

**DISEÑO Y SIMULACIÓN DE LA AUTOMATIZACIÓN DE UN SECADOR
ELECTROMECAÁNICO DE CAFÉ**

DANY ALEJANDRO ECHEVERRY OCAMPO

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE TECNOLOGÍAS
INGENIERÍA EN MECATRÓNICA
PEREIRA RISARALDA
2010**

**DISEÑO Y SIMULACIÓN DE LA AUTOMATIZACIÓN DE UN SECADOR
ELECTROMECAÁNICO DE CAFÉ**

DANY ALEJANDRO ECHEVERRY OCAMPO

Trabajo de grado presentado como requisito para optar
al título de Ingeniero en Mecatrónica

Director
Carlos Alberto Montilla Montaña
Ingeniero Mecánico

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE TECNOLOGÍAS
INGENIERÍA EN MECATRÓNICA
PEREIRA RISARALDA
2010**

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

AGRADECIMIENTOS

Reconocimiento a las personas que de una u otra forma se hicieron partícipes en el desarrollo del trabajo de grado Diseño y Simulación de la Automatización de un Secador Electromecánico de café. Al ingeniero Carlos Alberto Montilla Montaña director del proyecto.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	13
2. GENERALIDADES DEL SECADO DEL CAFÉ Y REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DE ALGUNOS MODELOS EXISTENTES	17
2.1 CONTENIDO DE LA HUMEDAD DEL CAFÉ	17
2.2 SECADO TRADICIONAL	19
2.2.1 Secador solar parabólico.....	19
2.2.2 Secador solar rotatorio	20
2.3 SECADO ARTIFICIAL	20
2.3.1 Secadora de cuartos inclinados	21
2.3.2 Secadora rotativa..	21
2.3.3 Secadora rotativa modular.	22
2.3.4 Secadora vertical.....	22
2.3.5 Secador mecánico con estructura fija.....	23
3. REDISEÑO DE SECADOR DE CAFÉ, A PARTIR DE UN SECADOR ROTATIVO ELECTROMECAÁNICO	24
3.1 CÁLCULO FLUJO MÁSSICO Y CAUDAL DE AIRE EN LA OPERACIÓN DE SECADO	24

3.1.1	Cálculo flujo másico de aire que pasa a través del café	25
3.1.2	Cálculo flujo másico utilizado en la combustión	26
3.4	ESFUERZO GENERADO POR EL PESO DEL DISPOSITIVO.....	35
3.4.1	Cálculo del esfuerzo generado en el dispositivo	38
3.4.2	Análisis de la soldadura entre las tapas y el cilindro	40
3.4.3	Esfuerzo en el eje.....	41
3.4.4	Deflexión en el eje.....	45
3.5	CÁLCULO DE RODAMIENTOS	47
3.6	SELECCIÓN DEL MOTOR REDUCTOR, CADENA Y RUEDAS DENTADAS	48
3.6.1	Cadena.....	49
3.6.2	Ruedas Dentadas.....	49
3.6.3	Conjunto motor reductor.....	49
3.7	SIMULACIÓN DEL DISEÑO MECÁNICO	51
3.7.1	Análisis de tensiones en el eje	51
3.7.2	Análisis de tensiones de cilindro	54
4.	SELECCIÓN DE COMPONENTES FÍSICOS DE LOS SUBSISTEMAS ELÉCTRICO Y DE INSTRUMENTACIÓN. SIMULACIÓN.	59
4.1	SENSORES.....	60

4.1.1 Sensor de humedad relativa.	60
4.1.2 Sensor contenido de humedad.....	62
4.1.3 PT100.....	63
4.3 SIMULACIÓN DE LAS SEÑALES CON EL MÉTODO <i>GRAF CET</i>	69
4.3.1 Macroetapa alta temperatura.	71
4.3.2 Macroetapa finalizar.	72
4.3.3 Macroetapa ciclo.	73
4.4 SELECCIÓN DEL CONTROLADOR	74
5. PRESUPUESTO	76
5.1 COSTO ENERGÉTICO	78
6. CONCLUSIONES	80
7. RECOMENDACIONES.....	82
8. BIBLIOGRAFÍA	83

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Temperaturas aire, café entrada y salida del secador	25
Tabla 2. Poder calorífico de algunos combustibles.....	27
Tabla 3. Selección ventilador	34
Tabla 4. Componentes mecánicos.....	50
Tabla 5. Características del eje.....	51
Tabla 6. Cargas y restricciones del eje	51
Tabla 7. Resultados para el eje	52
Tabla 8. Propiedades del material (eje)	54
Tabla 9. Materiales cilindro	55
Tabla 10. Cargas y restricciones del cilindro	55
Tabla 11. Resultados para el cilindro.....	55
Tabla 12. Propiedades del material (cilindro).....	57
Tabla 13. Capacidad válvula de gas	65
Tabla 14. Componentes de automatización, sensórica y eléctricos.....	76

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Secador solar parabólico	19
Figura 2. Secador rotatorio para café	20
Figura 3. Secadora rotativa tipo guardiola	21
Figura 4. Secadora rotativa modular	22
Figura 5. Secadora vertical	22
Figura 6. Secador estático metálico.....	23
Figura 7. Esquema de una instalación típica de secado de café	24
Figura 8. Disposición de ductos de aire	28
Figura 9. Diagrama de cuerpo libre conjunto cilindro café	36
Figura 10. Corte en el segmento $0 \leq x \leq L/2$ cilindro	36
Figura 11. Diagrama esfuerzo cortante, momento flector para el cilindro	37
Figura 12. Deflexión en el cilindro.....	40
Figura 13. Cordón soldadura conjunto tapa cilindro.....	40
Figura 14. Diagrama de cuerpo libre para el eje.....	42
Figura 15. Corte 1 $0 \leq x \leq 0,132$	42
Figura 16. Corte 2 $0 \leq x \leq 0,563$	43
Figura 17. Esfuerzo cortante momento flector para el eje	44
Figura 18. Deflexión en el eje	46
Figura 19. Cálculo rodamiento 6010	47
Figura 20. Conjunto de transmisión mecánica	48

Figura 21. Tensiones en el eje.....	52
Figura 22. Desplazamientos en el eje.....	53
Figura 23. Deformaciones en el eje	54
Figura 24. Tensiones en el cilindro	56
Figura 25. Desplazamientos en el cilindro	57
Figura 26. Deformaciones unitarias en el cilindro	57
Figura 27. Esquema operación general del sistema	59
Figura 28. Sensor humedad relativa	61
Figura 29. Sensor contenido de humedad	62
Figura 30. Sensor temperatura	63
Figura 31. Módulo de control quemador	64
Figura 32. Válvula gas principal.....	65
Figura 33. Válvula gas piloto.....	66
Figura 34. Operación tarjeta de control quemador.....	67
Figura 35. Diagrama circuito eléctrico (control y potencia) parte 1	67
Figura 36. Diagrama circuito eléctrico (control y potencia), parte 2	69
Figura 37. <i>Grafcet</i> general	70
Figura 38. Macroetapa alta temperatura.....	72
Figura 39. Macroetapa finalizar.....	73
Figura 40. Macroetapa ciclo de temperatura	74
Figura 41. Control lógico programable.....	75

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Planos

Anexo B. Simulación en *Automation Studio*

RESUMEN

En el diseño y simulación de la automatización de la operación de un secador electromecánico de café, se hizo una revisión bibliográfica de modelos industriales y artesanales existentes; de acuerdo con ello se optó por el modelo de la secadora rotativa teniendo en cuenta las necesidades de la región cafetera, los medianos y pequeños caficultores respecto al proceso de secado del café para su comercialización. Se elaboró un diseño, determinando los componentes y estableciendo la comunicación e interacción de las señales presentes en el secador. Estos componentes fueron integrados en un CAE (Computer-Aided Engineering por sus siglas en inglés o Ingeniería Asistida por Ordenador) para la simulación de la operación del automatismo; de acuerdo a estos resultados se realizaron los ajustes finales al diseño y la elaboración de presupuesto de fabricación. Todo ello conlleva a mejorar los actuales tiempos de secado promedio y humedades finales, al igual que la calidad del producto.

