

DISEÑO DE UN EQUIPO PARA MEDICIÓN DE FIBRA DE CAÑA

JORGE EDUARDO OCAMPO BEDOYA



**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO DE CALI
2015**



ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

DISEÑO DE UN EQUIPO PARA MEDICIÓN DE FIBRA DE CAÑA

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero Mecánico**

Presenta:

JORGE EDUARDO OCAMPO BEDOYA

Estudiante Ingeniería Mecánica

Director:

ING. ADOLFO LEÓN GÓMEZ

Escuela de Ingeniería de Mecánica

Codirector:

ING. JOSÉ TOMAS BUITRAGO MOLINA

Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica

Santiago de Cali

2015

CONTENIDO

1 CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	7
1 ANTECEDENTES.....	11
1.1 MÉTODOS DE DETERMINACIÓN DE FIBRA DE CAÑA	11
1.2 ELEMENTOS CONCEPTUALES DE LA FIBRA EN LA CAÑA	12
1.3 APLICACIONES DE FIBRA DE CAÑA.....	13
2 OBJETIVOS.....	17
2.1 GENERAL.....	17
2.2 ESPECÍFICO	17
3 MARCO TEÓRICO	18
3.1 LA CAÑA DE AZÚCAR.....	18
3.2 ESTRUCTURA DE LA CAÑA.....	18
3.3 PROCESO DE EXTRACCIÓN DEL JUGO DE CAÑA.....	21
3.4 MOLINOS	23
3.4.1 Ajustes de molino.....	24
3.4.2 Ajustes de mazas del molino.....	25
3.5 IMBIBICIÓN	27
3.6 BAGAZO.....	29
3.7 MÉTODOS PARA DETERMINAR LA FIBRA DE CAÑA.....	29
3.7.1 Método indirecto.....	29
3.7.2 Método directo	30
3.7.3 Determinaciones analíticas	30

4	DATOS, PRUEBAS Y CÁLCULOS.....	33
4.1	DETERMINACIÓN DE LA FIBRA FORMA INDIRECTA.....	33
4.1.1	Instrumentación.....	34
4.1.2	Procedimiento	36
4.2	DETERMINACIÓN DE FORMA DIRECTA	39
4.2.1	Instrumentación.....	42
4.2.2	Procedimiento	44
4.3	DISEÑO DE EQUIPO A DESARROLLAR	46
4.4	CÁLCULO PARA LAVADO DE LA MUESTRA.....	48
4.4.1	Cálculo de la potencia para selección de motobomba	48
4.4.2	Calculo de la potencia del calentador.....	54
4.5	CALCULO PARA EL SECADO DE LA MUESTRA.....	57
4.5.1	Cálculo de potencia para el calentamiento del aire.	58
4.5.2	Calculo de la potencia interna ventilador.....	62
4.5	DIAGRAMA DE FLUJO	63
4.6	COMPONENTES DE LA MÁQUINA.....	66
4.6.1	Sistema de control.....	74
4.6.2	Propiedades del acero inoxidable	77
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	80
6	BIBLIOGRAFIA.....	81

Lista de Figuras

FIGURA 1. PARTES DE LA CAÑA. [22].....	18
FIGURA 2. MOLINOS DE TRES Y CUATRO MAZAS [24][25].	24
FIGURA 3. TIPO DE IMBIBICIÓN COMPUESTA [26].....	28
FIGURA 4. LABORATORIO MÓVIL EN FUNCIONAMIENTO	33
FIGURA 5. DESINTEGRADORES PRESENTES EN EL LABORATORIO MÓVIL.	34
FIGURA 6. HOMOGENEIZADOR PRESENTE EN EL LABORATORIO MÓVIL	35
FIGURA 7. HORNO SPENCER.....	36
FIGURA 8. INSTRUMENTOS ADICIONALES DEL LABORATORIO MÓVIL	36
FIGURA 9. CAÑA DESPUÉS DE 40 MINUTOS EN EL DESINTEGRADOR.....	38
FIGURA 10. EQUIPO QUE PRESENTA EL MANUAL [9].....	41
FIGURA 11. MONTAJE EXPERIMENTAL.	42
FIGURA 12. RIEGO AGUA UNIFORME SOBRE LA MUESTRA	43
FIGURA 13. HORNO PARA EL SECADO DE MUESTRAS.	43
FIGURA 14. CONTROL DE TEMPERATURA.....	45
FIGURA 15. PESO DE MUESTRAS DESPUÉS DE SECADO.....	45
FIGURA 16 DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL EQUIPO A DISEÑAR	47
FIGURA 17. ESQUEMA CIRCUITO DE AGUA PARA EL PROCESO DE LAVADO.....	48
FIGURA 18. ESQUEMA PARA EL ANÁLISIS DE ENERGÍA ENTRE EL PAR DE PUNTOS.	49
FIGURA 19. ESQUEMA PROCESO DE SECADO.....	57
FIGURA 20. CORTE LONGITUDINAL INTERCAMBIADOR DE CALOR.	60
FIGURA 21. PROCESO GENERAL DE LA MÁQUINA.	63
FIGURA 22. PROCESO DE ENJUAGUE.	64
FIGURA 23. PROCESO DE SECADO.....	65
FIGURA 24. ESQUEMA GENERAL DE LA MÁQUINA	65
FIGURA 25. PORTAMUESTRA.....	66
FIGURA 26. REGADERA.....	67
FIGURA 27. RESISTENCIAS.....	67
FIGURA 28. INTERCAMBIADOR DE CALOR.....	68
FIGURA 29. SISTEMA DE LAVADO Y ENJUAGUE	70
FIGURA 30. SISTEMA DE SECADO.....	71
FIGURA 31. EQUIPO DISEÑADO	72
FIGURA 32. ILUSTRACIÓN TRANSFERENCIA DE CALOR.....	73
FIGURA 33. DIAGRAMA DE BLOQUE	75
FIGURA 34. CONTROL DE TEMPERATURA LAVADO (PROTEUS)	75
FIGURA 35. CONTROL DEL SECADO.....	76

Lista de Tablas

TABLA 1. DATOS DE CANTIDADES PARA DESINTEGRAR.....	37
TABLA 2. PESOS DE MUESTRAS SECAS	44
TABLA 3. DATOS DE PORCENTAJE FIBRA	45
TABLA 4. VALORES DE LOS TIPOS DE ENERGÍA PARA CADA PUNTO.	50
TABLA 5. VALORES DE LAS PÉRDIDAS DE CARGA EN LA SUCCIÓN Y DESCARGA.....	51
TABLA 6. VALORES DE LAS PÉRDIDAS DE CARGA Y CARGA EN LA BOMBA.	51
TABLA 7. VALORES PARA ECUACIÓN (5).	54
TABLA 8. ESTADOS TERMODINÁMICOS PARA 20°C Y 40°C.....	55
TABLA 9. ESTADOS TERMODINÁMICOS PARA 20°C Y 90°C.	56
TABLA 10. VARIABLES PARA EL CÁLCULO DE POTENCIA.	58
TABLA 11. VALORES PSICOMÉTRICOS DEL AIRE	62
TABLA 12. CAMBIO DEBIDO A LAS MEJORAS.....	70
TABLA 13. PROPIEDADES DEL AISLANTE TERMOFLEX	73
TABLA 14. CALCULO CORRESPONDIENTES CON EL AISLANTE	74
TABLA 15. PROPIEDADES DEL ACERO 304	77
TABLA 16. DIMENSIONES GENERALES DE LA MÁQUINA	78
TABLA 17. VALORACIÓN ECONÓMICA.	79

RESUMEN

Algunos de los atributos de la caña de azúcar que sirven como índices de calidad como materia prima son los contenidos porcentuales de sacarosa y fibra. Si el contenido de la fibra es muy alto, este afectará la eficiencia en la extracción de jugo en la fábrica, y si el contenido es bajo también, ya que el subproducto se emplea como fuente de energía en la fábrica para generación de vapor e incluso en procesos de cogeneración.

La cantidad de la fibra se ve afectada dependiendo del tipo de caña, las condiciones climáticas, el tipo de suelo, las prácticas de cultivo, la fertilización, las condiciones y métodos de cosecha, la floración, etc. factores que se ven reflejados en las mediciones. La caña está compuesta por fibra y jugo, este último está compuesto de agua y sólidos solubles. Existen procedimientos de laboratorio mediante los cuales se determinan estas cantidades. Con el equipo a desarrollar en este proyecto se puede determinar el porcentaje fibra de caña en forma directa al someter a lixiviación con agua a la caña preparada hasta obtener fibra limpia.

El presente proyecto tiene como propósito el diseño de un equipo para medición de fibra de caña con una capacidad de muestra de 500g, para hacer parte de un laboratorio con el cual contribuir con la investigación y estimación del porcentaje fibra de caña que se presenta en la materia prima que llega a la fábrica.

INTRODUCCIÓN

La caña de azúcar como su nombre lo indica principalmente se utiliza para la producción de azúcar y actualmente se ha expandido hacia la producción de alcohol carburante,

Desde enero de 2005 la quema de caña antes de ser cortada mecánicamente ha sido prohibida por la legislación colombiana, debido a las consecuencias negativas que ha traído para el medio ambiente y las incomodidades que ha generado a las comunidades aledañas a los ingenios, lo que ha llevado a que la materia extraña presente en la caña que entra a la fábrica haya aumentado [1].

Como consecuencia de esto se ha impulsado a que la preparación de la caña y la extracción del jugo sean más estricta, obligando a los ingenios azucareros en la preparación de nuevas técnicas de cosecha, corte, preparación y molienda de la caña de azúcar, como el control continuo de la calidad del producto que entre en la fábrica, la investigación, y el manejo de la materia extraña como fuente de energía entre otras; la implementación de mejores materiales y elementos en sus equipos, con el fin de no perturbar la productividad y la eficiencia tanto de máquinas como de hombres que desempeñan sus labores en estas áreas, para poder llevar cabo un proceso efectivo y con un aprovechamiento adecuado de recursos.

La preparación de caña de azúcar comprende una de las primeras etapas en la fábrica, para su procesamiento y la obtención de los productos que se derivan de ella. En la preparación los tejidos fibrosos son desgarrados, dividiéndolos en tejidos de menor tamaño. Al separar la estructura de la planta, se abre un número grande de células facilitando la extracción de sacarosa, elevando la tasa de alimentación en el tándem y lográndose un mejor control de flujo en los chutes de los molinos. Las consecuencias de una buena preparación se evidencian en el aumento de extracción de la primera unidad de molienda, aquí se obtiene un jugo mayor pureza y es posible extraer entre 60-75% de la sacarosa, en las unidades posteriores la

extracción es menor y para permitir un aumento se le adiciona agua por medio del proceso de imbibición [2]. Una buena preparación correcta de la caña constituye un paso fundamental para el proceso de la obtención del azúcar en un ingenio.

También una etapa fundamental en el proceso de elaboración de azúcar es la extracción del jugo de la caña previamente preparada, este proceso se lleva a cabo en molinos constituidos por cilindros ranurados entre los cuales la caña es sometida a altas presiones, forzando de este modo a que el jugo se separe de la parte fibrosa de la caña, dicho proceso está influenciado por variables como: la variedad de la caña, su grado de preparación, los parámetros de funcionamiento de los molinos, el contenido de materia extraña, entre otros [3].

Se estima que la caña de azúcar está compuesta en un 16% de fibra y en 84 % en jugos (agua, sacarosa e impurezas)[4]. El proceso de extracción genera un subproducto llamado bagazo el cual se utiliza principalmente como combustible en las calderas, la fibra también es analizada para determinar la eficiencia del proceso de molienda. Para los ingenios la fibra es de mucha importancia ya que si el contenido de fibra es muy alto, afecta en la extracción de jugo en la fábrica y también se reflejan negativamente en el cálculo del pago de contenido de sacarosa de las entregas de caña, por lo que es importante considerar su porcentaje. Tampoco es conveniente que sea muy bajo, debido a que este subproducto se emplea como fuente de energía para operar la fábrica [5].

CENICAÑA como centro de investigación aporta a los ingenios azucareros con la estimación de variables importantes para el procesamiento de la caña entre ellos el porcentaje de fibra, esto lo hace a partir de un laboratorio móvil que llevan directamente al ingenio, en él cuenta con equipos como el desintegrador, horno y homogeneizador entre otros con los cuales determinan el porcentaje de Brix o sólidos solubles, humedad y así indirectamente determinan el porcentaje de fibra presente en la caña, esto lo hacen tomando muestras representativas tanto del tándem de molinos así como de la caña preparada antes de entrar al tándem. Con

esto pueden comparar y poder realizar ajustes al proceso de extracción, pero todo este proceso dura alrededor de 2 horas por muestra y pues los equipos presentes no tienen la capacidad para realizar las mediciones de todas las muestras juntas, lo cual con lleva a un proceso tedioso y repetitivo.

Por eso el objetivo del presente trabajo es diseñar un equipo para medición de fibra de caña eficiente y pueda estimar la fibra directamente, cuya construcción y operación sea lo más simple posible, procurando que los materiales con los que se construya el equipo sean de fácil adquisición para facilitar el mantenimiento y reparación del mismo.

1 ANTECEDENTES

En este capítulo se presenta información relacionada con la caña de azúcar y sus formas de determinación de calidad, métodos y procedimientos que se tengan así como de aplicaciones que se le pueden dar al subproducto de esta, que se considera útil para ilustrar la aplicación de ingeniería así como para entender los conceptos y aspectos teóricos relacionados con éstos.

1.1 MÉTODOS DE DETERMINACIÓN DE FIBRA DE CAÑA

Con el advenimiento de la cosecha mecanizada, se comenzó a percibir la necesidad de incorporar en la valoración de la caña el contenido de fibra, a fin de corregir las desviaciones que pudiera producir el aumento de los no azúcares en la materia prima, de ahí su importancia en la industria azucarera en la actualidad.

Para la determinación de la fibra presente en la caña, se puede realizar directa o indirectamente, con el método indirecto se realiza con el análisis de los jugo del proceso de extracción, aquí es necesario realizar dos determinaciones fisicoquímicas sobre el jugo muestreado, el contenido de sólidos solubles o Brix y el contenido de sacarosa aparente o Pol. Con el método directo la muestra se toma antes del proceso de molienda, la cual es la característica principal de este método, con esta muestra se le realizan los análisis correspondientes para la determinación de la fibra y además si se requiere más precisión se determina la humedad del residuo fibroso [6].

La fibra también da un paso importante para determinar la Calidad de la caña de azúcar, la cual se determina sobre la base de su contenido en azúcar, conocido como comercial caña de azúcar (CCS). CCS se deriva de Brix, Pol y fibra. El análisis de rutina de medir el contenido de azúcar en un laboratorio se realiza mediante refracción estándar y métodos Polarimétricos [7].

1.2 ELEMENTOS CONCEPTUALES DE LA FIBRA EN LA CAÑA

Diseño de un secador de muestra de bagazo de caña [8].

En 2010 se realizó un diseño de un secador para tamaños de muestra de 1000 gramos, donde además el autor abordó los tipos de secados posibles que se le pueden realizar al bagazo, lo cual plantea y opta por el secado de tipo directo, en donde el contacto directo entre los gases calientes y los sólidos se aprovecha para calentar estos últimos y separar el vapor. También teniendo en cuenta que la temperatura del aire a trabajar a la entrada no será mayor de 105 C° dado que a una temperatura mayor el aire no solo removerá humedad sino también otros componentes del bagazo.

Instruction and Operation Manual for the Can Fibre Machine [9].

La Sugar Research International (SRI) en octubre de 1996 presentó un equipo con el cual se podría estimar la fibra de la caña sin importar su variedad, con su respectivo manual, estimando esta fibra usando un método que especifica BSES Laboratory Manual for Australian Sugar Mills, en donde el método de muestreo y submuestreo de caña preparada es idéntica a la que se aplica a la determinación de la fibra como se especifica en el Manual de Laboratorio para BSES Australian Sugar Mills, Volumen 2, método 4.

Laboratory Manual For Australian Sugar Mills [10].

En este manual se encuentran algunos métodos usados por CENICAÑA para estimar la cantidad de fibra presente en la caña como lo son el método 5 (Sampling and Analysis For Evaluating Milling Train Performance) y el método 6 (POL-Determination in Bagasse By Wet Desintegration) presentes en este manual, también se puede encontrar algunos métodos que pueden ser de mucha utilidad

para el desarrollo de este proyecto como los son el método 4 (Fibre-Determination in Cane), método 3 (Brix – Determination in Juice By Hydrometer). De este manual se cuenta con el volumen I y el volumen II.

El bagazo contiene la mayor parte del material fibroso de la caña, la materia seca se compone de los tres componentes de la fibra de caña que son la celulosa, hemicelulosa y lignina así como de una pequeña cantidad de ceniza y material soluble, el bagazo puede procesarse posteriormente para elaborar productos de valor agregado al recuperar o hacer reaccionar uno o todos los componentes.

Los ingenios pueden configurarse para producir un excedente de bagazo, el que puede utilizarse para suministrar vapor para otras actividades de elaboración de subproductos, también puede ayudar con la generación y venta de excedentes de energía eléctrica, en la cogeneración y la gasificación del bagazo para incrementar el potencial de cogeneración [2].

1.3 APLICACIONES DE FIBRA DE CAÑA

El uso de las fuentes renovables de energía, debe incrementar su papel en el balance energético mundial y dentro de las fuentes renovables; el bagazo el cual es fibra residual de la caña de azúcar después de la molienda, tiene buenas características como combustible y con un efecto global positivo sobre el medio ambiente con respecto al uso de los combustibles fósiles [11].

La comparación del costo de energía de otros tipos de biomasa por tonelada con el costo del bagazo y el de residuos de cosecha de caña, cuyos valores oscilan entre US \$0.281 por tonelada y US\$0.95-2.21 por tonelada respectivamente, permite clasificar al bagazo como biomasa de bajo costo, lo que hace rentable la generación de electricidad con tecnologías de baja eficiencia [12].

Muchos ingenios azucareros han producido habitualmente energía eléctrica para su propio consumo, total o parcialmente, empleando el bagazo como una fuente de combustible. Existen algunos ingenios azucareros, los cuales, además de generar todas sus necesidades de electricidad, usan el exceso de bagazo para producir más electricidad y venderla a las compañías eléctricas públicas. Por otra parte, existen numerosos ingenios azucareros que no cuentan con las instalaciones adecuadas para generar electricidad y no tienen acceso a los mercados apropiados donde vender directamente su propio bagazo, en esas circunstancias, ellos mismos necesitan disponer de su exceso de bagazo, o bien almacenándolo localmente, o transportándolo a otras áreas, y estas medidas son a un elevado costo [13].

El contenido de fibra en la caña ejerce una marcada influencia en el balance entre la energía disponible y las necesidades del proceso. Un bajo contenido de fibra en la caña procesada no sólo significa menos combustible disponible, también aumenta la proporción del jugo, generando una mayor tarea de evaporación y por tanto una mayor demanda de vapor [14].

Otro de los usos de la fibra que se están dando hoy en día es en la industria de pulpa y papel, El papel consiste en un tejido o entramado de fibras vegetales con alto contenido de celulosa, que han sido refinadas y tratadas en agua antes de ser depositadas sobre un tamiz y secadas [15].

Se entiende por fibras no leñosas los materiales vegetales celulósicos distintos de la madera de los que pueden extraerse fibras para la fabricación de papel. Los materiales no leñosos más usados por la industria del papel son paja, bagazo de caña de azúcar, bambú, cáñamo, kenaf, yute, sisal, abacá, borra de algodón (fibras cortas que quedan una vez desmontado el algodón) y carrizo. La mayoría de las plantas no leñosas son anuales y alcanzan su máximo potencial fibroso en una determinada estación. A escala mundial, las fibras no leñosas aportan una pequeña parte de la materia prima suministrada para la fabricación de papel y de cartón [16].

