendo en cuenta la mejor calidad del producto, ahorro económico y, principalmente, la toma de las decisiones más adecuadas a partir del análisis de datos más precisos.

7. Bibliografía

Ence S.A. (2017). Informe Anual de Responsabilidad Social Corporativa 2017. Recuperado de: <https://www.ence.es/es/publicaciones.html>

Merino, V., Gaytán, F., & Garzón, A. (2003). Sección Técnica de Procesos de Mejora y Sistemas de Medición de la Comisión de Modernización y Calidad de la FEMP. Consulta: 29 de junio del 2018 (http://www.irun.org/down/informe_modernizacion.pdf).

Míkva, M., Prajová, V., Yakimovich, B., Korshunov, A., & Tyurin, I. (2016). Standardization— one of the tools of continuous improvement. *Procedia Engineering*, 149, 329-332.

Nussbaumer, T. (2003). Combustion and co-combustion of biomass: fundamentals, technologies, and primary measures for emission reduction. *Energy & fuels*, 17(6), 1510-1521.

Österberg, P., Heinonen, M., Ojanen-Saloranta, M., & Mäkynen, A. (2016). Comparison of the performance of a microwave based and an NMR-based biomaterial moisture measurement instrument. *ACTA IMEKO*, 5(4), 88-99.

Process Sensor (2018). Products. Recuperado de: <https://www.processsensors.com/products/near-infrared-moisture-oil-coat-weight-sensors>.

Senfit Ltd. Product (2018). Recuperado de: <http://www.senfit.com/products/biomass-sample-mill.html>.

Sher, F., Pans, M. A., Afilaka, D. T., Sun, C., & Liu, H. (2017). Experimental investigation of woody and non-woody biomass combustion in a bubbling fluidised bed combustor focusing on gaseous emissions and temperature profiles. *Energy*, 141, 2069-2080.