INTRODUCCIÓN

1.1 IMPORTANCIA

Siendo la comercialización del café considerada como una de las principales actividades económicas de la región cafetera, se hace importante el abordaje de los procesos que posibilitan dicha actividad. De acuerdo con ello, se conocen principios tanto teóricos como prácticos que hacen alusión a dos métodos de secado de café principalmente. El primero de ellos corresponde al secado natural, el cual es realizado mediante la exposición directa del grano al ambiente.

No obstante, el método de exposición directa presenta varios inconvenientes, entre ellos, variación de los factores climáticos, la gran cantidad de tiempo requerido para el proceso, el uso intensivo de la labor física y los bajos volúmenes que pueden ser dispuestos en estos lugares. Lo antes descrito ha llevado a que los caficultores consideren otros métodos más eficientes para el secado del grano; es allí donde aparece el segundo método adoptado por medianos y grandes caficultores, el cual se ha denominado secado mecánico.

En Colombia existen secadores mecánicos dotados con algún grado de automatización, lo que a su vez posibilita obtener un secado del grano con propiedades aceptables; sin embargo los tiempos de ejecución y el control de las variables, requieren de la automatización más completa en periodos de tiempo más cortos y con poca intervención del hombre, mejorando la rentabilidad y nivel de vida del pequeño y mediano agricultor.

De esta manera, éste diseño es relevante dada la articulación que se pretende generar entre el medio social y la aplicación de un saber científico por parte del programa en Ingeniería en Mecatrónica, para la solución de problemas específicos que se presentan en la agricultura regional, beneficiando a medianos productores, al aumentar el control de la humedad presente en el grano y la disminución del tiempo de secado, reflejándose directamente en el ingreso económico del caficultor.

1.2 ANTECEDENTES

En los antecedentes investigativos, se tomó como base la revista de investigación denominada “Beneficio ecológico del café”, producto de las investigaciones realizadas en los últimos 15 años en Cenicafé (Centro Nacional de Investigaciones

de café), presentándose artículos que evidencian los avances de la investigación aplicada en el beneficio del café.

De acuerdo con los resultados de estudios (1999) “de 623 muestras de café pergamino beneficiadas en igual número de fincas, el 25% tenían menos del 10% de humedad y el 13% tenían más del 12%, o sea que sumando los dos extremos de defecto y de exceso de humedad, el 38% de las muestras no poseían el contenido de humedad final adecuado”¹ lo cual repercute de manera negativa en el caficultor respecto a la comercialización del grano y la pérdida de calidad del mismo.

Así mismo, en el año en curso (2010) se realizó una investigación en Argentina, denominada “el análisis del efecto de variables de diseño en el comportamiento de una secadora de granos de Amaranto”; dicho estudio se encargó de analizar la incidencia de tres variables, a saber, el tiempo de residencia del grano dentro del equipo, la temperatura y el caudal de aire utilizados en el desempeño de una secadora rotativa, utilizando como principal parámetro la velocidad de evaporación del agua. Los resultados obtenidos fueron analizados mediante técnicas de análisis de varianza, llegándose a la conclusión de que tanto el tiempo de residencia como la temperatura del aire tienen incidencia en el funcionamiento de la secadora rotativa, por tanto un diseño que pretenda alta eficiencia puede lograrse al optimizar ambas variables. De igual manera en el comportamiento de la secadora rotativa, puede considerarse como una ventaja el aumento de los tiempos de residencia y la utilización de temperaturas altas; el punto óptimo de la secadora lo determinará el análisis económico que contemple el costo de la energía utilizada en calentar el aire y en mover el cilindro.

En este orden de ideas se visualizó la necesidad en los campos de investigación con temáticas respectivas al secado del café, de una continua problematización al respecto que lleva a mejoras en determinadores de humedad que por variables de precisión y precio puedan ser utilizados en fincas cafeteras.

1.3 OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Diseñar y simular la automatización de la operación de un secador electromecánico de café, para mejorar los actuales tiempos de secado promedio y humedades finales.

¹ ROA, M Gonzalo. Beneficio ecológico del café, Colombia: Cenicafe, 1999. 147 p

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Revisión bibliográfica de modelos industriales y artesanales existentes
- Esbozar una solución y realizar un diseño previo.
- Determinar y seleccionar los componentes según el diseño realizado.
- Establecer la comunicación e interacción de las señales presentes en el secador
- Simulación de operación del automatismo en un CAE.
- Ajustes finales al diseño
- Elaboración de presupuesto de fabricación

1.4 ALCANCES

El proyecto posibilitó el diseño mecánico, tomando como base un secador rotativo (tipo guardiola); mediante la adaptación de nuevos elementos de base tecnológica entre ellos un control con retroalimentación del sistema para evitar complicaciones en el proceso de secado, permitiendo el corregir inestabilidades de las diferentes señales involucradas y así mejorar los tiempos de secado, automatización, medición y control de interrupciones en el proceso. Todo ello lleva repercusiones evidentes en la calidad del producto.

Vale aclarar que la pretensión del secador electromecánico giró en torno a diseño y simulación de la automatización de la operación de un secador electromecánico de café.

1.5 METODOLOGÍA

El proyecto aplicó el método deductivo, al basar el estudio en el marco teórico. Las teorías contenidas fueron aplicadas al modelo que se ejecutó.

Al estudiar la descripción de los fenómenos o hechos, se aclara que el proyecto no posee hipótesis; por lo cual se partió de la pregunta de investigación general para la solución del problema. Empleando como punto de partida la humedad del grano

y el vínculo con la temperatura, humedad relativa; se puede afirmar que la investigación posee además del método deductivo, el correlacional.

Se llevó a cabo la revisión bibliográfica de modelos industriales y artesanales existentes que posibilitaron la determinación y selección de los componentes según el diseño realizado; se esbozó una solución y diseño previo, que permitió establecer la comunicación e interacción de las señales presentes en el secador, simulación de operación del automatismo en un CAE, ajustes finales al diseño y finalmente la elaboración de presupuesto de fabricación.

El diseño mecánico fue plasmado en el *Software SolidWorks*, siendo por medio del programa Cosmos que se dió la simulación del mismo respecto a características de construcción y la resistencia de los materiales.

Respecto al sistema eléctrico, mediante el *Software Automation Studio* se simuló un *PLC* posibilitando el control de variables de temperatura y humedad. De acuerdo a estas variables el sistema ejecuta acciones como abrir y cerrar la válvula de gas y detener el proceso por completo, activando una alarma de finalizado al detectar una humedad del 12%.

2. GENERALIDADES DEL SECADO DEL CAFÉ Y REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DE ALGUNOS MODELOS EXISTENTES

En el presente capítulo se aborda el proceso de secado de café, haciendo referencia a algunos de los dispositivos que actualmente son empleados para tal fin.

2.1 CONTENIDO DE LA HUMEDAD DEL CAFÉ

De acuerdo con estudios², el contenido de humedad de café cereza es aproximadamente del 67%, interpretándose como valor promedio de cantidad de agua en las cerezas de café, un equivalente a las dos terceras partes de la masa total. La tercera parte restante es constituida por los sólidos; siendo de éste modo el contenido del café cereza, dos veces más agua que materia seca.

De igual manera se le considera al fruto del café como un producto altamente perecedero, con una intensa actividad fisiológica de carácter inmediato una vez se ha dado su cosecha; siendo por ello que a partir del momento de la cosecha, en búsqueda de evitar la disminución de su peso seco y por tanto su calidad, se deben generar estrategias inmediatas de secado. Respecto a esto, los procesos de mayor resultado para la disminución de humedad del café³ son aquellos dados bajo beneficio vía húmeda y beneficio vía seca. El primero de ellos, consiste en sustraer la pulpa y el mucílago, obteniendo así el café pergamino húmedo, el cual cuenta con un contenido de humedad en base húmeda del 50% y en base seca del 100%. El segundo método –beneficio vía seca- consiste en iniciar directamente el proceso de secado a partir del café cereza, siendo necesario el retirar por medios térmicos aproximadamente el doble de la humedad para obtener café almendra o café verde en una base de húmeda del 12%.