Las briquetas que es una densificación o compactación de residuos agrícolas o industriales, aquí se hablaría de bagazo que es el subproducto del proceso de obtención de azúcar, para el diseño de estas máquinas se implica el conocimiento de las variables del proceso que afectan directamente la calidad del producto y el desempeño del equipo. La importancia de estas variables como la humedad, temperatura, presión y tamaño de partícula o fibra ha sido tema de estudio por muchos autores. El tamaño de las partículas o fibras facilita la compactación y textura del producto. De acuerdo a la revisión bibliográfica las condiciones óptimas para obtener un producto de buena calidad y un tamaño de partícula variable entre 3 y 19 mm dependiendo del equipo empleado [17].

Para una fibra que sea adecuada para fines textiles ciertas cualidades son esenciales y otras son deseables. La longitud de la fibra debe ser varios cientos de veces la anchura, que permite a las fibras a ser retorcidas juntas para formar un hilo. La longitud real de la fibra también es importante. Puede ser infinitamente larga, pero no debe ser inferior a 6 a 12 mm, o no puede mantenerse [18].

La aparente limitación en la longitud de la cáscara de la caña de azúcar es la longitud de los entrenudos, y esto varía de 5 a 25 cm. La longitud de las células de las fibras finales es de 2 a 4 mm [19].

La longitud de los haces de fibras extraídos depende de las condiciones de extracción y el proceso de extracción. La anchura de los haces de fibras puede variar entre límites considerables, y eventualmente determina la finura. Los haces de fibras de caña de azúcar resultantes se componen de varios cientos de células de la fibra en última instancia, con la anchura de los haces de fibras que depende de las condiciones de extracción y procesos de extracción.

Investigación de la Universidad Estatal de Luisiana (LSU) se han llevado a cabo para determinar la viabilidad de la caña de fibras de corteza de azúcar para aplicaciones textiles y geotextiles [20].

Uno de los productos es una estera no tejida formada por suspensión de los haces de fibras en una pantalla en agua, la eliminación de agua y secado. Las alfombras han sido probadas como geotextiles para el control de la erosión del suelo en aplicaciones de ingeniería civil [21].

Así, a bajo costo, se pueden producir geotextiles biodegradables en los molinos de caña de azúcar locales, proporcionando un beneficio económico tanto a la industria del transporte y la industria de la caña de azúcar.

Se han realizado muchos intentos para elaborar productos conglomerados de diferentes clases utilizando bagazo como la materia prima principal. El tablero más simple es el de aislamiento de baja densidad, que no está sujeto a prensado y es formado agregando un aglutinante al bagazo, otros tipos de tablero de fibra pueden producirse en forma húmeda o seca y prensados para alcanzar una alta densidad y mayor resistencia, en este caso el bagazo es mezclado con el aglutinador y luego prensado y calentado para curar la resina, luego es enfriado, acabado y cortado a la medida [2].

2 OBJETIVOS

2.1 GENERAL

Diseñar un equipo que permita estimar en forma directa la cantidad de fibra de caña presente en una muestra de 500 gramos

2.2 ESPECÍFICO

- ✓ Realizar una revisión bibliográfica en la cual permita determinar cuáles son las variables operacionales más relevantes a la hora de determinar la cantidad de fibra de caña.
- ✓ Determinación, por métodos indirecto y directo manual, la cantidad de fibra presente en la caña con fines de ajustar tiempos de ciclo en el equipo de medición directa semiautomática
- ✓ Evaluar el secador de muestras de bagazo del Laboratorio Móvil de CENICAÑA para implementarlo al equipo a desarrollar
- ✓ Diseñar un banco o estructura del equipo en el cual se pueda ensamblar los instrumentos necesarios para el desarrollo del equipo.
- ✓ Seleccionar la instrumentación y los equipos que permitan obtener mediciones de las variables que se encuentran presentes en cada proceso de la máquina a diseñar.

3 MARCO TEÓRICO

3.1 LA CAÑA DE AZÚCAR

La caña de azúcar es una planta gramínea originaria de Nueva Guinea, desde donde se fue extendiendo a Asia y otros países tropicales y subtropicales. Según la variedad y condiciones locales, la planta forma entre 4 y 12 tallos cada uno de longitud de 5 a 25 cm, estas que pueden crecer hasta 3 - 5 m de altura con un diámetro de 1.8 a 5 cm, también su color depende de la variedad [3]. En su parte superior encontramos el cogollo, que mide unos treinta centímetros de largo. La floración se presenta durante el primer año de cultivo.

3.2 ESTRUCTURA DE LA CAÑA

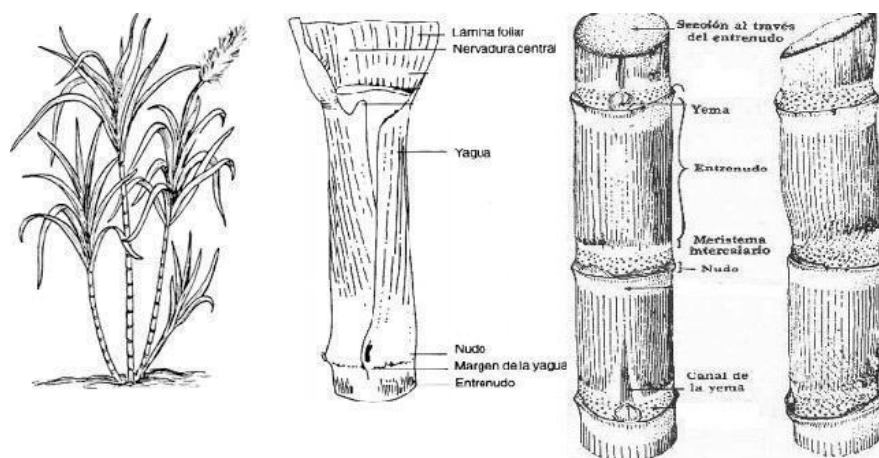


Figura 1. Partes de la caña. [22]

- **El tallo**

El tallo es el órgano más importante de la planta de la caña, ya que en él se almacenan los azúcares. La caña de azúcar forma cepas constituidas por la aglomeración de los tallos, que se originan de las yemas del material vegetativo de siembra y de las yemas de los nuevos brotes subterráneos. El número, el diámetro,

el color y el hábito de crecimiento del tallo dependen principalmente de las variedades [22].

Existen variedades en las cuales el desarrollo vegetativo no es uniforme y presentan una alta frecuencia de tallos con edades muy diferentes. También ocurre, a veces, que cuando estos alcanzan un avanzado desarrollo brotan numerosos tallos débiles que no tienen valor para el proceso de molienda.

- **Nudo**

Es la porción dura y más fibrosa del tallo de la caña que separa dos entrenudos vecinos. El nudo está formado por el anillo de crecimiento, la banda de raíces, la cicatriz foliar.

- **Entrenudo**

Es la porción del tallo localizada entre dos nudos. En la parte apical del tallo, los entrenudos miden unos pocos milímetros y en ellos ocurre la división celular que, a su vez, determina la elongación y longitud final. El diámetro, la forma y la longitud de los entrenudos cambian con las variedades [22].

- **La hoja**

Las hojas de la caña de azúcar se originan en los nudos y se distribuyen en posiciones alternas a lo largo del tallo a medida que este crece. Cada hoja está formada por la lámina foliar y por la vaina o yagua.

- **Yagua o vaina**

Tiene forma tubular, envuelve el tallo y es ancha en la base. Puede ser glabra o recubierta de pelos urticantes en cantidad y longitud que cambian con la variedad [22].

- **Materia extraña**

Este nombre se les da a todas las impurezas o desechos que acompañan a la caña. La cantidad y composición de dicha materia depende de varios factores como son la variedad, el tipo de cosecha, el clima, entre los más importantes.

La materia extraña ocasiona grandes problemas como:

- Se cosecha, se transporta y se paga como caña sin serlo
- Mucha de la materia extraña tiene menor humedad que la caña, con la habilidad de absorción y aumento de su peso durante la imbibición y extracción.
- Afecta la eficiencia de la fábrica, puesto que incrementa el bagazo y su humedad. También incrementa la fibra y el volumen de cachaza. Todo esto aumenta las pérdidas de sacarosa.
- Incrementan los productos químicos para clarificar el jugo.
- Crea problemas mecánicos en la extracción y favorece el desgaste de los equipos de fábrica.
- Aunque estos al ser procesados de manera óptima, traen beneficios para el campo al ser un aporte de materia orgánica al suelo.

Algunos de los componentes de materia extraña son:

- **Cogollo**

También llamado despunte o yema terminal, que es la porción superior del tallo de la caña donde el desarrollo es muy activo. Puede contener jugo pero a niveles no extraíbles económicamente por la fábrica, además contiene una cantidad apreciable de azúcares reductores que dificultan la cristalización, afectan la pureza y aumentan la melaza.

- **Chulquines**

Son tallos jóvenes de caña que no han completado el ciclo de crecimiento y desarrollo que conduce a la maduración. Se caracteriza por su exagerado grosor, escasa longitud, desmesurada proporción del cogollo y la palidez de su coloración. Estas no contienen sacarosa extraíbles económicamente.

3.3 PROCESO DE EXTRACCIÓN DEL JUGO DE CAÑA

La caña que entra a las fábricas consiste predominantemente de tallos de la planta, que vienen acompañados de materia extraña vegetal y mineral (suelo). Los tallos están formados por una parte sólida y otra líquida, la porción insoluble en agua del tallo es llamada fibra y está formada de conductos o celdas capilares y corteza. Los tubos capilares permiten circulación del agua a través de la planta, y la corteza, es la pared de tejido celular que almacena y protege la parte interna de la planta. La fase líquida es el llamado jugo, formado por agua y material soluble en agua entre ellos la sacarosa.

- **Equipos utilizados en la preparación de caña de azúcar**

La caña de azúcar debe ser transportada hacia las unidades de molienda con una tasa de alimentación lo más continua y uniforme posible. Inicialmente, este producto es depositado en mesas de caña que se encargan de descargarlo hacia los conductores de tablillas. Estos dos equipos conforman el sistema de transporte en el tándem de molienda. La preparación de la caña de azúcar es un proceso que es llevado a cabo por medio de máquinas niveladoras, picadoras y/o desfibradoras.

- **Niveladoras**

Generalmente, después de ser depositadas en el conductor de tablillas, la caña es obligada a pasar inicialmente por una niveladora que se encarga de trozar y distribuir el flujo caña sobre el conductor.

- **Picadoras**

Las picadoras son máquinas con un eje de acero robusto sobre el cual se montan soportes. En estos son ensambladas cuchillas que finalmente son las encargadas de romper y cortar la caña en trozos de menor tamaño.\

Desfibradoras

Las picadoras rompen un número apreciable de células, pero no las suficientes de acuerdo con las capacidades de extracción en la molienda que se exigen en la actualidad. Por eso para lograr una buena preparación después de las picadoras deben seguir las desfibradoras, las cuales logran romper un mayor número de células, favoreciendo el proceso.

- **Método de la molienda**

El objetivo de la molienda es separar el jugo que contiene sacarosa del resto de la caña, para ello se hace pasar la caña preparada (picada o desfibrada) a través de un grupo de molinos (tándem) el cual está conformado por 4 a 6 molinos, y cada uno de estos está compuesto por un grupo de 3 o 4 rodillos dependiendo del diseño, con los cuales al aplicar alta presión, exprimen la caña y obligan la salida del jugo.

El tallo de la caña de azúcar está compuesto por una parte sólida llamada fibra y una parte líquida, el jugo, que contiene agua y sacarosa. En ambas partes también se encuentran otras sustancias en cantidades muy pequeñas.

Las proporciones de los componentes varían de acuerdo con la variedad de la caña, edad, madurez, clima, suelo, método de cultivo, abonos, lluvias, riegos, etc. Sin embargo, unos valores de referencia general pueden ser: agua 73 - 76 %, sacarosa 8 - 15 %, fibra 11 - 16 %. Otros constituyentes de la caña presentes en el jugo son: glucosa 0,2 - 0,6 %, fructosa 0,2 - 0,6 %, sales 0,3 - 0,8 %, ácidos orgánicos 0,1 - 0,8 %, otros 0,3 - 0,8 % [23].

Dependiendo de cómo sea el contenido de la fibra, se verá afectada la extracción de su jugo, en donde a lo largo del tándem, está ya con la ruptura de su estructura que se ha hecho en la preparación de la caña, ingresa al tándem donde se hace la extracción por una serie de molinos constituidos por cilindros ranurados en las cuales la caña es sometida a altas presiones obligando a que el jugo se separe de la parte fibrosa, al final del tándem se obtiene el residuo llamado bagazo. Este proceso es ayudado con la imbibición, que es un proceso de lixiviación en contraflujo la cual mejora la eficiencia de extracción.

3.4 MOLINOS

Se tiene distintos diseños, hablando de los molinos convencionales el cual está compuesto por tres mazas, una maza cañera, una maza bagacera que se encuentran sobre un mismo nivel y una maza superior que es flotante, las mazas presentan un rayado circunferencial que ayuda a la extracción del jugo, sabiendo que las mazas están separadas por una distancia constantes de trabajo. Ahora mirando un tándem o tren de molinos, si la caña después de pasar por el primer molino y va al siguiente molino, es poco el jugo que ha quedado libre en el bagazo y debido a esto la recuperación de sacarosa será mucho menor, para ayudar a esta extracción en los siguientes molinos se les agrega agua adicional, por eso la preparación de la caña tiene una estrecha relación con el desempeño de los molinos, al final de esto el jugo de caña sale de los molinos para seguir su camino de procesamiento en el ingenio mientras el bagazo de caña es almacenado para ser utilizado como combustible en las calderas o ser vendido a las industrias productoras de papel.

Una cuarta maza es adicionada frecuentemente al molino básico de tres mazas, tal y como lo muestra la Figura 2, esta puede ser:

- Una maza alimentadora ligera, frecuentemente adicionada a los molinos existentes de tres mazas para dirigir la caña y asistir a la alimentación

- Una cuarta maza de igual tamaño que las otras mazas, integral al molino original, diseñada para efectuar extracción y también alimentación

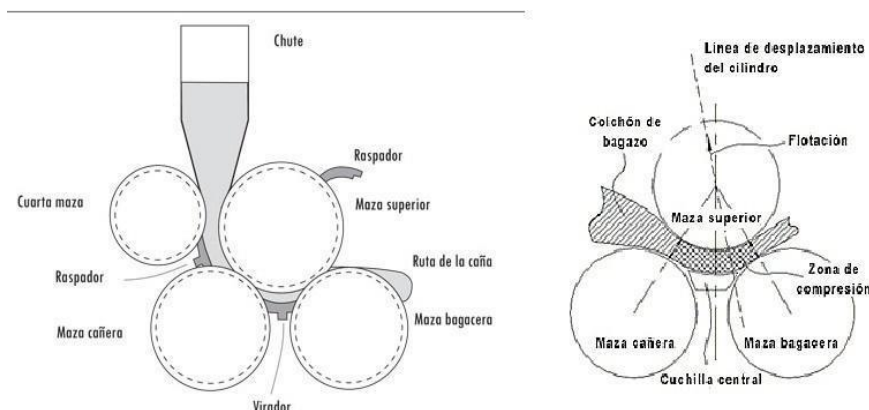


Figura 2. Molinos de tres y cuatro mazas [24][25].

Los factores que afectan el desempeño de los molinos incluyen aspectos físicos tales como la calidad de la caña, la preparación, el número de molinos, el tamaño y potencia de molinos, los ajustes de los molinos, la imbibición, la alimentación y el control de los molinos, uno de los factores más importantes es la calidad, entrenamiento, diligencia y motivación del personal del molino.

Balance en los molinos

$$\text{caña} + \text{agua} = \text{jugo diluido} + \text{bagazo}$$

Una extracción ideal sería aquella en la que el jugo extraído por el molino, tiene el mismo Brix que el que mantiene retenido el bagazo. Esto, tal vez se lograría con un ciento por ciento de células rotas y un mezclado perfecto del líquido de imbibición y el jugo libre.

3.4.1 Ajustes de molino

Es imprescindible asegurarse que los molinos estén configurados para su óptimo desempeño, el primer aspecto clave que se aprecia de la teoría de molienda, es que los ajustes del molino no comprende simplemente el posicionamiento apropiado de

las mazas cañeras, superior y bagacera. Existe una razón de compactación para holguras o aberturas en cada etapa durante el paso del bagazo por el molino.

3.4.2 Ajustes de mazas del molino

El ajuste de un tren de molinos para una determinada tasa de molienda comienza diciendo las aberturas de trabajo deseadas entre las últimas tres mazas de cada molino, es decir entre la maza superior y la cañera (ajuste de entrada) y entre la maza superior y la bagacera (ajuste de salida).

Muchos métodos diferentes de ajustes son empleados alrededor del mundo, pero prácticamente todos calculan los ajustes (aberturas) entre mazas buscando permitir un volumen escrito suficiente para el paso de la tasa de fibra requerida con la compactación deseada. Este principio se aplica utilizando densidades y/o razones que han sido validadas empíricamente.

A continuación se muestran dos métodos muy utilizados ampliamente: el método Australiano del “llenado de fibra” y el método Surafricano, ambos están basados en el ajuste de las aberturas de trabajo en proporción a la tasa de fibra procesada.

- **Método australiano**

Este método se basa en el “llenado de fibra” (masa de fibra por unidad de área de superficie de maza) deseado en cada abertura, las fórmulas para los ajustes son:

$$h_D = \frac{5305 * 10^4 * \dot{m}_C * w_{F,C}}{d * l * n * p_{FF,D}}$$

$$h_F = \frac{5305 * 10^4 * \dot{m}_C * w_{F,C}}{d * l * n * p_{FF,F}}$$

Dónde:

- h_D Abertura de trabajo de la maza bagacera (salida) en mm;
- h_F Abertura de trabajo de la maza cañera (entrada) en mm;
- $\dot{m}_C$ Flujo de caña o tasa de molienda en t/h;
- $w_{F,C}$ Contenido de fibra en caña en g/100 g;
- d Diámetro medio de mazas en mm;
- l Longitud de mazas en mm;
- n Velocidad de rotación de mazas en min^{-1} ;
- $p_{FF,D}$ Llenado de fibra en abertura de maza bagacera en kg/m^3 ;
- $p_{FF,F}$ Llenado de fibra en abertura de maza cañera en kg/m^3 ;

El llenado de fibra en la maza cañera o entrada $p_{FF,F}$ se calcula como una porción del llenado de fibra en la bagacera, dependiendo del tipo de molino y su posición a lo largo del tren. Para molinos con alimentación forzada, esta proporción puede ser 50 % a 65 %, mientras que para un molino simple de tres mazas, la proporción puede ser de 35 % a 50%. Se nota que estas proporciones son el recíproco de la razón entre aberturas de trabajo de las mazas cañera/bagacera, a la cual se conoce como la razón de molienda R .

- **Método surafricano**

Este método utiliza el contenido de fibra del bagazo en el nip entre las mazas superior y bagacera para calcular la abertura de trabajo a la salida h_D . Para calcular la abertura de trabajo de la maza cañera a la entrada h_F , se utiliza una razón de molienda (razón cañera/bagacera) por lo tanto:

$$h_D = \frac{286 * 10^4 * \dot{m}_C * w_{F,C}}{d * l * n * w_{F,B}}$$

$$h_F = R * h_D$$

Dónde:

$w_{F,B}$ g fibra/100 g bagazo que sale del molino,

R Razón de molienda (abertura de trabajo entrada / abertura de trabajo salida).