Ambos procesos resultan de importancia, ya que según lo demostrado por estudios de los autores ya referidos, la cantidad de agua que se retira en el secado del café pergamino es muy superior a la extraída de los cereales y leguminosas para obtener en ambos la misma cantidad de producto seco; además de tener en cuenta que la principal dificultad para el proceso de secado de café no solo radica en las altas cantidades de agua por evaporar, sino que también es considerado un producto perecedero, puesto que pierde fácilmente la pulpa de no

² ROA, M Gonzalo. Beneficio ecológico del café, Colombia: Cenicafé, 1999. 147p

³ ROA, M Gonzalo. Beneficio ecológico del café, Colombia: Cenicafé, 1999. 147p

iniciar a tiempo el proceso de secado. Otro factor obstaculizador en el proceso de secado del café, esta dado por la obstrucción del paso uniforme del aire de secado, pilar de la buena calidad del producto final. Este tipo de razones son las que mediante la evaluación constante en países que hacen uso del proceso de vía seca, han llevado a efectuar un presecado en secadores especiales o en patios de cemento denominados “*terreiros*” de manera previa, es decir antes de ser llevados a los secadores mecánicos.

“En Colombia las normas vigentes para la comercialización del café en pergamino, establecen que el contenido de humedad debe estar comprendido en el rango de 10 al 12% (b.h.)... Estos valores de humedad del grano corresponden, por las relaciones de equilibrio higroscópico o de equivalencias de presión de vapor en la superficie del grano y en el aire que lo rodea”⁴

El valor de humedad del 12% resulta el porcentaje adecuado bajo el cual puede llevarse a cabo el almacenamiento del café en condiciones ambientales. El superar este porcentaje implica actividades fisiológicas postcosecha en las que se registra pérdida de la calidad del producto; entre dichas actividades se encuentra la actividad denominada “respiración”, la cual es realizada con alta intensidad, siendo necesario que el grano consuma energía propia de su materia seca ocasionando pérdida de peso y malas condiciones de almacenamiento. De igual manera un porcentaje que supere el 12% en la humedad del grano, genera que el aire intergranular adquiera niveles altos de “humedad relativa al equilibrio”, incrementándose la actividad de microorganismos.

En lo que respecta al secado mecánico del café pergamino, durante su proceso los granos ceden la mayor parte de la humedad al aire, el cual a su vez es forzado a pasar entre ellos. Posteriormente, en la medida en que transcurre el secado se da un desplazamiento del agua desde la parte interna del grano, hacia la parte externa como sustitución de la humedad perdida en la superficie; dicho movimiento de la humedad es denominado “difusión”.

En lo que respecta a los períodos de secado Roa y colaboradores, distinguen dos de ellos; el inicial, dado por la resistencia generada en la superficie del grano a la pérdida de la humedad. El final, se da cuando la resistencia se presenta al interior del grano.

“En la primera fase el coeficiente de transferencia de masa por convección determina las masas de secado; en la segunda fase, que es la más prolongada para el caso del café, el coeficiente de difusión de humedad del grano de café, o la resistencia al paso del agua en el interior del grano, es el determinante”⁵

⁴ ROA, M Gonzalo. Beneficio ecológico del café, Colombia: Cenicafé, 1999. 154p

⁵ ROA, M Gonzalo. Beneficio ecológico del café, Colombia: Cenicafé, 1999. 154p

Los contenidos de humedad producto de la difusión de cada grano durante el proceso de secado tienden a ser diferentes, altos en el interior y menores en la superficie. En ese sentido de acuerdo con los autores antes citados, a medida que va disminuyendo la humedad del grano, la difusión del agua tiende a ser más lenta, siendo el modo de aumentarla, el incrementar su temperatura ya que ésta genera mayor presión de vapor de agua, variable que junto con el coeficiente de difusión determina las tasas de pérdida de agua de los granos.

2.2 SECADO TRADICIONAL

El secado solar se practica desde el mismo momento en que se inició la producción de café y todavía se utiliza básicamente el mismo procedimiento; no se espera que el método tradicional de secado del café varíe substancialmente en el futuro, porque el aprovechamiento de la energía disponible (la radiación solar incide y la energía propia de aire) es muy aceptable y los costos de los equipos utilizados son razonablemente bajos, principalmente para los pequeños productores.

Tipos de secadores solares:

2.2.1 Secador solar parabólico. Esta es una forma muy práctica (alta eficacia física, bajos costos y fácil manejo del proceso) para utilizar la radiación y la energía del aire en el secado del café. Consiste de un techo plástico transparente (figura 1) y una estructura rústica en guadua de forma parabólica, que permite aprovechar mejor la radiación difusa, durante los días pocos soleados o lluviosos y la radiación directa durante las horas del sol.

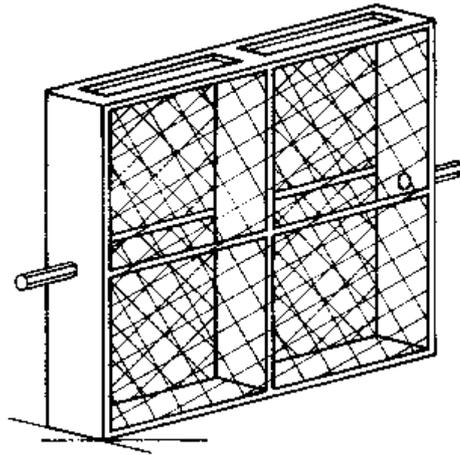
Figura 1. Secador solar parabólico



Fuente: Scientia et Technica Año XI, No 27, Abril 2005. UTP. ISSN 0122-1701

2.2.2 Secador solar rotatorio. Este secador consta de una bandeja rotatoria que permite recibir la energía radiante en forma perpendicular, mediante su rotación (siguiendo la trayectoria del sol) alrededor de un eje y fijación manual temporal (figura2).

Figura 2. Secador rotatorio para café



Fuente: www.cd3wd.com/cd3wd_40/inpho/vlibrary/x0058s/gif/x0058s0z.gif

2.3 SECADO ARTIFICIAL

Este tipo de secado utiliza fuentes de energía diferentes a la solar, entre ellas derivados del petróleo o energía eléctrica. De igual manera emplea una serie de dispositivos para la ejecución del secado, un ventilador de tiro forzado que impulsa al aire caliente a través de los granos de café. El café debe estar en una estructura con uno o más compartimentos. Para que el aire cumpla con la función de secar el café, es necesario aumentar su temperatura por medio de una caldera, en casos donde el combustible a emplear sea carbón o cisco; de lo contrario si es utilizado el gas, solo bastará con un quemador para dicho combustible.

El aire eleva la temperatura del agua presente en el interior del grano, convirtiéndolo en vapor de agua; posterior a ello este vapor es expulsado a la atmósfera.

A diferencia con el secado tradicional, el secado mecánico requiere de menos tiempo, pero con un costo superior ya que deben ser empleados combustibles para tal acción; éste costo es asumido por los caficultores a cambio de obtener dividendos lo más rápido posible.

2.3.1 Secadora de cuartos inclinados. Su composición está dada por dos estructuras. Una de ellas inclinada 30° con respecto a la horizontal que es fabricada en concreto, debido a que hace parte de los sistemas de secado artificial cuenta con una cámara de combustión y el sistema para impulsar el aire a través del grano. Dicho sistema requiere de dos compartimientos para alternar el reposo del grano, lo cual proporciona la salida de vapor de agua del mismo y por tanto un secado más uniforme.

2.3.2 Secadora rotativa. La secadora rotativa emplea la rotación constante para una mejor homogenización de los granos en el proceso de secado (figura 3 y 4). Su estructura es conformada por un cilindro, allí va alojado el café, el cual es mezclado constantemente en la etapa de secado. Para un óptimo empleo de esta secadora es necesario llenar el dispositivo con el 70% de su capacidad con el objetivo de que el aire pase por los granos, forzando la extracción de humedad. En caso contrario cuando su porcentaje es bajo, el aire no atraviesa la capa de café y se genera pérdida en el ambiente.

De los modelos constructivos convencionales, la secadora rotativa presenta el equilibrio más cercano en la fase de estabilización del grano.

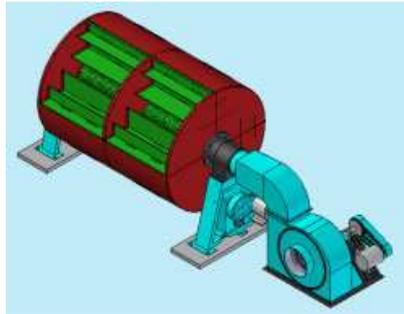
Figura 3. Secadora rotativa tipo guardiola



Fuente: www.mchindustrial.com.mx.com/index.php?p=1_5_Galer-a

2.3.3 Secadora rotativa modular. Una variante de la secadora rotativa es la modular (figura5), presenta una serie de módulos, los cuales son empleados para secar el café de diferentes calidades sin mezclarlos, utilizando el mismo equipo en una sola operación.

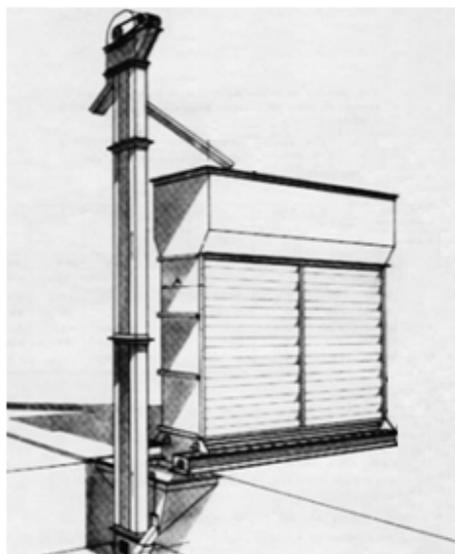
Figura 4. Secadora rotativa modular



Fuente: www.metalcol.com/web/novedades/44-noticias/59-rotativa

2.3.4 Secadora vertical. Su estructura está conformada por un elevador de cangilones, por columnas delgadas por donde el café descende con velocidad constante. El aire atraviesa estas columnas con un flujo constante para lograr un secado homogéneo en contra del flujo del grano; esta clase de secado es muy eficiente ya que el aire sale a través del grano más húmedo.

Figura 5. Secadora vertical



Fuente: www.bendig.co.cr/presecadoras.html

2.3.5 Secador mecánico con estructura fija. En las fincas cafeteras grandes y medianas, es el secador de café más empleado. Está construido alrededor de un cuarto físico normal, y a partir de allí se efectúan algunas adecuaciones y modificaciones para su funcionamiento; éstas comprenden la adaptación de la caldera, el ventilador de tiro forzado y el control de temperatura.

Una variante del secador mecánico de estructura fija, es el secador estático metálico (figura 6). Este secador opera bajo los mismos principios que el anteriormente mencionado; su diferencia radica en los materiales de construcción (estructura en acero) y en la distribución eficiente del espacio, con respecto a la cantidad de café a secar.

El calor necesario para aumentar la temperatura del aire es producido por una caldera, la cual es alimentada por cisco o en su defecto por carbón mineral. Estos dispositivos están provistos de motor reductor encargado de hacer girar un tornillo sin fin elemento que transporta el combustible a la caldera.

Figura 6. Secador estático metálico



Fuente: www.jotagallo.com/silos.htm

3. REDISEÑO DE SECADOR DE CAFÉ, A PARTIR DE UN SECADOR ROTATIVO ELECTROMECAÁNICO

A continuación se efectúa un tratamiento de variables con el objetivo de determinar el caudal necesario para llevar a cabo la operación de secado y el esfuerzo a que es sometida la estructura del cilindro que contiene el café y el eje.

3.1 CÁLCULO FLUJO MÁSIICO Y CAUDAL DE AIRE EN LA OPERACIÓN DE SECADO

Para el cálculo del flujo másico y el caudal de aire fue empleado el modelo desarrollado en la revista *Scientia et Technica* número 35 denominado cálculo del flujo másico y caudal de aire para un ventilador utilizado en silos para secado del café.

Parámetros de entrada en el sistema:

Masa de café: 200kg

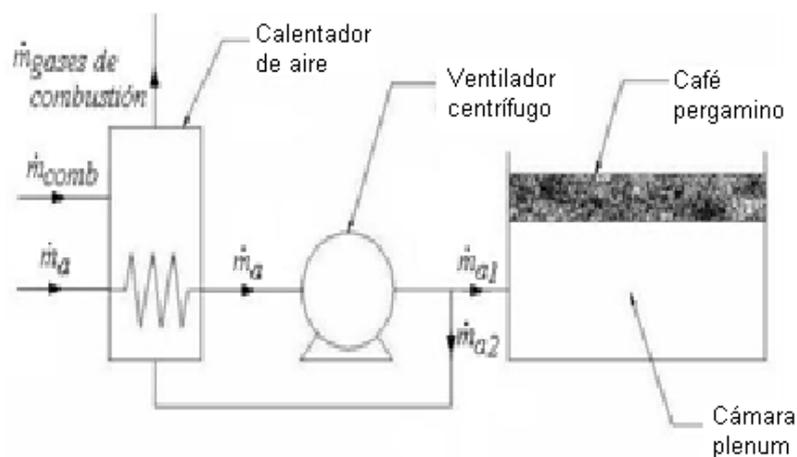
Contenido inicial de humedad: entre el 48% y el 55%

Humedad relativa: entre 60% y el 80%

Tiempo de secado: 18 horas

Clase de combustible: Gas natural

Figura 7. Esquema de una instalación típica de secado de café



Fuente: *Scientia et Technica* Año XIII, No 35, Agosto de 2007. Universidad Tecnológica de Pereira. ISSN 0122-1701

3.1.1 Cálculo flujo másico de aire que pasa a través del café

$$\dot{m}_a = \dot{m}_{a1} + \dot{m}_{a2} \quad (1)$$

\dot{m}_{a1} : Flujo masa de aire para extraer la humedad del café

\dot{Q}_w : Calor de vaporización ganado por el café

Q_{a1} : Calor cedido por el aire

n_s : Eficiencia de secado

\dot{m}_w : Flujo de masa de agua extraído del café

C_{p_w} : Calor específico vapor de agua

ΔT_w : Cambio de temperatura, etapa de secado en el café

h_{fg} : Entalpía vaporización de agua

$C_{p_{a1}}$: Calor específico aire atmosférico

ΔT_{a1} : Cambio de temperatura aire de secado

w_o : Humedad inicial del café

w_f : Humedad final del café

t : Tiempo que se hace pasar el aire por el café

$$\dot{Q}_w = n_s \cdot Q_{a1} \quad (2)$$

$$\dot{m}_w (C_{p_w} \cdot \Delta T_w + h_{fg}) = n_s \cdot \dot{m}_{a1} \cdot C_{p_{a1}} \cdot \Delta T_{a1} \quad (3)$$

$$\text{De (3): } \dot{m}_{a1} = \frac{\dot{m}_w (C_{p_w} \cdot \Delta T_w + h_{fg})}{n_s \cdot C_{p_{a1}} \cdot \Delta T_{a1}}$$

$$\dot{m}_w = \frac{m_{\text{café}}}{t} (w_o - w_f) \quad (4)$$

Reemplazando (4) en (3)

$$\dot{m}_{a1} = \frac{m_{\text{café}} (w_o - w_f) (C_{p_w} \cdot \Delta T_w + h_{fg})}{t \cdot n_s \cdot C_{p_{a1}} \cdot \Delta T_{a1}}$$

Las temperaturas a la entrada y a la salida para el aire y el agua en el café se tabulan en la tabla 1.