El factor $286 * 10^4$ Se obtiene asumiendo una densidad final "real" del bagazo de 1204 kg/m^3 y un factor de reabsorción de 1.54. Esto resulta en una densidad "aparente" del bagazo de 1855 kg/m^3 . En estas fórmulas el contenido de fibra en bagazo $w_{F,B}$ se obtiene a partir de análisis de bagazo como:

$$w_{F,B} = 100 - w_{w,B} - w_{RDS,B}$$

Un contenido de fibra en bagazo final de 50% podría aplicarse en casos donde sea común obtener, por ejemplo, la humedad 48 % y Brix 2 % en el bagazo final, ver anexo A.

La razón de molienda R depende principalmente de la posición y del tipo de molino. Tal como con el método australiano, para molinos de alimentación forzada la razón de molienda esta usualmente en el rango de 1.6 a 2.0 mientras que para molinos simples de tres mazas esta razón puede estar en el rango de 1.8 a 2.8.

3.5 IMBIBICIÓN

La imbibición compuesta en la cual se le aplica agua delante del último molino el cual presenta un jugo de bajo Brix que es casi agua, este jugo obtenido aquí se le aplica al penúltimo molino y el jugo obtenido aquí se le aplica al precedente molino y así sucesivamente. Un ejemplo de este tipo de imbibición se muestra en la Figura 3.

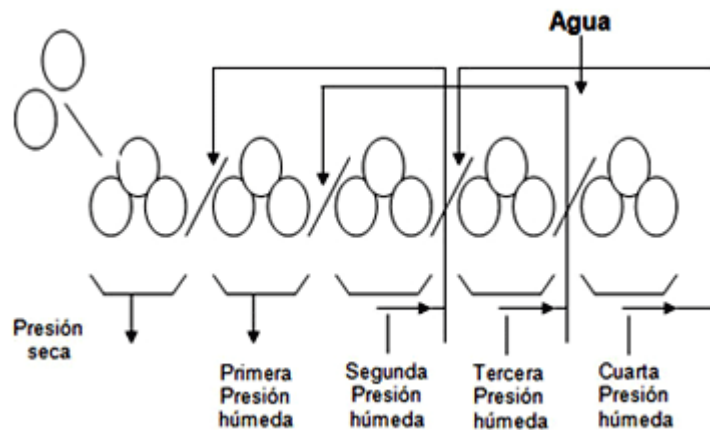


Figura 3. Tipo de Imbibición compuesta [26]

Hay que tener en cuenta que la imbibición se aplique tan uniformemente como sea posible sobre el flujo de bagazo evitando que se bloqueen con sólidos presentes, aunque independientemente del sistema de aplicación el mezclado siempre es incompleto, y existe una distribución no uniforme de los sólidos disueltos en el contenido del jugo, en la alimentación del molino siguiente. El jugo más diluido de imbibición, que se adiciona en la superficie superior, es más fácil de extraer que aquel que ya se encontraba embebido en la caña. Como resultado de esto, el Brix del jugo extraído por un molino es generalmente más bajo que el Brix del jugo residual libre que queda en el bagazo que se descarga del molino, aunque el agua libre de Brix del bagazo reduzca el Brix total en los análisis.

Como resultado de esto se dio la eficiencia en la imbibición, que se define como el Brix del jugo extraído / Brix del jugo residual. La eficiencia de imbibición es normalmente $< 100 \%$, sin embargo, de no contar imbibición antes del primer molino, el Brix del jugo extraído en una unidad es mayor que aquel del jugo que queda en el bagazo. Dando una eficiencia de imbibición $> 100\%$.

En cuanto a la cantidad de agua en imbibición algunos concuerdan en utilizar una cantidad de agua de imbibición igual a dos veces la fibra en Caña, incluso hay referencias que hablan de Valores superiores.

3.6 BAGAZO

El bagazo es el producto que queda de la caña después de ser molida en los molinos que extraen su jugo para la elaboración del azúcar y se emplea fundamentalmente como combustible en las calderas generadoras del vapor necesario para el accionamiento de las máquinas térmicas y para los procesos de calentamiento, concentración, cocimiento, secado, destilación de alcohol y otros. La cantidad de bagazo depende de su humedad, la cual cuando sale de los molinos posee una humedad del 46-55% dependiendo de la eficiencia del comportamiento del último molino, fibra de la caña y del tipo de cosecha, es aproximadamente el 30% de la caña molida [27].

El bagazo ya seco está compuesto principalmente por tres fracciones: celulosa (51,23%), hemicelulosa (24.11%) y lignina (20.67%), cenizas y otros compuestos (3.9%) las cuales se encuentran interpenetradas entre sí, mediante uniones físicas y químicas [28].

3.7 MÉTODOS PARA DETERMINAR LA FIBRA DE CAÑA

3.7.1 Método indirecto

En este método la valoración de la calidad de la caña se realiza a través del análisis de jugo de primera extracción (desmenuzador o masas de entrada al primer molino de fábrica) y en algunos casos, submuestras del jugo primario 2, entendiéndose a éste como el jugo de la caña sin dilución. Esto implica que el sistema indirecto de control de calidad, debe ser acompañado por un buen manejo en la cosecha, el transporte y el canchón, a fin de evitar estacionamientos prolongados que provocan errores insalvables en los resultados obtenidos. En el Método Indirecto deben tomarse los recaudos necesarios para evitar la mezcla de caña de diferentes productores en el conductor principal del tándem de molienda. Es preferible marcar el inicio y final de la muestra a fin de hacer coincidir la extracción del jugo mientras dure el proceso de molienda de la misma [6].

Para la aplicación de los métodos es necesario realizar dos determinaciones fisicoquímicas sobre el jugo muestreado:

- El contenido de sólidos solubles totales (Brix)
- El contenido de sacarosa aparente (Pol)

3.7.2 Método directo

La característica principal de este método reside en que evalúa la calidad fabril en una muestra de caña tomada antes de la molienda. El hecho de que se determine el porcentaje de fibra de la caña, entendiéndose a la misma como todo material insoluble en agua (fibra + trash), lo señala como un método de evaluación más confiable cuando la caña es cosechada usando sistemas semi-mecanizados y/o mecanizados que incorporan una mayor cantidad de materia extraña.

La muestra se toma directamente del transporte, lo que asegura su individualidad. Además, otra ventaja es que permite liberar los equipos de tracción una vez realizado el muestreo. Se puede señalar como desventaja que, debido al reducido tamaño de la muestra sobre la cual se realizan los análisis, tiene una menor representatividad que la muestra del sistema indirecto. Sin embargo, el número de muestreos mejora sustancialmente esta limitante [6].

3.7.3 Determinaciones analíticas

Estas determinaciones son necesarias para la aplicación de los sistemas ya mencionados, las cuales son:

- **Determinación de Porcentaje de Brix**

Se efectúa por lectura en un aerómetro con escala en grados Brix a temperatura controlada, o por la determinación con refractómetro. El aerómetro (Brixómetro) es un equipo de peso constante capaz de evaluar el cambio volumétrico sobre una escala calibrada, mientras que el refractómetro, es un instrumento capaz de

compensar el cambio de dirección de la luz al atravesar la interfase entre dos medios. En ambos casos, debe observarse la ausencia de material en suspensión y de aire incluido, ya que inciden en el resultado final.

- **Determinación de Porcentaje de Pol jugo**

Se puede realizar sobre lectura directa de una submuestra clarificada, o aprovechando la definición del grado sacarimétrico sobre una solución de 26 gramos de jugo disuelta hasta 100 ml con agua destilada libre de materia orgánica. A su vez, cada determinación puede efectuarse con Polarímetros ópticos o digitales.

Cuando se realiza mediante lectura directa, se utiliza el valor de Porcentaje de Brix para la determinación del Porcentaje de Pol en jugo como indicador de la densidad de la solución, a fin de conocer la concentración de azúcar en la misma.

El sistema indirecto debe complementarse con una determinación física de la materia extraña (Trash), que acompaña a la muestra.

Los valores determinados de Porcentaje de Brix y Porcentaje de Pol en jugo son los indicadores a utilizar para el cálculo de las siguientes variables:

$$Pureza\% = Pol\% jugo * 100 / Brix\% jugo$$

$$Pol\% Caña = Pol\% jugo * Factor de Java (Fj)$$

$$Fj = \% de Pol CAÑA * 100 / \% de Pol J. 1ra. EXTR.$$

$$Azucar Recuperado = Pol\% caña * RW * ES * EI * 1/Pol Azucar$$

Dónde:

RW Recuperación Teórica Winter.

ES Extracción de Sacarosa.

EI Eficiencia Industrial

Este tipo de análisis también puede ser aplicado para el método directo, Sin embargo, la posibilidad del sistema de muestreo por sonda de ser totalmente automatizado hace que, en general, estos sistemas están más asociados al uso de instrumentos digitales en los laboratorios. Esta combinación de muestreo y determinaciones analíticas automáticas, si bien requieren de inversiones iniciales mayores, evita errores operativos y disminuye los costos por mano de obra, otorgándole al sistema mayor transparencia. La determinación de fibra en caña, en general, se realiza mediante el uso de ecuaciones de regresión entre el peso del residuo fibroso obtenido en la operación de prensado y el valor del porcentaje de fibra presente en la muestra. Estas ecuaciones muestran un buen grado de correlación cuando el material inorgánico que acompaña a la materia prima es relativamente bajo. Esto también se puede ayudar con la determinación de humedad si se requiere más precisión como ya se había dicho anteriormente.

4 DATOS, PRUEBAS Y CÁLCULOS

4.1 DETERMINACIÓN DE LA FIBRA FORMA INDIRECTA

Este método es aplicado en el laboratorio móvil, por eso se decide realizar una visita al laboratorio móvil de CENICAÑA, el cual le presta los servicios a los ingenios con el fin de ayudar en los desempeños de molino, en el utilizan el método indirecto para estimar el porcentaje de fibra y realizar los cálculos correspondientes y poder satisfacer las necesidades de los servicios por lo cual es solicitado, para ello se toman unas muestras representativas directamente de los equipos que intervienen en el proceso de extracción, las muestras que se tomen serán estudiadas y tratadas con los equipos presentes en el laboratorio móvil y equipos que son de propiedad del ingenio.



Figura 4. Laboratorio móvil en funcionamiento

En la Figura 4 se muestra el laboratorio móvil en el ingenio Castilla, tiene muchos objetivos de importancia para la realización del proyecto. Como objetivo general de la visita se tiene, poder visualizar los equipos y su funcionamiento, como se obtienen las muestras representativas para su análisis, los tiempos que se toman por muestras o turnos si es el caso, en qué estado se encuentran los equipos, y los pasos que se toman para determinar el contenido de porcentaje de Brix, porcentaje

de Pol y determinación de humedad y si los pasos con que se determinan estas cantidades son iguales a los explicados anteriormente.

4.1.1 Instrumentación

Uno de los primeros equipos que trabajan en los procesos del laboratorio móvil son los desintegradores, en la Figura 5 se muestra uno de los desintegradores utilizados en el laboratorio móvil.

Este equipo está conformado principalmente por un recipiente metálico y un eje rotatorio con cuchillas “muy afiladas” impulsadas por un motor eléctrico, con lo cual posteriormente desintegra o licua la muestra de peso conocido junto con una cantidad de agua determinada, presenta una velocidad de 6840 rpm, el tiempo de desintegración depende de la cantidad de masa y agua.



Figura 5. Desintegradores presentes en el laboratorio móvil.

Otro de los equipos utilizados es el homogeneizador (tumbler), lo cual generalmente lo que hace es mezclar de manera uniforme dos sustancias con la cual la muestra al final presenta las mismas propiedades en toda la muestra, en este caso aquí sería la muestra representativa de caña y el agua que se le agregan. Al final del proceso

de homogeneizado se toma una muestra la cual es uniforme y se le realiza el respectivo análisis. En la figura 6 se ve el equipo que presenta el laboratorio móvil.



Figura 6. Homogeneizador presente en el laboratorio móvil

Para determinar el contenido de humedad de la materia prima se utilizará un horno tipo Spencer de propiedad del Laboratorio Móvil de CENICAÑA, el cual se observa en la Figura 7. Este horno tiene la capacidad trabajar con tres muestras representativas a la vez, El secado de la muestra es realizado con aire proveniente de un ventilador de tiro forzado, el aire alcanza un rango de temperatura entre 105 y 115 °C. La muestra a analizar se debe mantener durante un tiempo de 2 horas bajo estas condiciones, finalmente para obtener el porcentaje de humedad se utiliza la siguiente ecuación (1):

$$Humedad = \frac{m_1 - m_2}{m_1} * 100 \quad (1)$$

Dónde:

m_1 Masa de la muestra humedad.

m_2 Masa de la muestra seca.



Figura 7. Horno Spencer

También se cuentan con otros instrumentos que ayudan en la obtención de las muestras representativas para el análisis como lo son una báscula y recipientes como se muestran en la Figura 8.



Figura 8. Instrumentos adicionales del laboratorio móvil

4.1.2 Procedimiento

Como ya se había dicho el laboratorio móvil se encuentra en la instalaciones del ingenio Castilla, en el ingenio se cuenta con 6 molinos en funcionamiento, las mediciones correspondientes y toma de muestras se encuentran estandarizadas para trabajar en el laboratorio móvil, teniendo en cuenta esto se requiere de 8 muestras representativas cada una de ellas con un valor mayor a 2000 gr, 2 de las

muestras serán tomadas de la caña preparada a la entrada del tándem de molinos, las muestras restantes serán tomadas a la salida de cada molino.

Una de las muestra de caña preparada, es llevada al homogeneizador, donde será lavada por 10 minutos, posteriormente se extrae el jugo para el análisis de Pol, por medio de un polarímetro que se tiene en el ingenio, las proporciones utilizadas para este procedimiento son 1000gr de caña preparada y 10000gr de agua.

Las muestras restantes serán llevadas a los desintegradores cada una por 40 minutos, en el laboratorio se tienen tres desintegradores, las proporciones de muestra se observa en la Tabla 1.

	Caña preparada	Molino 1	Molino 2	Molino 3	Molino 4	Molino 5	Molino 6
Cantidad de muestra	2000 gr	1000 gr	800 gr	800 gr	600 gr	600 gr	600 gr
Cantidad de agua	6000 gr	6000 gr	6000 gr	6000 gr	6000 gr	6000 gr	6000 gr

Tabla 1. Datos de cantidades para desintegrar

Al tener 7 muestras y trabajando con los tres desintegradores al mismo tiempo el proceso dura 120 minutos, Al finalizar los 40 minutos se obtiene una muestra uniforme, como se observa en la Figura 9.



Figura 9. Caña después de 40 minutos en el desintegrador

Cada muestra se cola y exprime hasta extraer la mayor cantidad de jugo que sea posible. Cada uno de los jugos extraídos es analizado para establecer los contenidos de Brix y Pol, hay que tener en cuenta que en el tiempo indicado no se apreció el tiempo de alistamiento de cada proceso como el lavado de equipos, el pesado, etc.

Para determinar el contenido de humedad se usó el horno presente en el laboratorio, se toma 7 muestras cada una de 100gr (6 molinos y 1 caña preparada) cada una es puesta en un recipiente y llevado al horno por 2 horas, con esto obtenemos el porcentaje humedad, hay que tener en cuenta que el horno tiene capacidad de 3 muestras, el horno trabaja con un ventilador y una resistencia, su funcionamiento es por medio de convección forzada, se trabaja con una temperatura de 105°C.

La muestra tomada del primer molino presenta mayor humedad y la del último menor humedad, es lo que sucede casi siempre. Ahora sabiendo que la caña esta compuestas de Brix, humedad y fibra, se puede establecer contenido de fibra

presente en la caña. Con estos datos se puede ver el contenido de sacarosa en cada extracción y poder ver el desempeño de cada molino.

Que para tener en cuenta el porcentaje de sacarosa perdida en el bagazo oscila entre 1 % y 1.5%, lo ideal es poder bajar este porcentaje el cual es sacado de los estándares de los propios ingenios colombianos, y la meta es que cada ingenio esté cumpliendo con lo estipulado, puesto que se verá en la extracción y por ende como está trabajando y produciendo lo mejor posible el ingenio para tal fin han contribuido al establecimiento de un sistema de intercambio mensual de información estandarizada interingenios. El sistema aporta índices de eficiencia, calidad y productividad que permiten la comparación de la gestión, el desempeño y los costos entre ingenios [29].

4.2 DETERMINACIÓN DE FORMA DIRECTA

Para la realización y experimentación con este método se basó en el manual del SRI de 1996, instruction and operation manual for the 500 gram can fibre machine [9], en él se presentan los detalles que se refiere a la instalación operación y mantenimiento de la máquina, esta máquina tiene como objetivo determinar el contenido de fibra de toda clase de caña preparada.

El procedimiento utilizado como lo explica el manual es: se pesa exactamente 500 gramos de muestra de caña preparada, está es ligeramente comprimida en un contenedor cónico cilíndrico con un filtro de gaza en su base. Una tapa perforada se coloca en la parte superior, para distribuir el agua uniformemente sobre la superficie de la muestra. El contenedor con la muestra de caña se une al mecanismo de abrazadera de tornillo en el lado derecho de la máquina del SRI [7]. Luego agua caliente a aproximadamente 40°C se recircula a través de la muestra durante un período de 20 minutos. Durante este período, la muestra se transforma en un filtro activo que atrapa el material sólido en sus intersticios. Al final de este período, la recirculación de agua se vierte a los residuos. Luego durante 45 minutos agua

caliente a 90°C se hace pasar a través de la muestra, mientras que una purga de 1,5 litros por minuto de agua fresca entra en el sistema. El agua de rebose se vuelca a la basura. Al final del período de 45 minutos el agua de lavado, que es entonces efectivamente clara de sólidos solubles, se vierte a los residuos. Pasando este periodo de tiempo la muestra se mueve entonces a la estación de secado en el lado izquierdo de la máquina donde se elimina la humedad haciendo pasar un flujo controlado de aire a 105°C a través de la muestra durante aproximadamente una hora hasta obtener una masa constante [9].

Respecto al método de muestreo y submuestreo de caña preparada, se basa a la que se aplica a la determinación de la fibra como se especifica en el Manual de Laboratorio para BSES Australian Sugar Mills, Volumen 2, método 4, Sección 4.0 (BSES, publicado 1991) o revisiones posteriores de ese método.

Los pasos para la preparación de la muestra según el manual se muestran a continuación.

Paso 1. Pesar y registrar una muestra representativa de caña preparada (nominalmente 500 g) con una precisión de 0,1 g.

Paso 2. Llenar un recipiente limpio muestra seca equipado con una gasa de malla 120 mesh en su base, con la muestra de caña preparada, la caña debe ser colocado uniformemente en el recipiente y no debe ser compactado indebidamente ya que esto provocará presiones anormalmente altas para ser registrados en el medidor de presión durante la recirculación y ciclos de lavado.

Paso 3. Colocar una segunda pantalla perforada en la parte superior de la caña en el recipiente y el recipiente está entonces listo para su fijación a la máquina de fibra Can.

El manual presenta a rasgos muy generales los instrumentos y herramientas necesarios del equipo, en la Figura 10 se puede visualizar el equipo que presenta

el manual, en si para determinar la fibra presente después de todo el proceso lo hace por medio de gravimetría de la siguiente manera.

Para la realización experimental se tomó las medidas y datos que se aplican para la determinación de fibra, esta se realizó por medio de gravimetría, para la validación de esto se optó por realizar el método como lo indica el manual ya mencionado anteriormente,

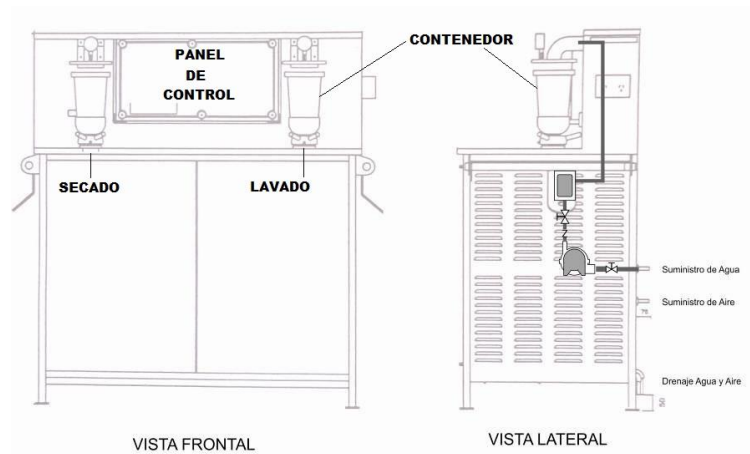


Figura 10. Equipo que presenta el manual [9].

Utilizando los valores de peso grabados, el siguiente paso consiste en calcular la fracción de fibra por diferencia de peso. Por ejemplo:

Peso de la caña (en contenedor tarado) (g) = 499,6

Peso de fibra seca + recipiente caliente (g) = 686,4

Peso del recipiente caliente (g) = 618,9

Peso de fibra seca (g) = 67,5

Fracción de fibra = $67.5/499.6$

= 0,1351

Porcentaje de fibra en la caña = 13,51

El peso del recipiente incluye también el peso de la gasa de base y la tapa perforada.

4.2.1 Instrumentación

En las instalaciones de Cenicaña se tiene la facilidad de adquirir la instrumentación necesaria para la realización experimental, los equipos necesarios para desarrollo experimental son: resistencias, que nos permitirá calentar el agua a la temperatura indicada, bombas sumergibles que nos ayudaran a la recirculación del fluido y de esta forma poder lavar la caña preparada de manera continua, abastecimiento de agua, termómetro que nos permitirá visualizar la temperatura de trabajo, mangueras, horno donde nos permitan secar la muestra, pesa electrónica y la muestra de caña preparada sobre la cual se realiza el experimento, esta muestra se toma del ingenio Mayagüez, el montaje se puede visualizar en la Figura 11.

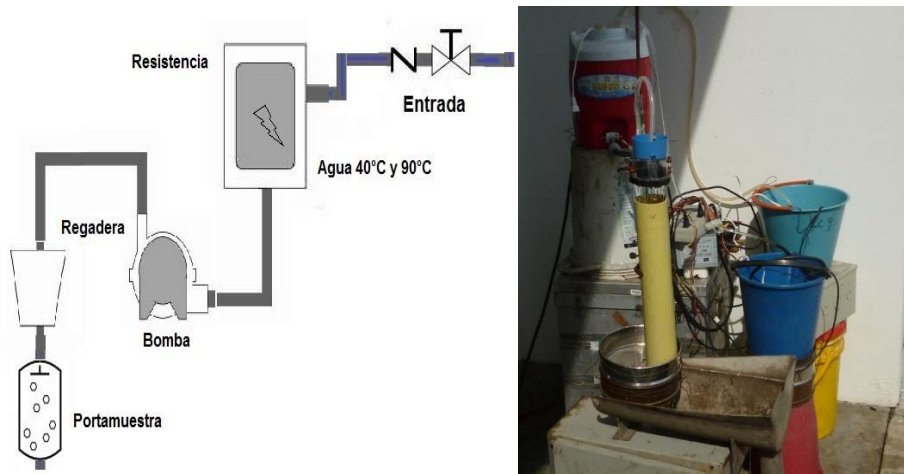


Figura 11. Montaje experimental.

Se basó en lo descrito por el manual para el desarrollo del experimento, se trabaja con agua a una temperatura de 40°C y 90°C, la cual es regada uniformemente sobre la muestra, como lo observa en la Figura 12, luego es llevada al horno que se tiene en las instalaciones de Cenicaña Figura 13, para poder calentar el agua se usa una serie de resistencias domesticas las cuales se introducen al interior del agua y se

maneja la temperatura hasta obtener la deseada, también se contó con una serie de bomba sumergibles que ayudan a la circulación del agua y mantiene el proceso continuo, estas bombas poseen un flujo de 2.2 litros/minuto y el descrito por el manual el flujo mínimo es de 1.5 L/min pero para fin del proceso la bomba es aceptable.



Figura 12. Riego agua uniforme sobre la muestra



Figura 13. Horno para el secado de muestras.

4.2.2 Procedimiento

Siguiendo los procedimientos que indica el manual, se pesa 500 gramos de caña preparada y esta es expuesta durante 20 minutos con agua uniformemente a una temperatura de 40°C, Figura 14 y luego 45 minutos a una temperatura de 90°C, ya terminado esto es retirado y llevado al horno. El horno se encuentra a 70°C mientras, por ende se debe estar pesando la muestra hasta que el dato sea constante y por ende se puede decir que ya se tiene la muestra totalmente seca, este proceso no influye en con el método ya que la finalidad es obtener la muestra seca, esto se muestra en la Figura 15. Los datos de la muestras se visualizan en la Tabla 2, ahora por medio de gravimetría obtendremos los datos de fibra de la muestra obtenida, estos será comparados con los datos de caña preparada que presento el ingenio el mismo día, tal y como lo muestra la Tabla 3.

Peso	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
inicial	500	500	500
secado 1	187	93.2	93.7
secado 2	166.1	92.6	92.8
secado 3	123.4	90.5	90.7
secado 4	90.1	90.3	90.4

Tabla 2. Pesos de muestras secas



Figura 14. Control de temperatura.

	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Datos del ingenio
Porcentaje de fibra en la caña	18.02%	18.06%	18.07%	16.271%

Tabla 3. Datos de porcentaje fibra



Figura 15. Peso de muestras después de secado.

Los datos obtenidos son aceptables teniendo en cuenta los errores que pueden estar en la toma de medidas así como en el desperdicio de muestras entre otros contratiempos que se tuvieron tales como, que el flujo no fue del todo constante a la temperatura indicada, la bomba no presenta un flujo deseado. Por eso se realizaron tres pruebas sobre el mismo material para minimizar este tipo de errores, además el objetivo de la realización de esto era verificar que el procedimiento descrito por el manual era óptimo el cual al ver los resultados se hace verídica esta información.

4.3 DISEÑO DE EQUIPO A DESARROLLAR

El equipo a desarrollar debe tener unos ciclos que cumplir, como es el lavado lo cual se hará con un flujo de agua para limpiar el equipo cuando se vaya a usar, el enjuague en donde se tendrá agua a alta temperatura para lavar la caña preparada y así extraer todo su contenido de jugo residual dejando solo fibra húmeda, y por último el secado con aire para eliminar la humedad presente en la fibra, y así obtener al final solo fibra seca.

Se sabe que los requerimientos del equipo, son agua, aire y electricidad, basándose en el manual tenemos que se necesita suministro de agua caliente limpia con una presión de ≤ 150 KPa, a una temperatura igual $60 \pm 5^\circ\text{C}$, para el flujo a diferencia de lo explicado por el manual [9], se tendrá como máximo 10 L/min esto con el fin de mejorar el proceso basándose en lo indicado por el nuevo método [30], agua fría limpia con una presión ≤ 150 KPa a una temperatura de $20 \pm 5^\circ\text{C}$ y también al mismo flujo de 10 litros/minuto, se tiene la necesidad de usar 10 litros de agua por muestra para cada ciclo en donde esta agua será recirculada sobre la muestra, para el suministro de aire los requerimientos son de $20 \text{ m}^3/\text{h}$ a una presión de ≥ 200 KPa, para el diseño vamos a separar el proceso de lavado del proceso de secado, realizando cada proceso a cada lado de la máquina, también se busca automatizar el proceso minimizando la intervención por medio del operario.

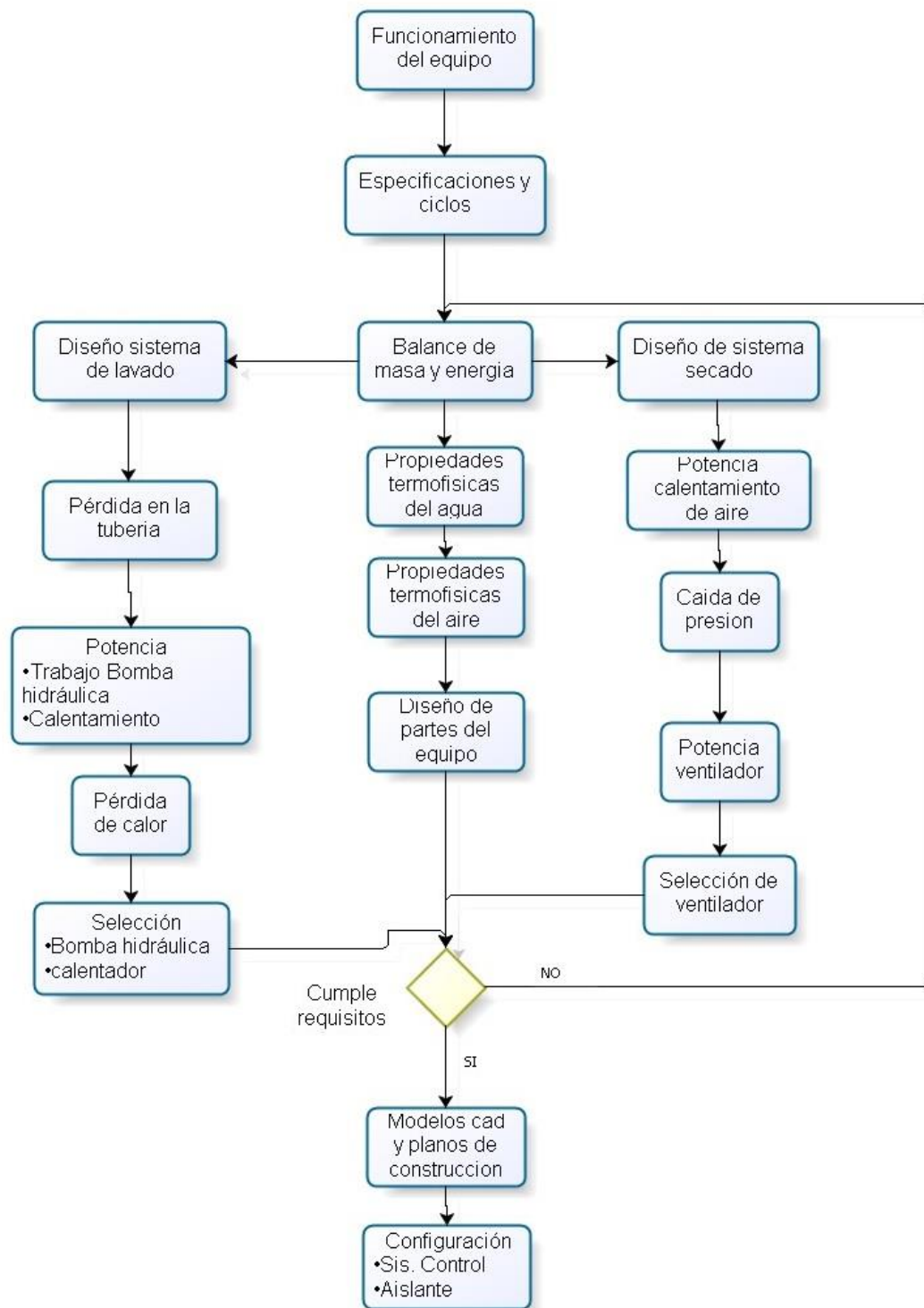


Figura 16 Diagrama de flujo para el diseño del equipo

4.4 CÁLCULO PARA LAVADO DE LA MUESTRA

Un depósito de agua fría a $20\pm 5^{\circ}\text{C}$, posiblemente agua de la llave. Se estima un tanque que se llenara con la cantidad de agua necesaria para el proceso de lavado de 10 litros por muestra, esto por cada ciclo de lavado, esta agua será calentada por medio de un calentador eléctrico seleccionado de catálogos comerciales, con el valor del flujo y potencia requerida.

La bomba acoplada al motor, se selecciona a partir de las condiciones de presión y diferencia de altura del depósito con respecto al portamuestra donde estará la muestra de caña, antes de la descarga hacia al portamuestra también se instalan dos válvulas, una de check o antirretorno y la otra de regulación y mantenimiento; la primera para impedir el paso del flujo en un sentido y permitirlo en el otro, y la segunda para regular el flujo del agua. El esquema del lavado se puede observar en la Figura 16.

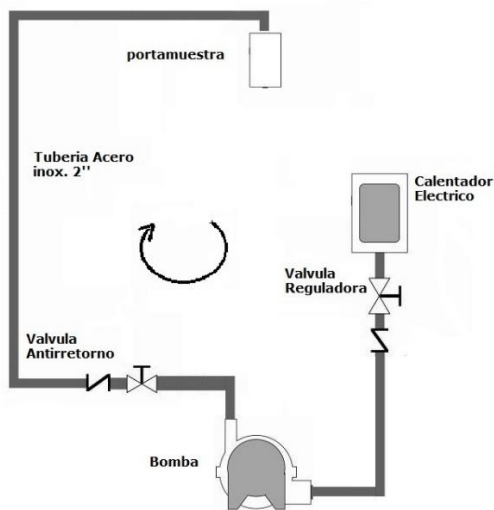


Figura 17. Esquema circuito de agua para el proceso de lavado

4.4.1 Cálculo de la potencia para selección de motobomba

Se requiere el cálculo de la potencia de la bomba y el motor, o la motobomba para ellos se realiza un análisis de energía para todo el circuito, este se realiza entre un par de puntos. El par de puntos se muestra en la Figura 17.

$$EE_{1-3}$$

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 + H_B = \frac{P_3}{\gamma} + \frac{V_3^2}{2g} + Z_3 + \sum H_r \quad (2)$$

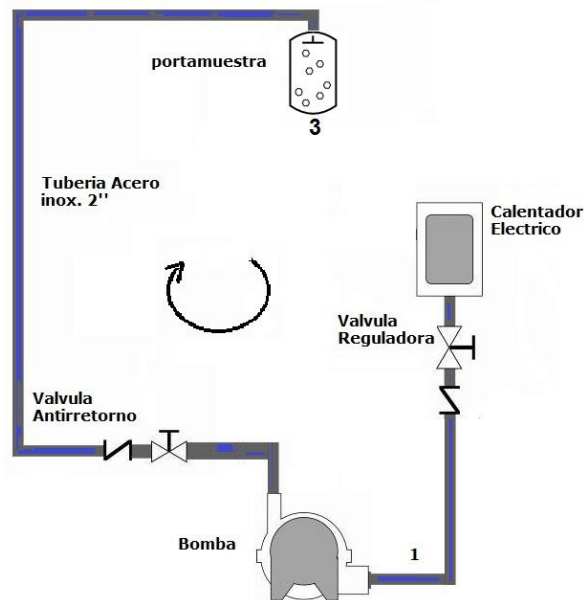


Figura 18. Esquema para el análisis de energía entre el par de puntos.

Dónde:

P Presión en el punto,

V Velocidad del fluido en ese punto.

Z Altura con respecto a la referencia.

H_B Carga de la bomba en metros.

$\sum H_r$ Sumatoria de las pérdidas entre el par de puntos y por último

γ Y g Peso específico y la gravedad respectivamente.

En la Tabla 4 se encuentran algunas de estas medidas encontradas por medio de la temperatura de trabajo.

	40 °C		90 °C	
	Punto 1	Punto 3	Punto 1	Punto 3
<i>P</i> (Kpa)	7,3844	7,3844	70,182	70,182
<i>V</i> (m/s)	0	0,082246	0	0,082246
<i>Z</i> (m)	0.35	1	0.35	1
<i>γ</i> (N/m ³)	9730	9730	9466	9466
<i>g</i> (m/s ²)	9.8	9.8	9.8	9.8

Tabla 4. Valores de los tipos de energía para cada punto.

Los punto 1 y 3 son respectivamente los puntos de succión y descarga del sistema de bombeo, se tiene en cuenta que la succión es de desplazamiento positivo, para las pérdidas se calculan dada la ecuación (3), teniendo en cuenta las pérdidas que se encuentre antes de la bomba y después de la bomba.

$$\Sigma H_r = f \frac{L_t V_t^2}{\phi_t 2g} + \Sigma K \frac{V_t^2}{2g} \quad (3)$$

Dónde:

f Es el coeficiente de resistencia que depende del número Reynolds, del material y de la dimensión de la tubería, se calculan por medio del diagrama de Moody anexo B.

L_t Longitud de la tubería.

φ_t Diámetro de la tubería.

V_t Velocidad de la tubería.

g , la gravedad, y K es el coeficiente de resistencia por accesorios.

Esta ecuación (3) se calcula para un diámetro constante, por lo que la sumatoria de pérdidas se divide en dos, entre la succión y la entrada de la bomba, y entre la salida y la descarga. Las longitudes se toman como un aproximado a partir de los datos del manual.

La tubería es de acero inoxidable 304, este se seleccionó por su buena resistencia a la corrosión y a las altas temperaturas, los accesorios de la tubería que se tienen son: 5 codos k_c , una válvula de regulación K_{V1} , una válvula de check K_{V2} o anti retorno ubicada después de la bomba, y una válvula de regulación K_{V3} de mantenimiento ubicada antes de la bomba. Las cantidades correspondientes se pueden visualizar en el anexo C.

Punto	Succión		Descarga	
	40 °C	90 °C	40 °C	90 °C
f	0,078	0,075	0,08	0,076
Lt (m)	0,5	0,5	0,82	0,82
øt (m)	0,0381	0,0381	0,0254	0,0254
Vt (m/s)	0,146216292	0,146216292	0,082246664	0,082246664
ΣK	5,8	5,8	10,7	10,7
ΣHr (m)	1,717443073	1,717400129	5,842217885	5,842173318

Tabla 5. Valores de las pérdidas de carga en la succión y descarga.

Dado todos los datos anteriores y resolviendo para la ecuación (2) y (3) se obtiene que:

	40 °C	90 °C
ΣHr (m)	7,557702594	7,557680751
HB (m)	8,210005145	8,209917669

Tabla 6. Valores de las pérdidas de carga y carga en la bomba.

Por lo tanto la potencia de la bomba queda determinada por la ecuación (4):

$$P_{otB} = \gamma QHB \quad (4)$$

$$P_{otB} = 13,31656 \text{ W para } 40^{\circ}\text{C}$$

$$P_{otB} = 12,95510 \text{ W para } 90^{\circ}\text{C}$$

La potencia de salida de la bomba está dada como dato, pero con este valor no se puede asegurar que el flujo de agua sea capaz de arrastrar todos los componentes y partículas que pertenezcan a la muestra que no sean fibra de caña. Para ello se recurre al análisis de la permeabilidad de caña de azúcar preparada y bagazos intermedios utilizando la teoría de flujo en medio poroso, este análisis se realizó en la tesis del diseño y construcción de un banco de pruebas para evaluar la permeabilidad de materiales fibrosos, el banco de pruebas es un dispositivo mecánico que permite comprimir una muestra de caña preparada, bombear agua a través de dicha muestra y medir el flujo de agua y su caída de presión que presenta [31].

Ya que la muestra de caña en el banco de pruebas se comprime y se hace pasar un flujo de agua que es impulsado por una bomba, se requiere que la bomba se seleccione para la máxima presión requerida en las pruebas, al igual que en este banco de pruebas, el equipo a diseñar requiere que la bomba trabaje a la presión que tenga la capacidad de arrastrar los sólidos de la muestra de caña, para saber si la presión dada como dato para la máquina es capaz de hacer lo requerido, se halla la presión basándose en los cálculos de requerimiento de la bomba de agua del banco de pruebas y comparándolo con el tenido.