Tabla 1. Temperaturas aire, café entrada y salida del secador

$T_{a1, \text{entrada}} (^{\circ}\text{C})$	50	323,15 K
$T_{a1, \text{salida}} (^{\circ}\text{C})$	20	293,15 K
$T_{w, \text{entrada}} (^{\circ}\text{C})$	20	293,15 K
$T_{w, \text{salida}} (^{\circ}\text{C})$	35	308,15 K

Fuente: Scientia et Technica Año XIII, No 35, Agosto de 2007. Universidad Tecnológica de Pereira. ISSN 0122-1701

$$\Delta T_{a1} = 25^{\circ}\text{C} = 30$$

$$\Delta T_w = 15^{\circ}\text{C} = 15$$

$$T_{w\text{prom}} = \frac{20+35}{2} = 27.5^{\circ}\text{C}$$

$$C_{p_w} = 1,8723 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot \text{K}$$

$$h_{fg} = 2435,75 \text{ KJ/Kg}$$

$$T_{a1\text{prom}} = \frac{50 + 25}{2} = 37,5^{\circ}\text{C} = 310,65\text{K}$$

$$C_{p_{a1}} = \frac{1,005\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot \text{K}$$

$$\dot{m}_{a1} = \frac{m_{\text{café}}(0,43) (1,8723 * 15 + 2435,75)}{t \cdot n_s * 1,005 * 30}$$

$$\dot{m}_{a1} = 35,14 \frac{m_{\text{café}}}{t \cdot n_s}$$

Para (200kg) y 18h de secado tenemos:

$$\dot{m}_{a1} = 35,14 \frac{200}{64800 * 0.6}$$

$$\dot{m}_{a1} = 0,181 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad \text{Flujo másico de aire necesario en el proceso de secado}$$

$$\dot{m}_{a1} = \rho \dot{V}$$

$$\rho = 1.2 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \quad \text{Densidad del aire a nivel del mar}$$

$$\rho = 1 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \quad \text{Densidad del aire en Pereira}$$

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}_{a1}}{\rho}$$

$$\dot{V} = \frac{0,181}{1} = 0,181 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 383,75 \text{ scfm} \quad \text{Caudal empleado en la operación de secado}$$

3.1.2 Cálculo flujo másico utilizado en la combustión

$$\dot{m}_{a2} = \dot{m}_{\text{com}} \cdot AC = \dot{m}_{\text{com}} \cdot ACT \cdot (1 + e)$$

\dot{m}_{com} : Flujo masa de combustible

AC: Relación aire combustible

ACT: Relación aire combustible teórico

E: Exceso de aire

$$\dot{m}_{\text{com}} = \frac{m_{\text{com}}}{t}$$

Mediante ensayo de campo se obtuvo que para secar 3,22Kg de café pergamino es necesario 1kg de cisco (\dot{Q}_{com1}).⁶ Para 200kg es necesario 62,11kg de cisco.

$$\dot{Q}_{com2} = \dot{Q}_{com1}$$

$$n_{cc2} \cdot m_{com2} \cdot \Delta h_{com2} = n_{cc1} \cdot m_{com1} \cdot \Delta h_{com1}$$

$$m_{com2} = m_{com1} \cdot \frac{\Delta h_{com1}}{\Delta h_{com2}} \cdot \frac{n_{cc1}}{n_{cc2}}$$

Δh_{com} : Poder calorífico combustibles

n_{cc} : Eficiencia combustión

En la tabla 2 se puede encontrar valores de poder calorífico de algunos combustibles empleados en el secado del café.

Tabla 2. Poder calorífico de algunos combustibles

Combustible	Poder calorífico(kJ/kg)
Cascarilla de café	17936
Coque	30514
ACPM	43475
Basura (celulosa)	19724
Gas natural	37188
Residuo de madera	15912
Bagazo de caña	8964

Fuente: Scientia et Technica Año XIII, No 35, Agosto de 2007. Universidad Tecnológica de Pereira. ISSN 0122-1701

$$m_{gas} = m_{cisco} \cdot \frac{\Delta h_{cisco}}{\Delta h_{gas}}$$

$$m_{gas} = 62,11 \frac{17936}{37188}$$

$$m_{gas} = 29,956 \text{kg}$$

$$\dot{m}_{gas} = \frac{m_{gas}}{t} = \frac{29,956}{64800} = 4,623 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$$

$$ACT = 17,2 \quad ^7$$

⁶ OROZCO, H Carlos Alberto, BEDOYA L Fernando. Scientia et Technica Año XIII, No 35, Agosto de 2007. Universidad Tecnológica de Pereira. ISSN 0122-1701

⁷ www.brighthub.com/engineering/mechanical/articles/15235.aspx

$$e = 0,3$$

$$\dot{m}_{a2} = 4,623 \times 10^{-4} (17,2)(1 + 0,3) = 1,03 \times 10^{-2} \text{ kg/s}$$

\dot{m}_a : Flujo másico de aire que debe generar el ventilador

$$\dot{m}_a = \dot{m}_{a1} + \dot{m}_{a2}$$

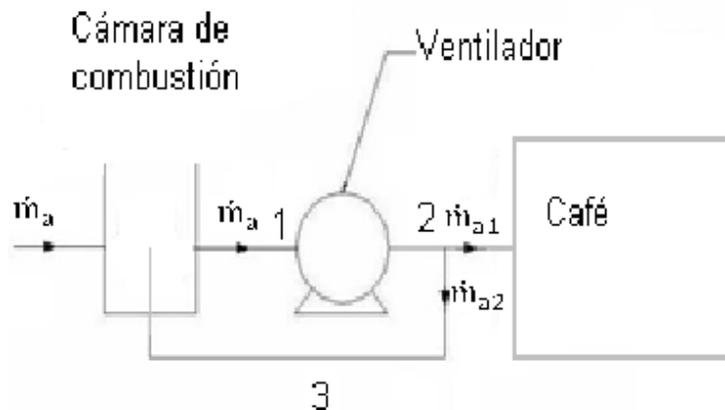
$$\dot{m}_a = 0,181 + 0,0103 = 0,1913 \text{ kg/s}$$

$\dot{V} = \frac{\dot{m}_a}{\rho} = \frac{0,1913 \text{ kg/s}}{1 \text{ kg/m}^3} = 0,1913 \text{ m}^3/\text{s}$ Caudal de aire que debe generar el ventilador para el proceso de secado y de combustión.

3.2 CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS EN LA TUBERÍA

A causa de los accesorios, la longitud de la tubería y cambio de diámetros, se presentan pérdidas en el flujo del aire, siendo necesario calcularlas con el objetivo de establecer la potencia en el motor del ventilador.

Figura 8. Disposición de ductos de aire



Fuente: Microsoft © paint. Copyright© 2007 Microsoft Corporation.