La presión requerida puede ser evaluada de la ley de Darcy, ecuación (5):

$$Q = -\frac{kA}{\mu} \text{grad}(p) \quad (5)$$

Para que la ley de Darcy sea válida, sólo a un flujo laminar, gravitacional, estacionario, donde el agua fluye a lo largo conductos irregulares en la masa del material y sigue los principios generales de la hidráulica [32]. Aunque el flujo de trabajo no es laminar se asume para ratificar cual sería la presión que necesita la bomba.

Asumiendo una caída uniforme de presión a través del bloque fibroso, y que la presión manométrica a la salida del portamuestra sea cero, ya que la muestra no se comprime, el gradiente de presión puede calcularse como la presión de entrada sobre la altura del bloque de caña, ecuación (6):

$$grad(p) = \frac{p}{h} \quad (6)$$

A área transversal del cilindro.

μ Viscosidad dinámica del agua a la temperatura.

k permeabilidad evaluada en función de la relación de compresión ecuación (7):

$$k = 9,25E - 12 * C^{-8.6} \quad (7)$$

En este caso $C = 1$, porque en el cilindro contenedor no se comprime la muestra. Por lo tanto:

$$k = 9,25E - 12$$

Despejando la presión se obtiene:

$$P = \frac{Q * \mu * h}{k * A}$$

	40 °C	90 °C
Q (m ³ /s)	0,0001667	0,0001667
μ (m)	0,000653	0,000314
A (m ²)	0,1016	0,1016
K (m ²)	9,25E-12	9,25E-12
H (m)	0,1	0,1

Tabla 7. Valores para ecuación (5).

Se obtiene:

$$P = 145,2 \text{ KPa para } 40^{\circ}\text{C}$$

$$P = 69,8 \text{ KPa para } 90^{\circ}\text{C}$$

Por lo tanto la presión de salida de la bomba debe ser 145,2KPa, por lo que se puede decir que la presión dada inicialmente establecida para el equipo a diseñar cumple con la presión requerida para flujo en materiales fibrosos, incluyendo perdidas que son aproximadamente 10%.

4.4.2 Calculo de la potencia del calentador

Para el cálculo de la potencia del calentador requerida para calentar el agua se realiza por un balance de energía.

$$Q_{entra} = \dot{m}h_2 - \dot{m}h_1 \quad (8)$$

Dónde:

Q Calor transferido por el calentador.

$\dot{m}$ Flujo másico.

h_1 y h_2 Entalpías antes y después de la transferencia de calor. Las entalpías se obtienen de las tablas termodinámicas para el agua. Esto se puede ver en la Tabla 8.

Estado	Temperatura (°C)	Presión (KPa)	Entalpia (KJ/Kg)	V. específico (m³/Kg)
1	20	150	84,0	0.001
2	40	150	167,67	0,00101

Tabla 8. Estados termodinámicos para 20°C y 40°C.

Se asume que el flujo másico es el mismo en ambos estados y se determina a partir de:

$$\dot{m} = \rho \dot{v} \quad (9)$$

Dónde ρ , es la densidad del agua y se calcula a partir del volumen específico promedio entre los dos estados, y se obtiene 995,32 Kg/m³. Y $\dot{v}$, es el flujo volumétrico, dado en los requerimientos como 10 litros/minuto lo que es igual a 16,67E-5 m³/s. reemplazando en la ecuación (9), se obtiene:

$$\dot{m} = 0.166 \frac{Kg}{s}$$

Así se obtiene que:

$$Q_{entra1} = 13.8 \text{ KW} = VI = \frac{V^2}{R}$$

De la misma manera anterior, se calcula, el valor de la potencia, para calentar el agua desde 20 a 90°C.

Se requiere el cálculo de los valores de este estado y recalculando la densidad promedio del agua. Tabla 9.

Estado	Temperatura (°C)	Presión (KPa)	Entalpia (KJ/Kg)	V. específico (m³/Kg)
1	20	150	84,0	0.001
3	90	150	377,03	0.00104

Tabla 9. Estados termodinámicos para 20°C y 90°C.

El nuevo flujo másico es:

$$\dot{m} = 0,161 \frac{Kg}{s}$$

Que comparado con el primero, es prácticamente el mismo.

Resolviendo para la ecuación (8), con estos valores teniendo que el estado 2, cambia por el 3, se obtiene:

$$Q_{entra2} = 47,18KW = VI = \frac{V^2}{R}$$

• Pérdida de calor

Nombre	Formula	resultado
Fluido	$q = h_a \pi D_i (T_a - T_i)$	
Pared tubería	$q = \frac{2\pi K_t}{2.3 \log\left(\frac{D}{D_i}\right)} (T_i - T_s)$	
aire	$q = h_t \pi D (T_s - T_\infty)$	
Perdidas de calor (W)	$q = \frac{\pi(T_a - T_\infty)}{\left(\frac{1}{h_a D_i}\right) + \left(\frac{2.3}{2K_t}\right) \log(D/D_i) + \left(1/h_t D\right)}$	0.023
Perdidas lapso de tiempo (W)	$q = A * t(h + h_r)(T_s - T_\infty)$	22.65

Aquí se presentan las pérdidas de calor que se tienen en un lapso de tiempo de una hora y por metro de tubería.

A partir de estos valores se selecciona un calentador, que a partir del sistema de control permita calentar el agua tanto a 40°C como a 90°C.

4.5 CALCULO PARA EL SECADO DE LA MUESTRA

Para el secado sobre la muestra se elige el tipo de secado de lecho de empacado directo, el cual consiste básicamente de un tubo con partículas empacadas en el fondo, con porosidad mínima, permitiendo que el flujo de calor atraviese la muestra generando un secado uniforme, presenta una buena rata de transferencia de calor por el contacto directo gas-sólido, mejorando la precisión de los datos de secado. Se usa principalmente para el secado de cereales y fibra.

Tomando como base los requerimientos del manual [7], la temperatura que se maneja será de 105°C y un flujo de aire de $20\text{ m}^3/\text{h}$ a una presión mínima de 200KPa . Se tomara aire a temperatura ambiente y se llevara a la temperatura deseada de trabajo, para ello se necesita un intercambiador de calor que junto con un ventilador suplirán las necesidades de proceso de secado, el intercambiador será diseñado tomando como referencia el equipo ya diseñado del proyecto de grado de diseño de un secador de muestra de bagazo[8], mientras que el ventilador será seleccionado de catálogos comerciales con el valor del flujo y potencia requerida, en la Figura 18 se observa el esquema preliminar del proceso de secado.

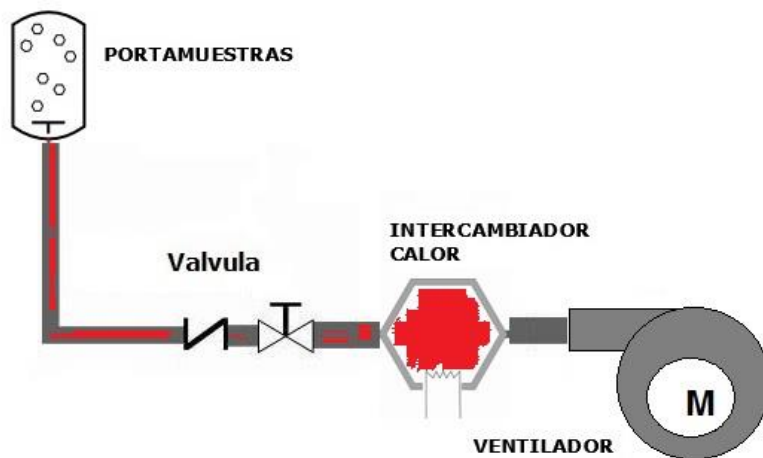


Figura 19.Esquema proceso de secado

4.5.1 Cálculo de potencia para el calentamiento del aire.

Se necesita la potencia para así determinar cuál es la requerida para llegar a la temperatura óptima de trabajo. Aquí se tiene en cuenta el calor que gana el aire por lo tanto para este cálculo se utiliza la siguiente ecuación (10) [33].

$$Q = C_p \dot{m} (T_f - T_i) \quad (10)$$

Para el cálculo del flujo másico se toma el máximo valor de caudal suministrado por el manual [7]. El flujo másico se calcula mediante la siguiente ecuación (11).

$$\dot{m} = Q \rho_{aire} \quad (11)$$

Q (m^3/s)	ρ_{aire} (Kg/m^3)	$\dot{m}$ (Kg/s)	C_p ($J/Kg^{\circ}C$)	T_i ($^{\circ}C$)	T_f ($^{\circ}C$)
0,0056	0,9337	0,00523	1013,31	25	105

Tabla 10. Variables para el cálculo de potencia.

Dónde:

Q Caudal.

ρ_{aire} Densidad del aire.

$\dot{m}$ Flujo másico.

T_i Temperatura ambiente.

C_p Calor específico.

$$Q = 423,865 \text{ W}$$

Los valores de calor específico y de la densidad del aire fueron tomados de la referencia [34]., esta potencia seria la necesaria de la resistencia eléctrica para el calentamiento del aire.

Para la selección del ventilador se utilizan los valores de caudal y caída de presión presentes en el manual y el anexo D, estos valores son un caudal de 0,0056 m³/s y una presión estática de 249.08 Pa, a este valor de presión estática debemos sumar las pérdidas de presión en el intercambiador y por fricción en el ducto de calefacción.

- **Pérdidas de presión por fricción**

En libros de Ventiladores y diseño de ductos, así como de catálogos se encuentran unos gráficos para calcular la caída de presión de gases debidos a ductos de sección rectangular y circular [35]. En el gráfico del anexo E y anexo F, se muestra la relación entre la velocidad, cantidad del aire y pérdidas por fricción en ductos redondos de varios diámetros.

El ducto de calefacción tendrá una sección rectangular de 7,87 pulgadas (0,2m) por cada lado y una longitud máxima de 0,5 m por lo que se busca el diámetro equivalente de un ducto rectangular con igual perdida, obtenemos un diámetro de 8,66 pulgadas por ende la caída de presión es de 0,01 inH₂O (2,49 Pa) en 100 ft de longitud de tubo.

- **Caída presión en el intercambiador de calor.**

Debido a que el ventilador deberá invertir parte de su potencia en mover el flujo de aire a través del intercambiador de calor es necesario cuantificar este gasto para realizar una adecuada selección del ventilador. La caída de presión en el intercambiador de calor se calcula mediante la siguiente ecuación (12), basada en la caída de presión a través de un banco de tubos.

$$\Delta P_{Intercambiador} = N_L * x * f * (\rho * \frac{V_{max}^2}{2}) \quad (12)$$

Dónde:

N_L Número de columnas

x Factor de corrección

f Factor de fricción

ρ Densidad del aire

V_{max} Velocidad máxima del fluido en el intercambiador

Realizando un corte longitudinal del intercambiador se observa su distribución geométrica interna, como se muestra en la Figura 18.

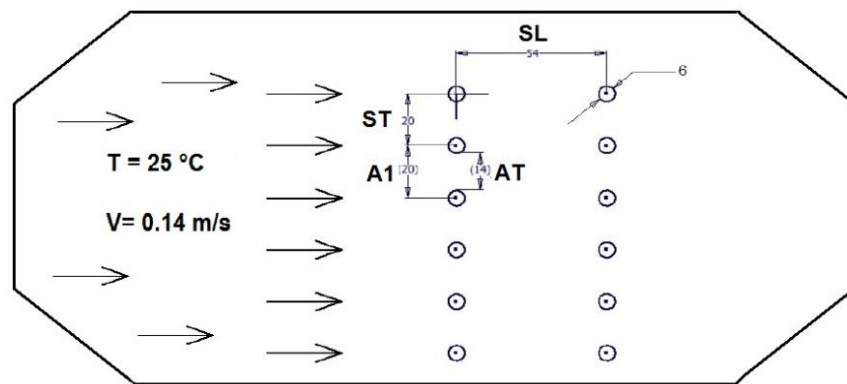


Figura 20. Corte longitudinal intercambiador de calor.

En el anexo G se muestra el factor de corrección en función de la V_{max} del fluido que en este caso son $x = 0,32$ y $f = 1,4$. La velocidad máxima del fluido se determina con base en el principio de conservación de la masa para el flujo, la cual se puede expresar en la ecuación (13) y (14) como:

$$A1 * V\rho = AT * V_{max}\rho \quad (13)$$

O también así:

$$ST * V = V_{max} * (ST * D) \quad (14)$$

Despejando V_{max} se tiene que:

$$V_{max} = \left(\frac{ST}{ST - D} \right) * V$$

Anteriormente se determinó que el caudal de aire que se moverá a través del intercambiador de calor es 0.0056 m³/s, y dividiendo este flujo de aire sobre su área transversal que es de 0.04 m² se obtiene que la velocidad en el intercambiador es de 0.14 m/s. Reemplazando en la fórmula (14) se tiene que:

$$V_{max} = 0.2 \text{ m/s}$$

Tomando la densidad del aire como 0.9999 kg/m³ y como se muestra en la Figura 18 el número de columnas son 2, con los valores anteriormente calculados, el valor de la caída de presión en el intercambiador de calor será.

$$\Delta P_{Intercambiador} = 0.017 \text{ Pa}$$

A esta caída de presión se le suma la caída que presenta en la salida y entrada del intercambiador que es en forma de campana que es de 0.024 ver anexo F.

La caída presión total será la suma de la caída de presión en el lecho, caída de presión en el intercambiador más las pérdidas de presión por fricción.

$$P_{TOTAL} = 0.041 + 2.49 + 249.08 = 251.612 \text{ Pa}$$

Esta presión estática se debe dividir por un factor de corrección F que representa las condiciones del sitio de instalación y las respecto a las condiciones estándar del fluido. Para este caso se tiene:

$$F = F_1 * F_2$$

Dónde:

F_1 Cambio de densidad del aire que se presenta en el sitio de instalación.

F_2 Altitud donde se instalara el ventilador respecto al nivel del mar y la humedad relativa.

Se tiene que para CENICAÑA la humedad relativa es de 80%, la cual está situada a una altura de 1024m sobre el nivel del mar, con estos datos y una temperatura de operación del aire de 100°C y utilizando una carta psicométrica digital se obtiene los siguientes datos que se muestra en la Tabla 11.

Dato	valor
HR %	80
Z (m)	1024
Tdb (°C)	100
Twb (°C)	100
W (g/Kg)	5951,89
h(Kj/Kg)	16093,35
V(m ³ /Kg)	12,6335

Tabla 11. Valores psicométricos del aire

$$P_{TOTAL} = \frac{251.612}{0.604} = 416.57 Pa$$

4.5.2 Calculo de la potencia interna ventilador

Es la potencia total transmitida al fluido, la cual se calcula mediante la siguiente ecuación (15) [36]:

$$P_i = P_{TOTAL} * Q \quad (15)$$

$$P_i = 2.33 W = 0.0031 HP$$

•Potencia en el eje del motor.

La potencia de accionamiento es la potencia en el eje del ventilador o potencia mecánica que el ventilador absorbe [36]. Esta potencia se puede calcular mediante la siguiente ecuación (16).

$$P_a = \frac{P_i}{\eta_{total}} \quad (16)$$

El rendimiento de un ventilador centrífugo puede variar entre 40-70%. Para el cálculo de la potencia de accionamiento se utiliza una eficiencia del 50% Reemplazando en (16).

$$P_a = 0.006 \text{ HP}$$

A partir de estos valores se selecciona un ventilador, que permita suplir las cantidades de flujo correspondiente así como el motor correspondiente.

4.5 DIAGRAMA DE FLUJO

A continuación se presenta el diagrama de flujo del proceso que realiza la máquina a desarrollar.

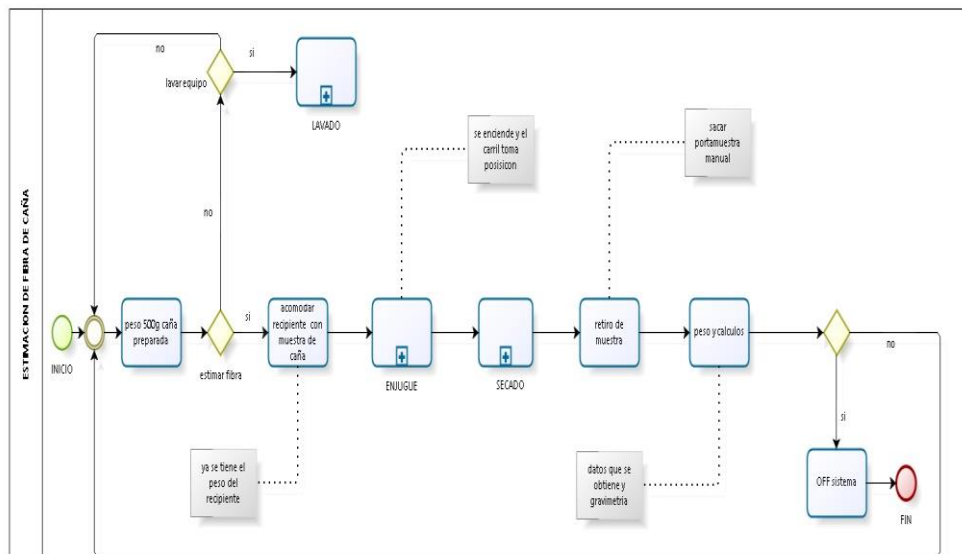


Figura 21. Proceso general de la máquina.

[illegible]

Figura 22. Proceso de enjuague.

En el proceso de enjuague es fundamental el control de temperatura así como el control del flujo a manejar, por lo cual es necesario herramientas que presenten poca incertidumbre al momento de manejar estos datos durante el proceso, para ello se ve la necesidad de utilizar sensores de flujo, válvulas reguladoras entre otros que ayuden al funcionamiento óptimo del equipo, ya para la selección respectiva de los instrumentos se deja a consideración, teniendo en cuenta al ambiente que serán expuestos, como la importancia que ellos representan para el proceso.

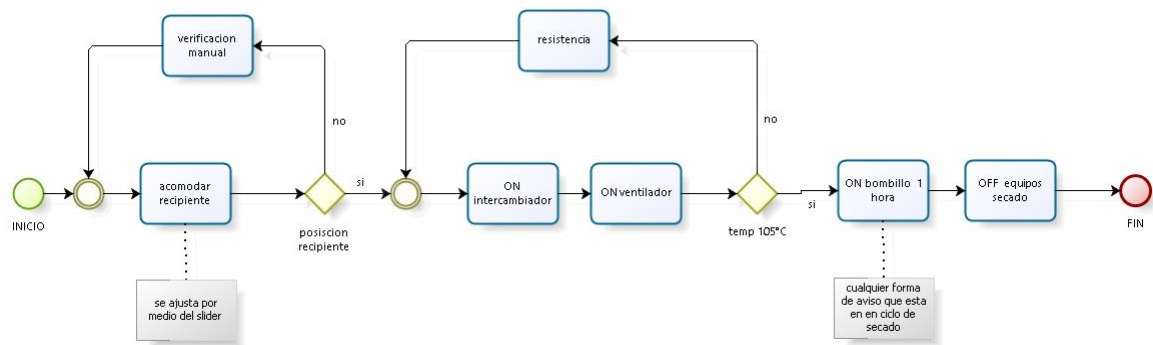


Figura 23. Proceso de secado.

En la Figura 21 y Figura 22 se observa la importancia de mantener la temperatura en el valor óptimo para los respectivos procesos, basándose en estos se ve la necesidad de un sistema de control de temperatura que ayude con los procesos de lavado y secado permitiendo el trabajo óptimo de la máquina a diseñar así como del cuidado de los respectivos dispositivos que esta presenta.

Basado en la ya descrito anteriormente de los requerimientos mínimos de la máquina en la Figura 23 se observa el esquema del funcionamiento de la máquina así como de equipos principales que este presenta.

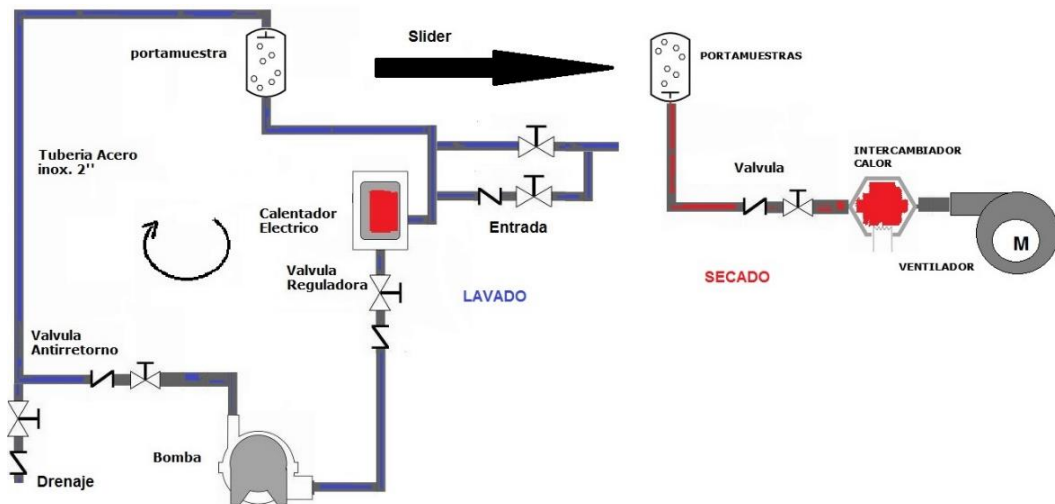


Figura 24. Esquema general de la máquina

4.6 COMPONENTES DE LA MÁQUINA

A continuación se muestran los equipos principales que requieren la máquina, así como de las partes que la compone y se ha diseñado.

- **Portamuestra**

El porta muestras tiene una forma cilíndrica capaz de contener 500g de caña preparada sin compactar, en la parte superior se sujeta una tapa enmallada de referencia de 100 mesh/in, y en su parte inferior se suelda una malla inoxidable de 120 mesh/in, esto permitiendo el paso del flujo de agua y aire de secado pero evitando la perdida de muestra, este portamuestra descansa sobre un contener que junto con la tapa se ajusta a la máquina.



Figura 25. Portamuestra.

- **Regadera**

Regadera de forma cónica, en la parte inferior presenta una tapa perforada con agujeros de 0,2mm de diámetro y 1,6 mm de paso, esto asegurando que la distribución del agua sea uniforme por todo el diámetro de la tapa y sobre la muestra, la tapa se suelda, en la parte superior se acopla una manguera para el paso del agua a la temperatura indicada.



Figura 26. Regadera

- **Resistencia.**

Las resistencias se usan para el calentamiento del aire, aumentando o bajando su potencia según la necesidad, se utilizan dos resistencias eléctricas tubulares en paralelo en forma de espirales concéntricas con un diámetro transversal de 6 mm, Cada resistencia puede suministrar 800W a 120V.

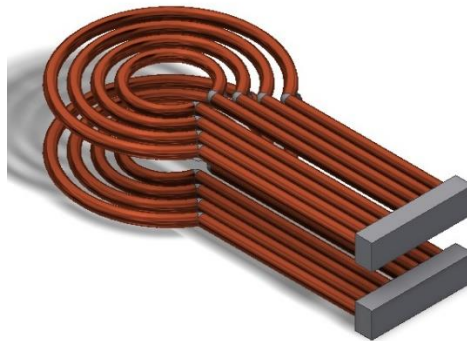


Figura 27. Resistencias

- **Carcaza intercambiador de calor**

La carcasa del intercambiador de calor tiene una forma irregular en su parte central, es de forma cuadrada para permitir el acople de las resistencias eléctricas que se encargan de calentar el flujo de aire, la parte superior es circular para permitir el acople de la manguera hacia el porta muestras y en su parte inferior es rectangular para ensamblar el ventilador centrífugo.

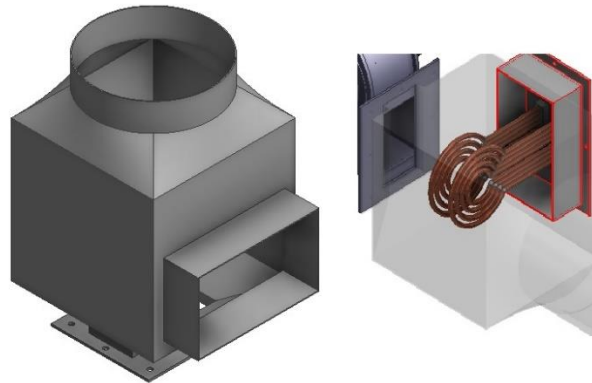


Figura 28. Intercambiador de calor

- **Soporte riel slider**

Permite el deslizamiento del equipo y el cambio del sistema de lavado al sistema de secado en el irán interruptores (finales de carrera) qué indicaran que el dispositivo se encuentra en posición para empezar el proceso deseado, secado o lavado.

- **Filtro**

Se diseña dispositivo para desagüe en donde después del paso de agua sobre la muestra esta es recirculada y con el fin de evitar obstrucciones se dispone de un filtro en donde el agua esté libre de residuos que perjudiquen en los equipos

- **Reconfiguración del equipo.**

Basado en las necesidades que maneja Cenicaña y mejorar el desempeño del equipo, el diseño se hará para realizar 3 muestras al mismo tiempo, a fin de que se puede obtener una tasa más alta en la toma de muestra, también se dispone a manejar una misma temperatura dejando a un lado el requerimiento de calentadores o sistemas de calentamiento para el agua a manejar, se ha dispuesto a trabajar con una temperatura de 90°C en el ciclo de lavado y el ciclo de enjuague, esto se realiza basado en la publicación [30], y al determinar que la diferencia de tiempo aplicadas en el manual [7], y en la publicación son muy pocos, además de las facilidades que

brindan al trabajar los ciclo de lavado y enjuague a una misma temperatura, pensando en la tasa alta de muestras que ser requieran, evitando paros innecesarios por mantener la temperatura requerida, por lo tanto manejando las mismas especificaciones ya descritas anteriormente se dispone a dejar los cálculos siguientes para estas mejoras:

DATOS	VALOR
LAVADO Y ENJUAGUE	
Temperatura (°C)	90
Caudal Q (L/min)	30
Caudal Q (m ³ /s)	0.0005
V (m/s)	0,246690655
V_t succión (m/s)	0,4385612
$\sum H_r$ succión (m)	1,7259851
V_t descarga (m/s)	0,246690655
$\sum H_r$ descarga (m)	5,848944567
$\sum H_r$ total (m)	7,57492962
HB (m)	8,22803453
Potencia (P_{otB}) W	38,943287
$\dot{m}$ Kg/s	0.46766
Q_{entra} (KW)	145,83

SECADO	
Potencia cal. Q (W)	2434,64616
Caudal aire @ (m ³ /s)	0,03216593
$\dot{m}$ Kg/s	0,03003333
P_i (Hp)	0,032200258
P_a (Hp)	0,06440052

Tabla 12. Cambio debido a las mejoras

- **Lavado.**

Para el sistema de lavado y enjuague se cuenta con tuberías de acero inoxidable AISI 304, sensores de temperatura al inicio de manguera y antes de la bomba con lo cual se busca controlar la temperatura así como electroválvulas al inicio de la bomba, a la entrada y salida del suministro de agua y la purga que entra al sistema, todo esto con el fin de obtener un óptimo funcionamiento del equipo.

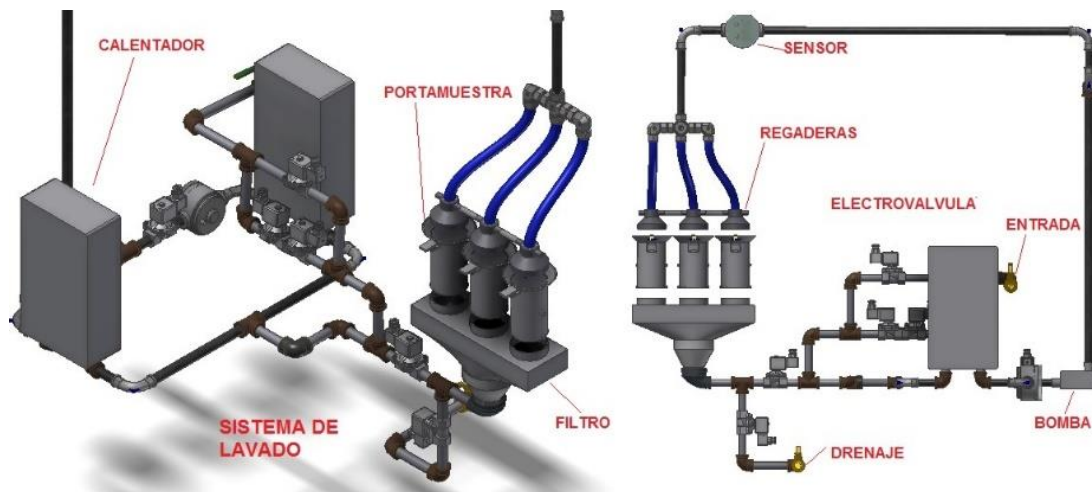


Figura 29. Sistema de lavado y enjuague

- **Secado**

Al igual se busca que todo el material a utilizar sea en acero inoxidable AISI 304, en el comprenden el secador que se selecciona con la potencia y caudal necesario que ya se calculó, la resistencia, una manguera industrial un soporte o riel para ubicación, y un slider que me generará el movimiento del portamuestra.

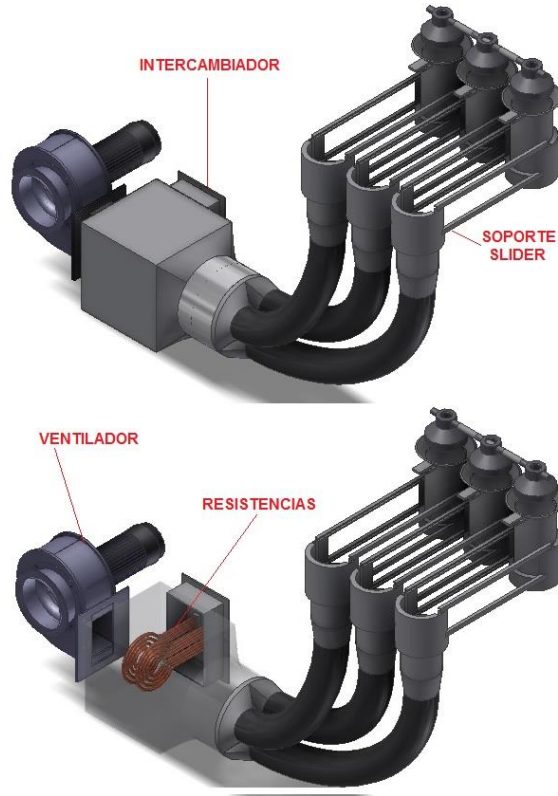


Figura 30. Sistema de secado

- **Ensamble**

Las diferentes partes descritas en la Tabla 6 se fabricarán por medio de corte y doble hasta lograr la dimensión de la pieza, estas partes se sujetan por medio de tornillos métricos para lámina, así como las dimensiones del equipo.

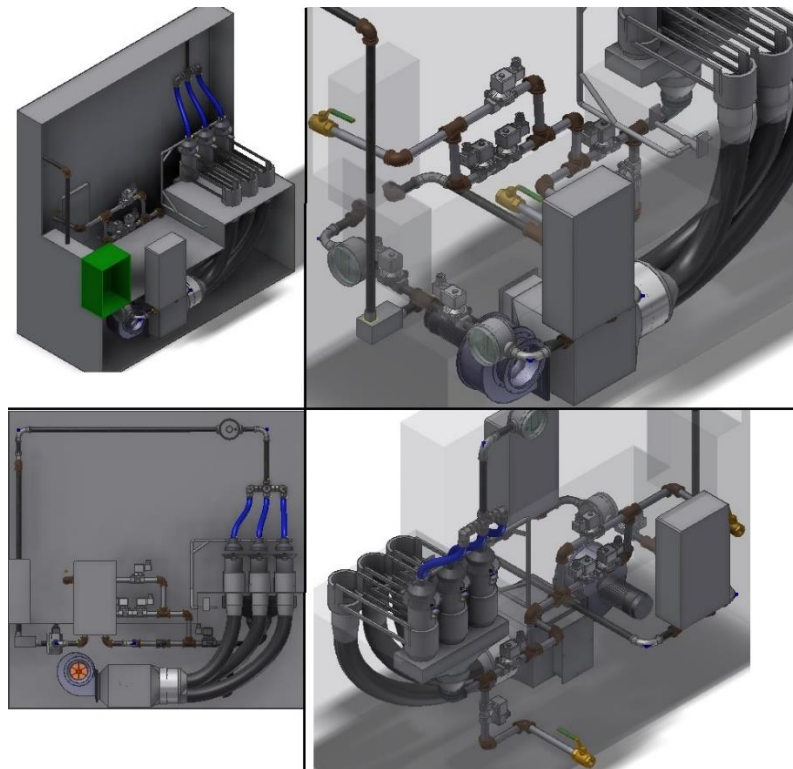


Figura 31. Equipo diseñado

- **Aislante**

Con el fin de optimizar el proceso y evitar la pérdida de calor, así como proteger los diferentes componentes de la máquina y al operario, se recomienda forrar con aislante térmico tanto el intercambiador de calor como el tubo de soporte del portamuestra.

El aislante térmico que se recomienda para recubrir la partes anteriormente mencionadas es Termoflex fabricado por Calorcol, el cual es fabricado con finas fibras de lana mineral de roca elástica, esponjosa y aglutinada con resinas termoestables en forma de rollos con un espesor y una dimensión constante[8].

propiedad	valor
Densidad (Kg/m ³)	32
Temperatura de operación °C	354
Conductividad térmica (W/m-°K)	0.039
Dimensiones (m)	0.9 x 5

Tabla 13. Propiedades del aislante Termoflex

Asumiendo que el calor es transmitido uniformemente en todas las áreas del intercambiador, se procede con el análisis de transferencia de calor por conducción, se asume que se encuentra en estado estable y no presenta generación de calor, figura 31.

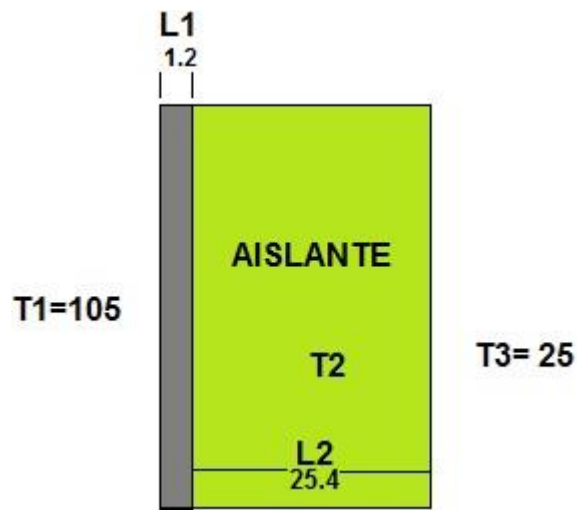


Figura 32. Ilustración transferencia de calor

En la Tabla 17 se presenta las ecuaciones necesarias para el análisis de transferencia de calor, se suma inicialmente un espesor del aislante de 1”.

Nombre	Formula	resultado
Reynolds	$RED = \frac{\rho * V_{max} * D}{\mu}$	4,34E+01
Nusselt	$Nus = 0.52 * Red^{0.5} * Pr^{0.36} (Pr/Prs)^{0.25}$	3,0770
Factor convección (W/m ² -°C)	$h = \frac{Nus * K}{D}$	14,3596
Transferencia de calor (concepto de resistencia) (W/m ²)	$\frac{q}{a} = \frac{(T1 - T3)}{((1/h1) + (L1/k1) + (L2/k2) + (1/h3))}$	97,4419
Temperatura Aislante T2 (°C)	$\frac{q}{a} = \frac{(T2 - T3)}{((L2/k2) + (1/h3))}$	36,9091

Tabla 14. Calculo correspondientes con el aislante

Los datos necesarios para la solución de estas fórmulas ya se poseen como lo es la Vmax que se tiene del análisis realizado para calcular la caída de presión en el intercambiador, para el número de Nusselt promedio se determina con la relación apropiada para flujo cruzado sobre bancos de tubos, se asumió que el coeficiente de convección para el aire libre es 10 W/m²-°C y así se obtiene el valor de la temperatura que presenta el intercambiador con el aislante.

4.6.1 Sistema de control

Como ya se había descrito anteriormente que para mantener esta temperatura de trabajo se ve la necesidad de un control de temperatura, que con ayuda de un sensor se busca manejar la temperatura y funcionamiento de equipos en el proceso correspondientes de la máquina, en la Figura 32 se puede ver el diagrama de bloque correspondiente.

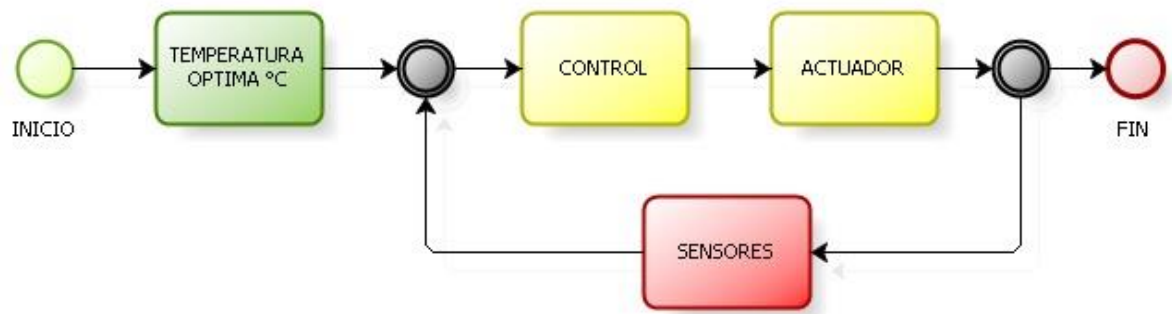


Figura 33. Diagrama de bloque

Principalmente, sería para el lavado el manejo de la temperatura sobre la muestra manejando el funcionamiento de la bomba para el óptimo proceso de lavado sabiendo que la temperatura de trabajo es de 90°C se decide así mismo que con ayuda de los sensores cuando haya disminución de la temperatura apagar la bomba evitando que el agua se vierta sobre la muestra hasta que la temperatura de esta sea la indicada para el proceso, en la Figura 33 se muestra el esquema que ayudaría con este requisito.