Sector 2

$$\phi_{\text{interior nominal}} = 8''$$

$$\phi_{\text{interior nominal}} = 202,7 \text{ mm}$$

$$\frac{\varepsilon}{d} = 0,00022 \quad \text{Rugosidad relativa tubo de 8'' apéndice A-41 Crane}$$

$$V = \frac{\dot{V}}{A} \quad \text{Velocidad del aire}$$

$$V = \frac{0,1913}{\left(\frac{0,2027}{2}\right)^2 \pi}$$

$$V = 5,93 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\text{Re} = \frac{VD}{\nu} \quad \text{Número de Reynolds}$$

ν = viscosidad cinemática para el aire a 50°C

$$\text{Re} = \frac{(5,93)(0,2027)}{1,79 (10^{-5})} = 67151,45$$

Ubicando el número de Reynolds y la rugosidad relativa en el diagrama de *Moody*, se obtiene el factor de fricción f .

$$f = 0,02$$

L = Longitud tubería

$$h_f = \frac{fLV^2}{D2g}$$

$$h_f = \frac{0,02(0,25)(5,93)^2}{(0,2027)(2)(9,81)} = 0,0442 \text{ m}$$

$$\dot{W}_{sector 2} = \dot{V}\gamma h$$

$$\dot{W}_{sector 2} = 0,1913(10,71)(0,0442) = 0,091 \frac{\text{N.m}}{\text{s}}$$

Sector 3

$$\phi_{\text{interior nominal}} = 3''$$

$$\phi_{\text{interior}} = 77,9 \text{ mm}$$

$$\frac{\epsilon}{d} = 0,00055 \quad \text{Rugosidad relativa tubo de 3'' apéndice A-41 Crane}$$

$$V = \frac{1,03 \times 10^{-2}}{\left(\frac{0,0779}{2}\right)^2 \pi}$$

$$V = 2,16 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\text{Re} = \frac{VD}{\nu} \quad \text{Número de Reynolds}$$

ν = viscosidad cinemática para el aire a 50°C

$$\text{Re} = \frac{(2,16)(0,0779)}{1,79 (10^{-5})} = 9400,22$$

Ubicando el número de Reynolds y la rugosidad relativa en el diagrama de *Moody*, se obtiene el factor de fricción f .

$$f = 0,03$$

L = Longitud tubería

$$h_f = \frac{fLV^2}{D2g}$$

$$h_f = \frac{0,03(0,845)(2,16)^2}{(0,0779)(2)(9,81)} = 0,0774 \text{ m}$$

$$\dot{w}_{\text{sector } 3} = 1,03 \times 10^{-2} (10,71)(0,0774) = 0,00854 \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{s}}$$

En el sector 2 es necesario adicionar 2 codos 3"

$k = 30f_T$ Coeficiente de resistencia codo a 90° A-49 *Crane*

$f_T = 0,018$ Factor de fricción tubería de 3" A-48 *Crane*

$$k = 30(0,018) = 0,54$$

$$h_{\text{codo}} = k \left(\frac{V^2}{2g} \right)$$

$$h_{\text{codo}} = 0,54 \left(\frac{2,16^2}{2(9,81)} \right) = 0,1284 \text{ m}$$

$$\dot{w}_{\text{sector } 3 \text{ codos}} = 1,03(10^{-2})(10,71)(0,1284)(2) = 0,0283 \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{s}}$$

Sector 4

$$\emptyset_{\text{interior nominal}} = 8''$$

$$\emptyset_{\text{interior nominal}} = 202,7 \text{ mm}$$

$$\frac{\varepsilon}{d} = 0,00022 \quad \text{Rugosidad relativa tubo de 8" apéndice A-41 Crane}$$

$$V = \frac{\dot{V}}{A} \quad \text{Velocidad del aire}$$

$$V = \frac{0,181}{\left(\frac{0,2027}{2}\right)^2 \pi}$$

$$V = 5,61 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\text{Re} = \frac{VD}{\nu} \quad \text{Número de Reynolds}$$

ν = viscosidad cinemática para el aire a 50°C

$$\text{Re} = \frac{(5,61)(0,2027)}{1,79 (10^{-5})} = 63527,76$$

Ubicando el número de Reynolds y la rugosidad relativa en el diagrama de *Moody*, se obtiene el factor de fricción f .

$$f = 0,02$$

L = Longitud tubería

$$h_f = \frac{fLV^2}{D2g}$$

$$h_f = \frac{0,02(0,25)(5,61)^2}{(0,2027)(2)(9,81)} = 0,04 \text{ m}$$

$$\dot{w}_{\text{sector 4}} = 0,181(10,71)(0,04) = 0,0775 \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{s}}$$

Entre el sector 2 y 4 es necesario adicionar una conexión en T 8" flujo directo

$k = 20f_T$ Coeficiente de resistencia para T 8" flujo directo A-49 Crane

$f_T = 0,28$ Factor de fricción tubería de 8" A-48 Crane

$$k = 20(0,014) = 0,28$$

$$h_T = k \left(\frac{V^2}{2g} \right)$$

$$h_T = 0,28 \left(\frac{5,93^2}{2(9,81)} \right) = 0,5018\text{m}$$

$$\dot{W}_{T \text{ flujo directo}} = 0,1913(10,71)(0,5018) = 1,028 \frac{\text{N.m}}{\text{s}}$$

Entre el sector 2 y 3 es necesario adicionar una conexión en T 3" flujo a 90°

$$k = 60f_T$$

$$f_T = 0,018$$

$$k = 60(0,018) = 1,08$$

$$h_T = k \left(\frac{V^2}{2g} \right)$$

$$h_T = 1,08 \left(\frac{2,16^2}{2(9,81)} \right) = 0,2568\text{m}$$

$$\dot{W}_{T \text{ flujo a } 90^\circ} = 0,0103(10,71)(0,2568) = 0,0283 \frac{\text{N.m}}{\text{s}}$$

Pérdida a la entrada del cilindro por choque

$$k = 45f_T$$

$$k = 45(0,014) = 0,63$$

$$h_T = k \left(\frac{V^2}{2g} \right)$$

$$h_T = 0,63 \left(\frac{5,61^2}{2(9,81)} \right) = 1,01\text{m}$$

$$\dot{W}_{choque} = 0,181(10,71)(1,01)(2) = 3,92 \frac{\text{N.m}}{\text{s}}$$

$$\begin{aligned} \dot{W}_{\text{accesorios}} &= 3,92 + 0,0283 + 1,028 + 0,0775 + 0,0283 + 0,00854 + 0,091 \\ &= 5,182 \frac{\text{N.m}}{\text{s}} \end{aligned}$$

Pérdida paso de aire a través del café.

$$\frac{\Delta P}{L} = \left[\left(\frac{\dot{V}}{A} \right) / (9,523 - 0,0476M) \right]^{1,4793}$$

\dot{V} = Caudal de aire, $\left(\frac{\text{m}^3}{\text{min}}\right)$.

A = Área transversal al flujo de aire, (m^2) .

M = Contenido de humedad del café

ΔP = Caída de presión en secciones distantes en L, (centímetros de agua).

L = Función del espesor de la capa, (m)

$$\frac{\Delta P}{(1,126)} = \left[\frac{\left(\frac{10,86}{(0,350^2 \pi)}\right)}{(9,523 - 0,0476(0,55))} \right]^{1,4793} \quad 8$$

$$\Delta P = 9,28 \text{ cm. c. a} = 910,05 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

$$\dot{W}_{\text{cilindro}} = \dot{V} \Delta P$$

$$\dot{W}_{\text{cilindro}} = 0,181(910,05) = 164,72 \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{s}}$$

$$Ef = \text{Eficiencia} = 0,5$$

$$\dot{W}_{\text{total}} = \frac{164,72 + 5,182}{0,5} = 339,80 \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{s}}$$

$$i = \frac{339,80}{110} = 3,09 \text{ A}$$

Aproximadamente 0,5 HP

3.3 SELECCIÓN DEL VENTILADOR

$$P_{\text{estática ductos}} = \frac{\dot{W}_{\text{accesorios}}}{\dot{V}} \quad \text{Ver numeral 3.2}$$

$$P_{\text{estática ductos}} = \frac{5,182}{0,1913} = 27,08 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 2,76 \text{ mm. c. a}$$

$$P_{\text{estática total}} = 92,8 + 2,76 = 95,56 \text{ mm. c. a}$$

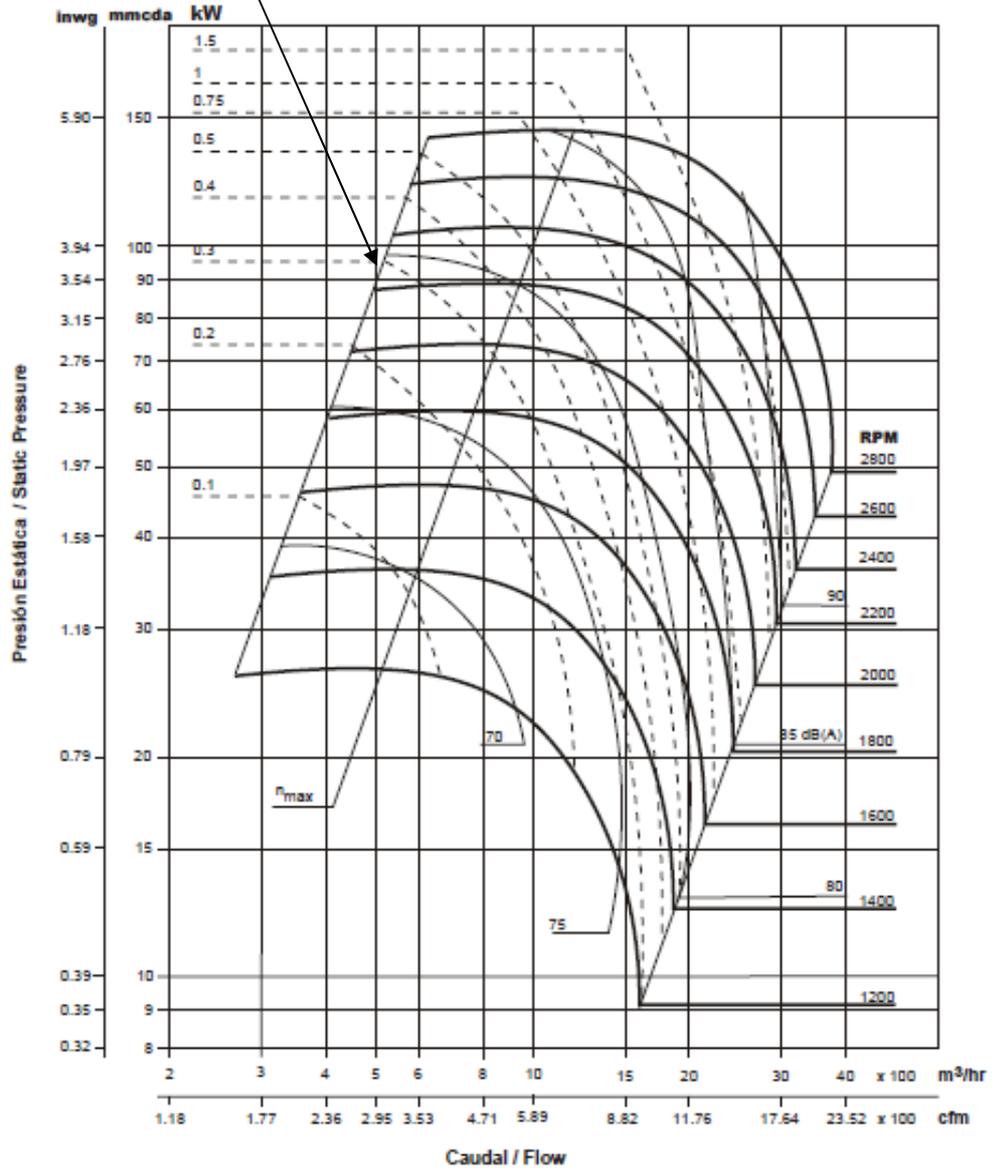
$$\dot{V}_{\text{total}} = 0,1913 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 688,68 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \quad \text{Ver numeral 3.1}$$

⁸ ROA, M Gonzalo. Beneficio ecológico del café, Colombia: Cenicafé, 1999. 162

Tabla 3. Selección ventilador

Elección ventilador

SA 9/4



Fuente: <http://www.mgasociados.com/solerypalau/sa.pdf>

Con base en la curva de la tabla 3 y para una presión estática de 95,56 mm.c.a, un caudal de 688,68 m³/ h y una potencia de 0,373 kW, se obtiene 2400 rpm para el ventilador.

3.4 ESFUERZO GENERADO POR EL PESO DEL DISPOSITIVO

A continuación se presentan los cálculos necesarios para establecer si los materiales elegidos son los correctos en el diseño.

Material Cilindro : Lámina HR calibre 14
 Material Tapa : Placa HR calibre $\frac{5}{16}$ "

Se eligieron inicialmente estos materiales por ser comerciales para este tipo de aplicaciones.

Sean: $t =$ Espesor de lámina $\gamma =$ Peso específico de lámina
 $W =$ Peso del dispositivo $t = 0,0019m$ $\gamma = \frac{N}{m^3}$

Para calcular el peso de cada componente se tiene:

$$W_{cilindro} = 2\pi r t l \gamma$$

$$W_{cilindro} = 2\pi(0,350)(1,11)t\gamma$$

$$W_{tapa} = \pi r^2 t \gamma$$

$$W_{tapa} = \pi(0,352)t\gamma$$

Sumando los pesos de cada componente se obtiene el peso total del cilindro en términos del peso específico y el espesor de lámina.

$$W_{cilindro} = 2\pi(0,350)(1,11)(0,0019)\gamma$$

$$W_{cilindro} = 0,00464\gamma$$

$$W_{tapa} = \pi(0,352^2)(0,008)\gamma$$

$$W_{tapa} = 0,00311\gamma$$

$$\rho_{café} = 650 \frac{kg}{m^3} \quad ^9$$

$$\rho_{lámina cold roll} = 7850 \frac{kg}{m^3}$$

$$W_{café} = 200(9,81) = 1962 N$$

⁹ ROA, M Gonzalo. Beneficio ecológico del café, Colombia: Cenicafe, 1999. 171.p

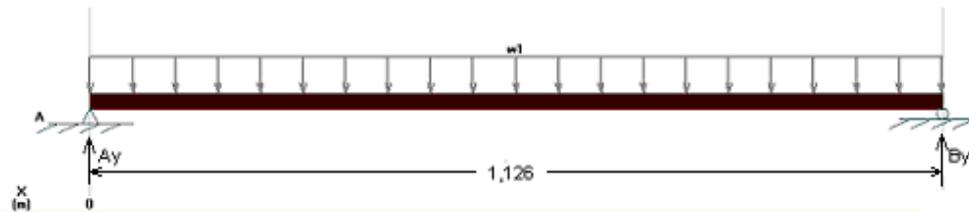
$$W_{\text{conjunto}} = 0,004638(77008,5) + 0,00311(77008,5)(2) + 1962$$

$$W_{\text{conjunto}} = 2798 \text{ N}$$

$$W_1 = 2485 \text{ N/m} \text{ Carga distribuida conjunto cilindro café}$$

La figura 9 representa el diagrama de cuerpo libre para el conjunto comprendido por el cilindro y su contenido.

Figura 9. Diagrama de cuerpo libre conjunto cilindro café



Fuente: *MDSOLIDS Version 1.5, Copyright © 1997 Timothy A. Philpot*

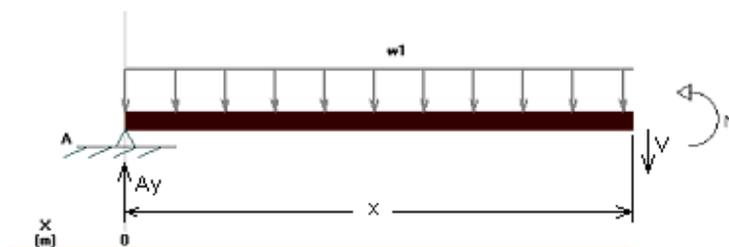
$$\sum M_B = 0; \quad -A_y L + RL(L/2) = 0$$

$$A_y = \frac{RL(L/2)}{L} = \frac{RL}{2} = \frac{(2485)(1,126)}{2}$$

$$A_y = 1399 \text{ N}$$

La figura 10 representa el corte para el segmento intermedio del cilindro, con el objetivo de analizar el esfuerzo cortante en ese punto específico.