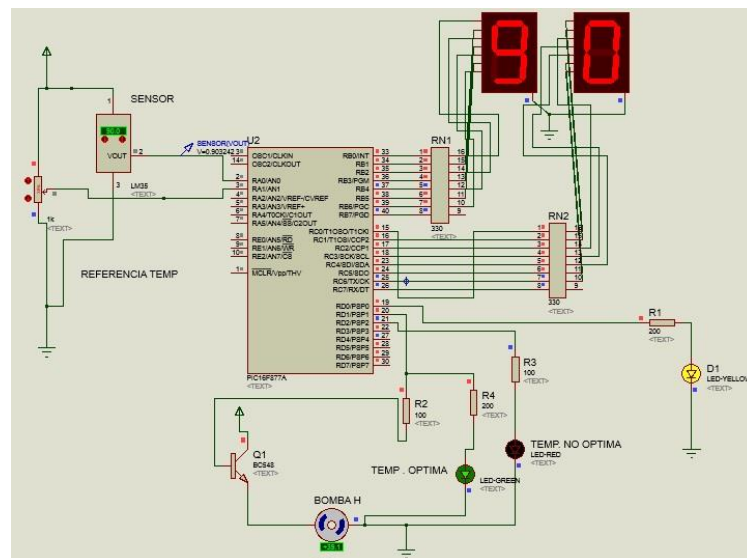


Figura 34. Control de temperatura lavado (Proteus)

Aquí el sensor toma la temperatura ambiente y la compara con la temperatura del fluido, esto se puede realizar con la ayuda de un sensor pt100, también se incorpora

un potenciómetro con el cual se calibre la temperatura de referencia que para este caso es de 90°C, con la cual al llegar a dicha temperatura se da el arranque de la bomba, también se colocan equipos visuales que en este caso son led para indicar inicio del proceso parada.

Para el proceso de secado se realizaría elevando o disminuyendo la potencia de la resistencia eléctrica que se haya seleccionado, esto depende al igual del control de la temperatura que maneja este proceso que es de 105°C, en la Figura 33 se muestra el esquema completo.

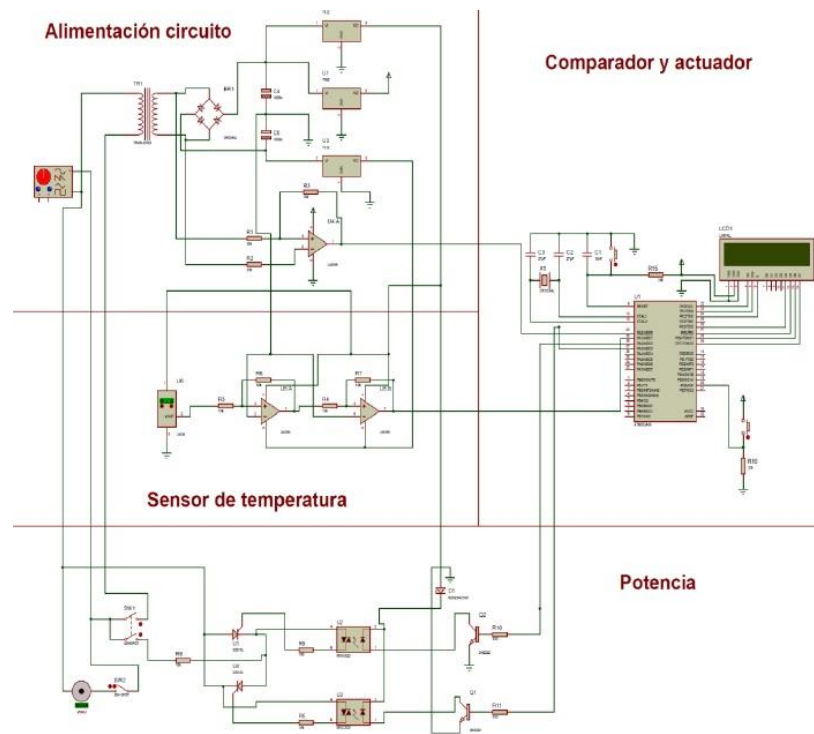


Figura 35. Control del secado

Al igual que en el secador de bagazo el funcionamiento de la etapa de control será igualmente implementado para el secado de la muestra en la máquina a diseñar, en la etapa de control; el sensor de temperatura toma la temperatura del aire de secado para convertirla en una señal análoga de comportamiento lineal respecto a la temperatura. Esta señal es débil (bajo voltaje), por lo cual primero pasa por un

amplificador que aumenta el voltaje (Amplificadores Operacionales), para luego ser leída por el microprocesador. Cuando la señal llega al microprocesador, es comparada con un valor de referencia (voltaje de referencia para 105 °C); esta comparación genera un error, el cual es la diferencia de temperatura entre el aire de secado actual con el deseado (105 °C); según el error, mediante la programación del microprocesador se aumentará o disminuirá la señal entregada a la etapa de potencia, para ello se usa una señal de altos y bajos (cuadrada y continua) [8].

La salida del microcontrolador que maneja la activación de los dispositivos de conmutación por medio de los circuitos de disparo. Cuando estos dispositivos son activados permiten el paso de corriente y según la cantidad de tiempo en el que permanezcan en conducción la potencia entregada a la resistencia es mayor o menor todo esto se logró con ayuda de los circuitos mostrados en el anexo I y anexo J.

4.6.2 Propiedades del acero inoxidable

En la Tabla 12 se observan las propiedades del acero inoxidable 305, el cual se escoge para las partes del equipo donde se pueda ver afectado por las altas temperaturas y la presencia de agua.

propiedad	valor
Densidad (Kg/m ³)	9000
Calor específico (j/Kg-°C)	577
Conductividad térmica (W/m-°C)	14.9
Difusividad térmica (10 ⁻⁶ /°C)	3.95
Mínima resistencia Operación (GPa)	215
Resistencia última a tracción (GPa)	505
Módulo de elasticidad (GPa)	200

Tabla 15. Propiedades del acero 304

Componente	Material	Alto (m)	Ancho (m)	Prof. (m)
Protector 1 carcasa	Acero galvanizado ca.16	1.4	1.4	0.17
Protector 2 carcasa	Acero galvanizado ca. 18	0.5	0.54	0.3
Protector 3 carcasa	Acero galvanizado ca. 18	0.5	0.8	0.3
Filtro carcasa	Acero inoxidable 304 ca.18	0.35	0.12	0.1
Divisor	Acero inoxidable 304 ca.18	0.04	D 0.1	
Regadera	Acero inoxidable 304 ca.18	0.05	D 0.08	0.15
Portamuestra	Acero inoxidable 304 ca.18	0.1	D 0.08	
Soporte portamuestra	Acero inoxidable 304 ca.18	0.15	D 0.1	
Carcasa Intercambiador de calor	Acero inoxidable 304 ca.18	0.33	0.2	0.2
Tapa portamuestra	Acero inoxidable 304 ca.18	0.015	D 0.15	

Tabla 16. Dimensiones generales de la máquina

Componentes	Cantidad	marca	Valor unitario \$	Valor total \$
Protector 1 carcasa	1		250.000	250.000
Protector 2 carcasa	1		220.000	220.000
Protector 3 carcasa	1		220.000	220.000
Filtro carcasa	1		300.000	300.000
Divisor	1		250.000	250.000
Portamuestra	3		600.000	1.800.000
Soporte portamuestra	3		250.000	750.000
Carcasa Intercambiador de calor	1		600.000	600.000
Resistencia	2		50.000	100.000
Bomba	1	Grundfos	900.000	900.000
Ventilador	1	Solar&Palau	500.000	500.000
Motor	1		300.000	300.000
Electro válvulas	6	Jefferson	300.000	1.800.000
Sensor temperatura	3	Jmindustrial Wika	100.000	300.000
Sensor de flujo	2	Gfsigne Grundfos	500.000	1.000.000
Sistema de control	1		200.000	200.000
Slider	1	Festo Parker	4.000.000	4.000.000
Soporte slider	3		250.000	250.000
Regadera	3		200.000	200.000
Manguera	3	Stallion	180.000	180.000
Manguera secado	3	Stallion	250.000	250.000
Calentador eléctrico	2	Clage	700.000	1.400.000
Accesorio de tubería	1		400.000	400.000
Tornillos	30		300	9000
TOTAL				16.000.000

Tabla 17. Valoración económica.

5 CONCLUSIONES

Con el diseño de esta máquina se mejoraría la representatividad del porcentaje de fibra de caña debido a que se está aumentando el tamaño de muestra en 5 veces el valor actual y la cantidad permitiendo disminuir la incertidumbre entre muestra y muestra.

Se estima de forma directa el porcentaje de fibra de caña en un menor tiempo en comparación de cómo se realiza actualmente, alrededor de 70 minutos en proceso continuo.

Este diseño favorece a los ingenios en la obtención del análisis de fibra, para así mejorar sus procesos y evaluar la calidad de caña que se pretende procesar.

El tiempo de secado de la muestra podría no ser el esperado (1 h) y por ende se recomienda ajustar la máquina en más pruebas reales debido a las características de la caña de azúcar y características de la fibra de caña.

Se espera un buen comportamiento funcional y energético de la máquina debido a que se realizaron pruebas a escala real de los ciclos que presenta el diseño obteniendo unos resultados muy favorables comparados con los datos del ingenio, también se evidencia manejo adecuado al tener recirculación de agua.

La regulación de la temperatura permitirá que cada proceso de la máquina se lleve siguiendo los parámetros específicos y al buen funcionamiento óptimo de la máquina así como del cuidado de los equipos que esta presenta

Se logró un montaje real basado en los parámetros descritos por el manual del SRI y datos reales de un ingenio con lo cual se logró el diseño de esta máquina.

6 BIBLIOGRAFIA

- [1] “Consulta de la Norma: DECRETO DE QUEMA.” [Online]. Available: <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=1479>. [Accessed: 23-Nov-2014].
- [2] P. Rein, *Ingeniería de la Caña de Azúcar*. 2012.
- [3] Loughran J.G., “Mathematical and experimental modelling of the crushing of prepared sugar cane,” *Univ. Queensland, PhD Thesis*, pp. 1–5, 1990.
- [4] J. E. Larrahondo, “Calidad de la Caña de Azúcar,” *El Cultiv. la caña en la Zo. Azucar. Colomb.*, pp. 337–355, 1995.
- [5] D. E. C. E. N. Guanacaste, C. Rica, and J. F. Subiros, “Calidad Del Jugo Y Contenido De Fibra De Tres Variedades De Caña De Azucar En Un Ciclo,” vol. 22, no. 2, pp. 173–184, 1998.
- [6] E. Romero, P. Digonzelli, and J. Scandaliaris, “Manual del cañero,” *Estac. Exp. ...*, pp. 1–248, 2009.
- [7] H. W. Mehrotra, R., & Siesler, “Application of mid infrared/near infrared spectroscopy in sugar industry.”
- [8] A. R. De la Cruz Benitez, “Diseño De Un Secador De Muestra De Bagazo De Caña,” universidad del valle, SANTIAGO DE CALI, 2010.
- [9] SUGAR RESEARCH INTERNATIONAL, *Instruction And Operation Manual For The Can Fibre Machine*. AUSTRALIA, 1996.
- [10] M. BESES, *The Standard Laboratory Manual For Australian Mills*. AUSTRALIA, 1991.
- [11] Ing. Felix Gonzales Perez., “bagazo como combustible y su relación con los principales factores agroindustriales,” *Mundo eléctrico. Revista especializada del sector eléctrico*, vol. 20. Mundo eléctrico. Revista especializada del sector eléctrico, BOGOTA-COLOMBIA, pp. 1–63, 2006.
- [12] “Criterios de evaluación termodinámica para sistemas de cogeneración en centrales azucareras.” [Online]. Available: <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:http://sisbib.unms>

m.edu.pe/bibvirtual/publicaciones/hidraulica_mecanica/2001_n2/criterios.htm . [Accessed: 25-Aug-2014].

- [13] Ing. Pablo Perea, *Valor del exceso de bagazo como combustible para generar electricidad*, vol. 76 No 4. 1981.
- [14] "Bagazo de caña como combustible - EcuRed." [Online]. Available: http://www.ecured.cu/index.php/Bagazo_de_caña_como_combustible. [Accessed: 30-Aug-2014].
- [15] J. C. Ccampos Avella, E. L. Figuerova, L. Meriño Stand, I. Tovar Ospino, R. D. P. Castrillon Mendoza, E. C. Quispe Oqueña, J. R. Vidal Medina, R. Lopez Castrillon, Yuri Castrillon Mendoza, and O. Prias Caicedo, "Ahorro De Eenergia En La Industria Del Papel."
- [16] "Unasylva - No. 193 - El suministro mundial de fibras - Fibras no leñosas suministro mundial de fibras." [Online]. Available: <http://www.fao.org/docrep/w7990s/w7990s08.htm>. [Accessed: 10-Jul-2014].
- [17] and S.-L. R. González-Valadez M, Muñoz-Hernández G, "Design and Evaluation of an Extruder to Convert Crop Residues to Animal Feed.," *ScienceDirect.*, no. Biosystems Engineering, pp. 66–78, 2008.
- [18] S. K. Batra, "Other long vegetable fibers: Abaca, Banana, Sisal, Henequen, Flax, Ramie, Hemp, Sunn, and Coir," in *Handbook of Fiber Chemistry*, M. Lewin, Ed. CRC Press, 2006.
- [19] J. M. Paturau, "By-Products of Sugar Cane Industry," 3rd editio., amsterdam, 1989.
- [20] M. M. Elsunni and J. R. Collier, "Processing of Sugar Cane Rind into Nonwoven Fibers," *J. Am. Soc. Sugar Cane Technol.*, vol. 16, pp. 94–110, 1996.
- [21] I. O'Hara, "Cellulosic ethanol from sugarcane bagasse in Australia: exploring industry feasibility through systems analysis, techno-economic assessment and pilot plant," 2011.
- [22] CENICAÑA, *El cultivo de la caña en la zona azucarera de Colombia*. CALI, 1995.
- [23] J. Wiley, "Sugar cane hand book," 1977.

- [24] Y. Aguilar-Castro, F. Casanova-García, R. Victoria-Prado, D. Aguirre-Guerrero, and B. Uquillas-Restrepo, "Wear in Low Carbon Steel Due to Clean Bagasse or Bagasse Containing Silica and Sugar Cane Juice," *Ing. y Univ.*, vol. 15, no. 2, pp. 373–384.
- [25] M. J. Cabello-Ulloa, J. J. Cabello-Eras, J. Moya-Rodríguez, R. Goytisol-Espinosa, J. A. Velásquez-Pérez, and J. R. Mestizo-Cerón, "Modelación matemática de la flotación de la maza superior de los molinos de caña de azúcar," *Ing. Mecánica*, vol. 15, no. 1, pp. 44–53.
- [26] F. González-Pérez, J. A. Castellanos-Álvarez, and J. F. Puertas-Fernández, "Método para determinar la cantidad de agua de imbibición a utilizar en la industria de azúcar de caña," *Ing. Mecánica*, vol. 13, no. 1, pp. 41–48.
- [27] A. Agüero and J. Pisa, "Poder calorífico del bagazo de caña de azúcar," *Rev. Ciencias ...*, 2004.
- [28] "Producción a partir de caña de azúcar." [Online]. Available: <http://www.bioenergeticos.gob.mx/index.php/bioetanol/prouccion-a-partir-de-cana-de-azucar.html>. [Accessed: 25-Nov-2014].
- [29] CENICAÑA, "Reducción de las pérdidas de sacarosa," CALI, 2002.
- [30] J. Loughran and P. Ivin, "A new method and apparatus for determination of fibre in cane," *Proc. Aust. Soc. Sugar ...*, 1988.
- [31] G. F. Casanova García, "Diseño y construcción de un banco de pruebas para evaluar la permeabilidad de materiales fibrosos," Universidad del Valle, 2002.
- [32] F. H. Patiño and Y. V. González, "Darcy's Law limits," Universidad Nacional, Medellín, 2002.
- [33] YUNUS A, Cengel, *Procesos de transferencia de calor*, Cuarta edi. México, 2004.
- [34] D. P. INCROPERA, Frank P y DEWITT, *Fundamentos de transferencia de calor*, Cuarta edi. México, 1999.
- [35] CATALOGO TECNICO, "MANUAL PRACTICO DE VENTILACION," BARCELONA.

- [36] MATAIX. Claudio, *Mecanica DE fluidos y maquinas Hidraulicas*, Segunda ed. México D.F., 1982.

ANEXOS

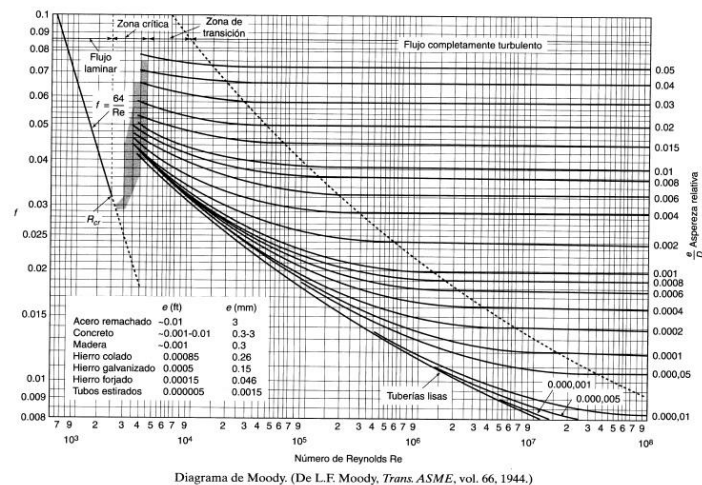
Anexo A.

Tabla 5.5: Valores sugeridos del contenido de fibra en bagazo a la salida de los molinos

Molino No.	w_{FB} para tándem con molinos de 3 mazas	
	con 15 mazas	con 18 mazas
1	32	30
2	40	39
3	45	43
4	48	46
5	50	48
6		50

Fuente: Peter Rein, ingeniería de la caña de azúcar, pág. 149

Anexo B



Anexo C

Tabla 4-17 Coeficientes de pérdidas menores para accesorios comunes (Tomada del Título B del RAS 2000)

Accesorio	Km
Válvula de globo, completamente abierta	10,0
Válvula de mariposa, completamente abierta	5,0
Válvula de cheque, completamente abierta	2,5
Válvula de compuerta, completamente abierta	0,2
Codo de radio corto	0,9
Codo de radio medio	0,8
Codo de gran radio	0,6
Codo de 45°	0,4
Te, en sentido recto	0,3
Te, a través de la salida lateral	1,8
Unión	0,3
Ye de 45°, en sentido recto	0,3
Ye de 45°, salida lateral	0,8
Entrada recta a tope	0,5
Entrada con boca acampanada	0,1
Entrada con tubo entrante	0,9
Salida	1,0

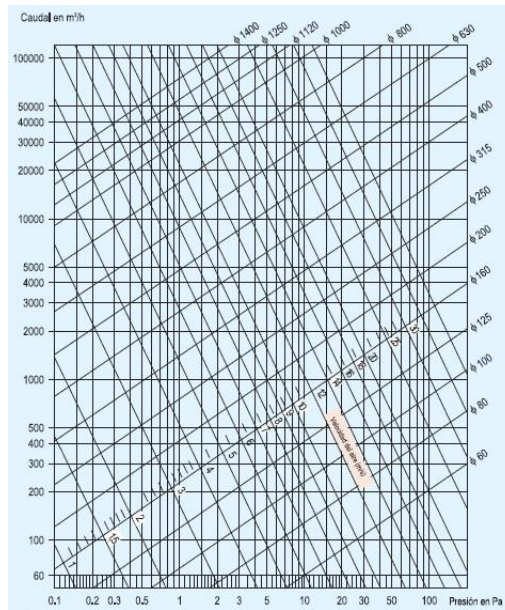
Anexo D

Tabla 2 Resultados prueba caída de presión en un lecho empacado

Veloicidad (m/s)	Caudal (m³/s)	caída de presión Δp(Pa)
0.22	0.004708	199.27
0.27	0.005778	249.08
0.3	0.00642	298.9
0.48	0.010272	398.54
0.5	0.0107	448.36
0.71	0.015194	498.17

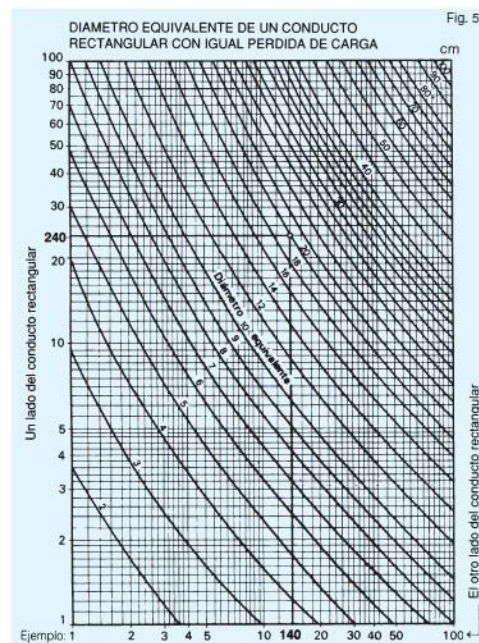
Fuente: Andrés De La Cruz, diseño de un secador de muestras de bagazo de caña, Universidad del Valle, 2010 pág. 13.

Anexo E



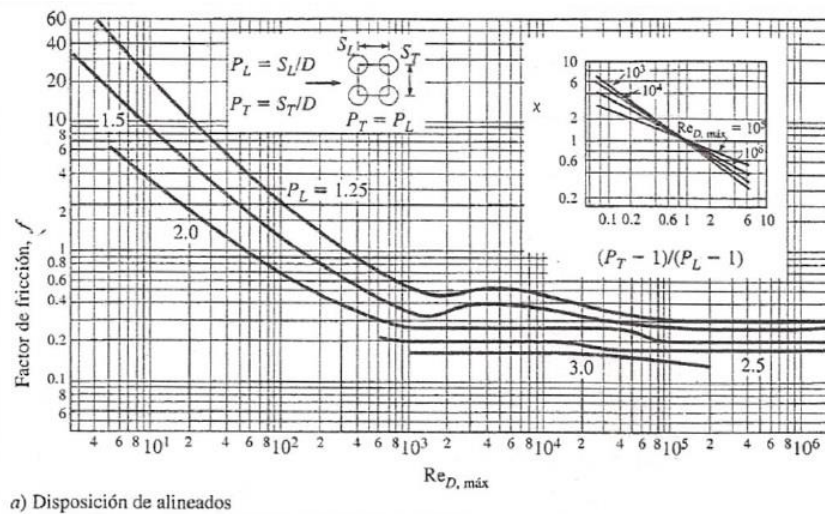
Fuente: S&P, manual práctico de ventilación, pág. 54

Anexo F



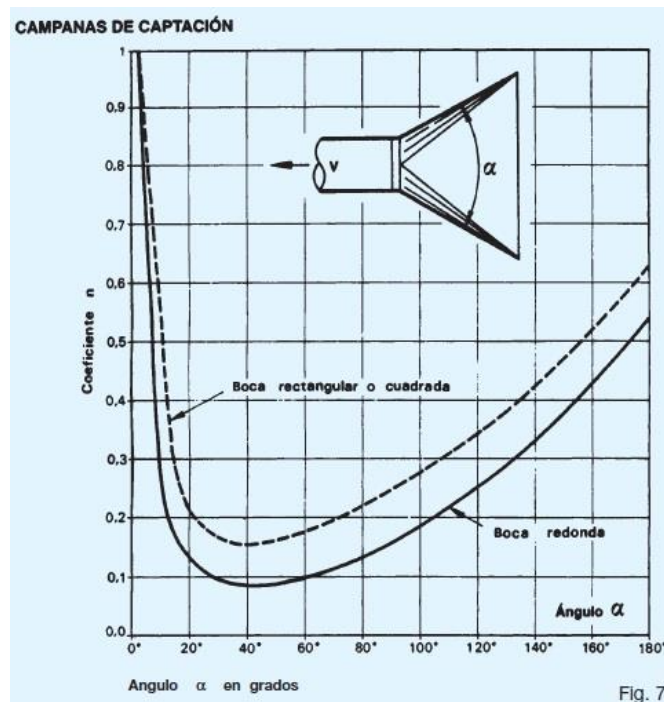
Fuente: S&P, manual práctico de ventilación, pág. 55

Anexo G



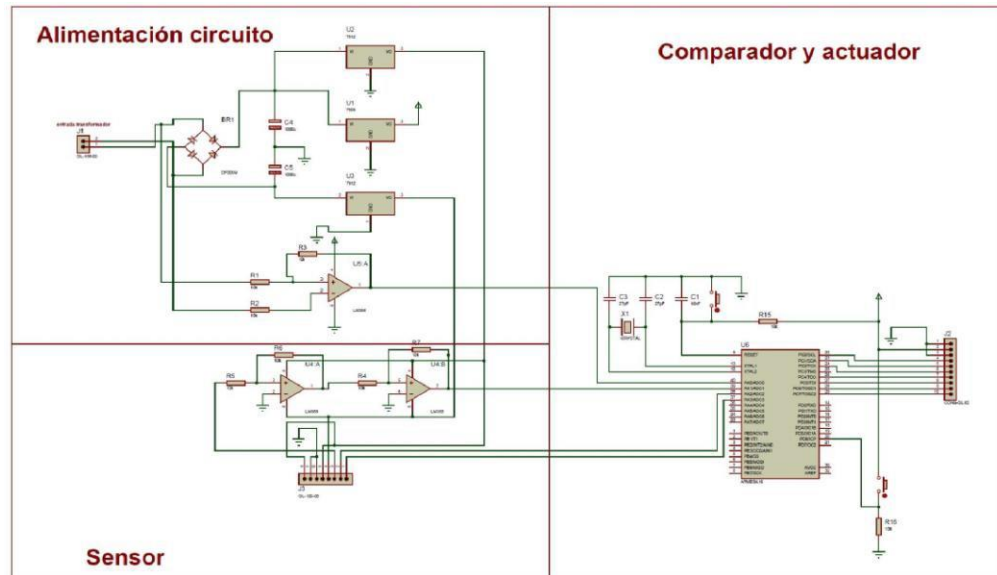
Fuente: YUNUS A, Cengel, Procesos de transferencia de calor. Cuarta edición, México: Editorial, McGRAW-HILL, 2004. Pág. 393

Anexo H



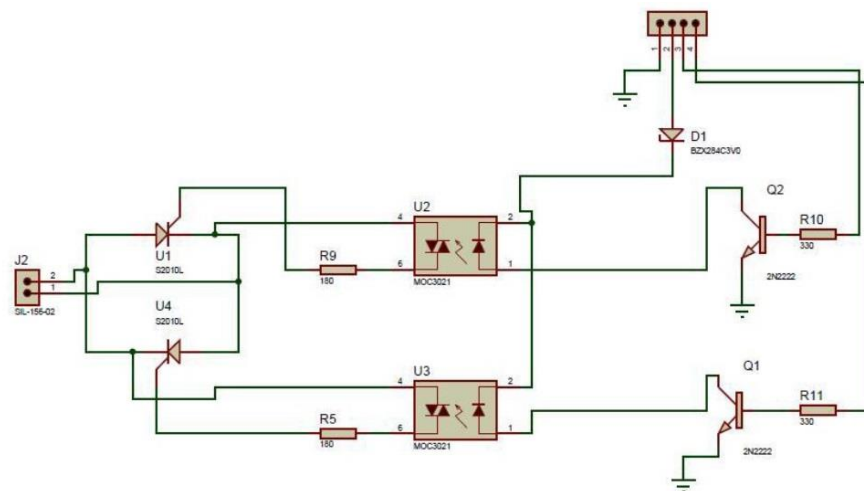
Fuente: S&P, manual práctico de ventilación, pág. 59.

Anexo I



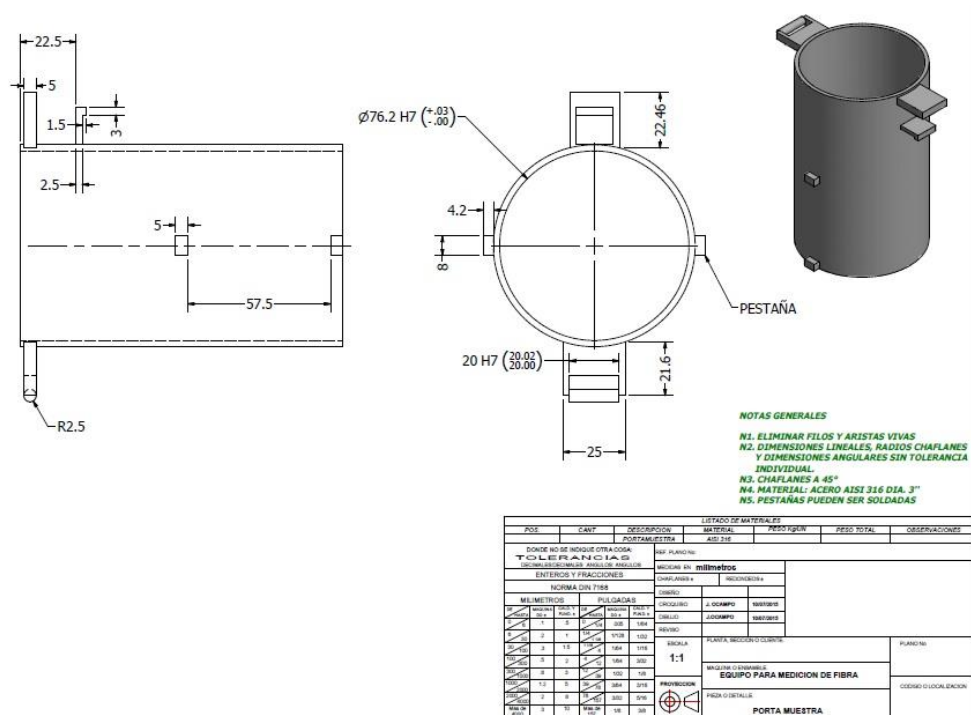
Fuente: Andrés De La Cruz, diseño de un secador de muestras de bagazo de caña, Universidad del Valle, 2010 pág. 30.

Anexo J

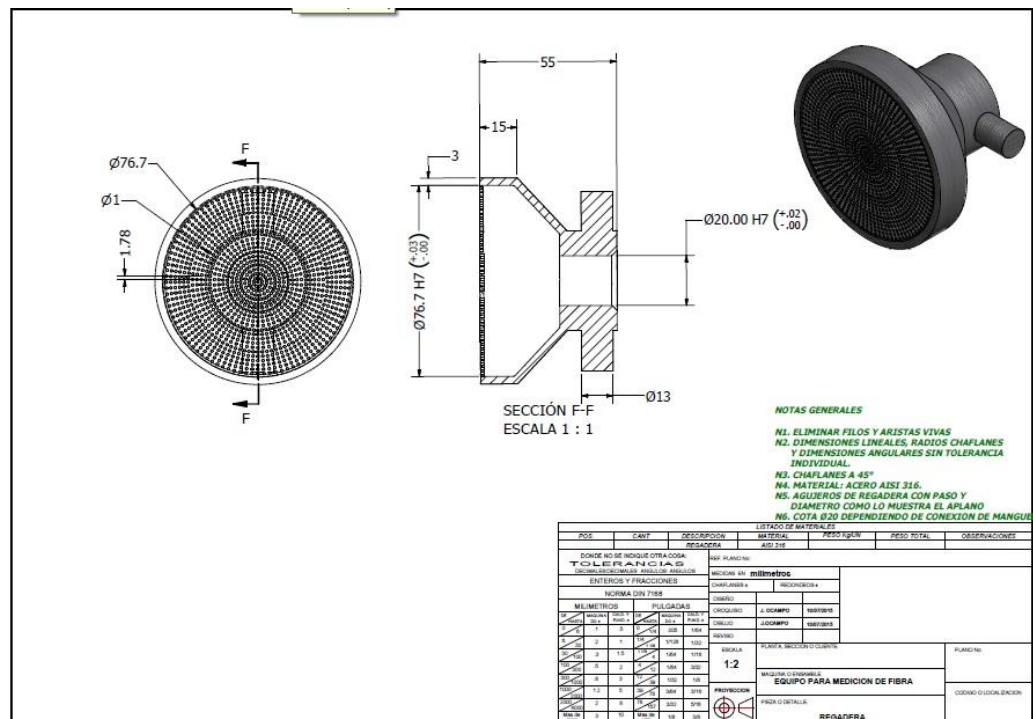


Fuente: Andrés De La Cruz, diseño de un secador de muestras de bagazo de caña, Universidad del Valle, 2010 pág. 31.

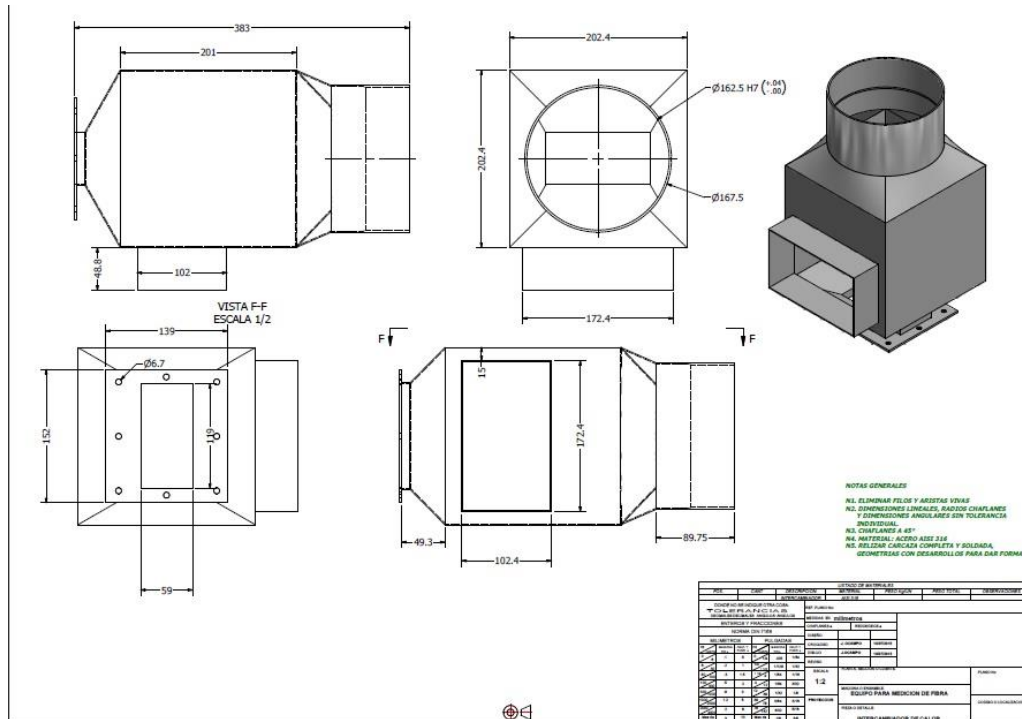
Anexo K



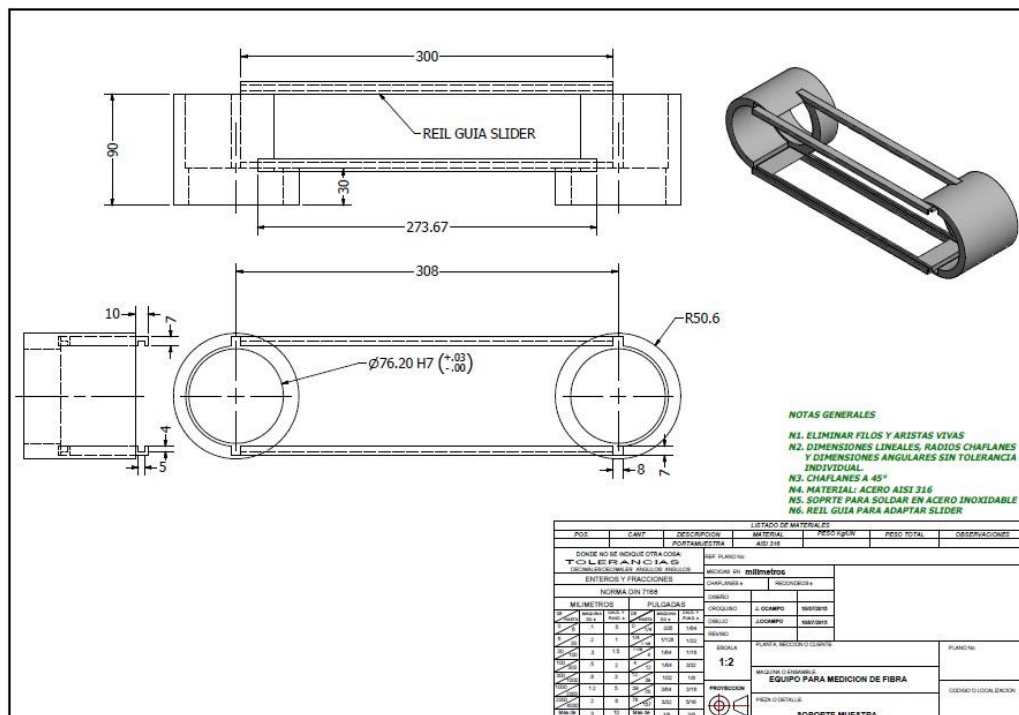
Anexo L



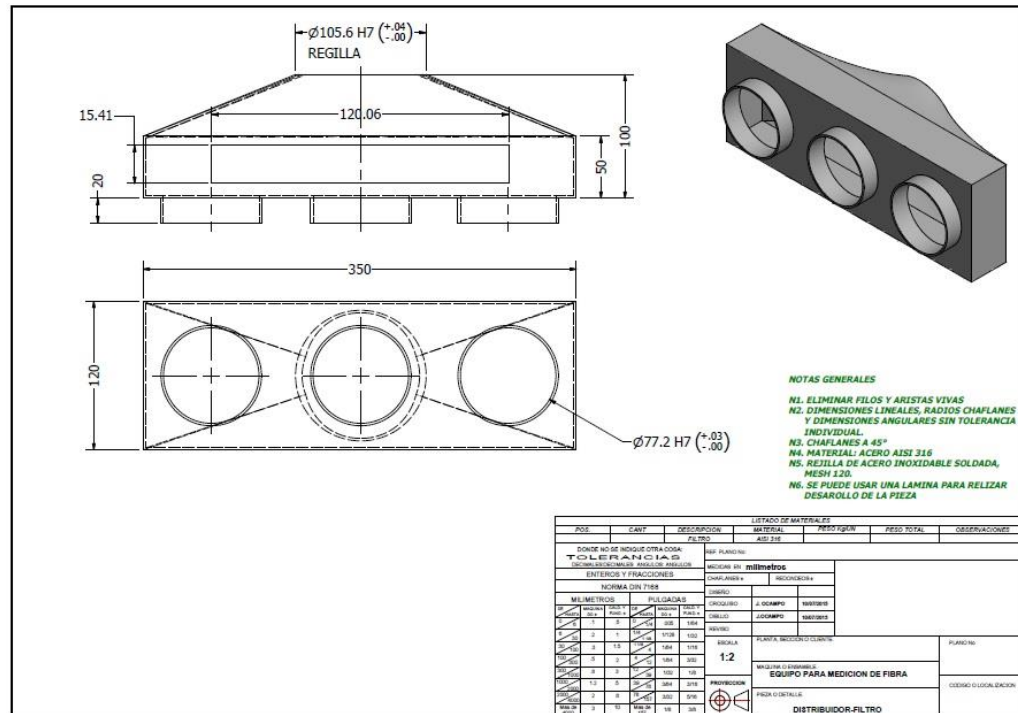
Anexo M



Anexo N



Anexo O



Anexo P