Figura 10. Corte en el segmento $0 \leq x \leq L/2$ cilindro



Fuente: *MDSOLIDS Version 1.5, Copyright © 1997 Timothy A. Philpot*

$$V = \frac{RL}{2} = 1399 \text{ N}$$

$$\sum M_{\text{Corte}} = 0$$

$$\frac{-RLX}{2} + RX\frac{X}{2} + M = 0$$

$$M = \frac{RL}{2}X - \frac{RX^2}{2}$$

$$\text{Si } X = 0 \quad M = 0$$

$$\text{Para } X = L/2$$

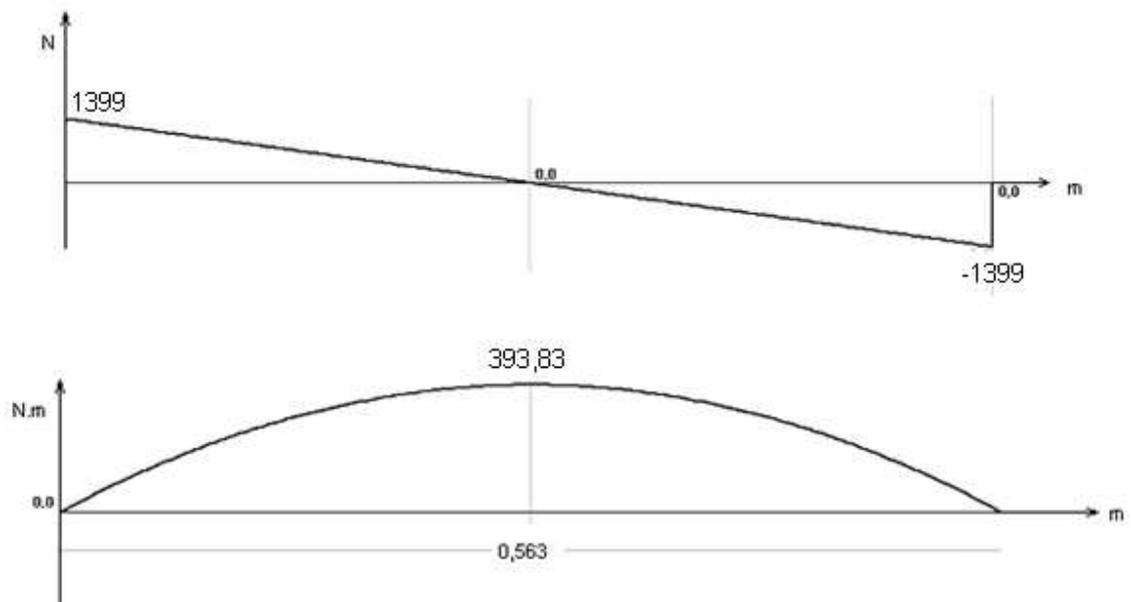
$$M = \frac{RL^2}{4} - \frac{RL^2}{8} = \frac{RL^2}{8}$$

$$M = \frac{2485(1,126^2)}{8}$$

$$M = 393,83 \text{ N.m Momento flector en } L/2$$

En la figura 11 se observa el esfuerzo cortante y el momento flector a que es sometido el cilindro.

Figura 11. Diagrama esfuerzo cortante, momento flector para el cilindro



Fuente: *MDSOLIDS Version 1.5, Copyright © 1997 Timothy A. Philpot*

3.4.1 Cálculo del esfuerzo generado en el dispositivo

σ = Esfuerzo generado por el peso en el dispositivo.

I = Momento de inercia en el cilindro.

C = Distancia desde el centroide hasta la fibra más externa.

F_s = Factor de seguridad.

r_0 = Radio inicial.

r_1 = Radio final.

$$\sigma_p = 280(10^6) \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \quad \text{Para la lámina cold rolled}$$

$$F_s = 2 \quad \text{Factor de seguridad asumido}$$

$$\sigma = \frac{MC}{I} \qquad I = \frac{\pi}{4} r^4 \qquad I = \frac{\pi}{4} (r_0^4 - r_1^4)$$

$$r_0 = 0,352 \text{ m}$$

$$r_1 = 0,352 - t = 0,352 - 0,002 = 0,350$$

$$\sigma = \frac{393,83(0,352)}{\frac{\pi}{4} (0,352^4 - 0,350^4)}$$

$$\sigma = 510207,36 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} < \frac{\sigma_p}{F_s}$$

$$\sigma = 1020414,71 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} < \sigma_p$$

$$\sigma \ll \sigma_p$$

Se concluye que el esfuerzo generado en lámina por el dispositivo es menor que el esfuerzo de la lámina.

3.3.2 Deflexión en el cilindro

$$M = \frac{RL}{2} X - \frac{RX^2}{2}$$

$$\int EId\theta = \int \left(\frac{RL}{2} X - \frac{RX^2}{2} \right) dx$$

$$EI\theta = \frac{RLX^2}{4} - \frac{RX^3}{6} + C_1$$

$$\int EId_Y = \int \left(\frac{RLX^2}{4} - \frac{RX^3}{6} + C_1 \right) dx$$

$$EIY = \frac{RLX^3}{12} - \frac{RX^4}{24} + C_1X + C_2$$

Condiciones de frontera

$$Y = 0 \text{ en } X = 0, \quad X = L$$

$$\theta = 0 \text{ en } X = L/2$$

$$0 = \frac{RLX^2}{4} - \frac{RX^3}{6} + C_1$$

$$C_1 = -\frac{RL^3}{16} + \frac{RL^3}{48} = -\frac{RL^3}{24}$$

$$C_2 = 0$$

$$EIY = \frac{RLX^3}{12} - \frac{RX^4}{24} - \frac{RL^3}{24}X$$

$$Y_{\text{máximo}} \text{ en } X = L/2$$

$$EIY = \frac{RL^4}{96} - \frac{RL^4}{384} - \frac{RL^4}{48}$$

$$Y = -\frac{5RL^4}{384EI}$$

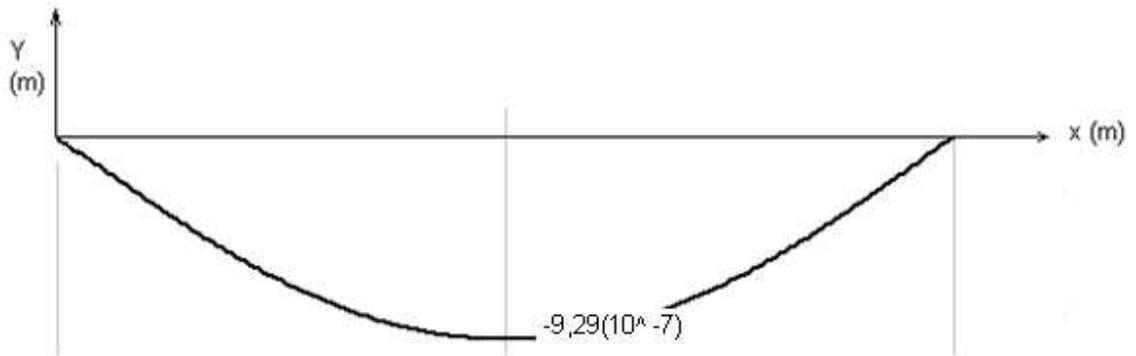
$$I = \frac{\pi}{4}r^4 \quad E = 205,985(10^9) \frac{N}{m^2} \quad \text{Módulo de elasticidad lámina cold rolled}$$

$$Y = -\frac{5(2485)(1,126)^4}{384(205,985(10^9)) \frac{\pi}{4}(0,352^4 - 0,350^4)}$$

$$Y = -9,29(10^{-7}) \text{ m}$$

La figura 12 hace alusión a la deformación a que es sometido el cilindro.

Figura 12. Deflexión en el cilindro

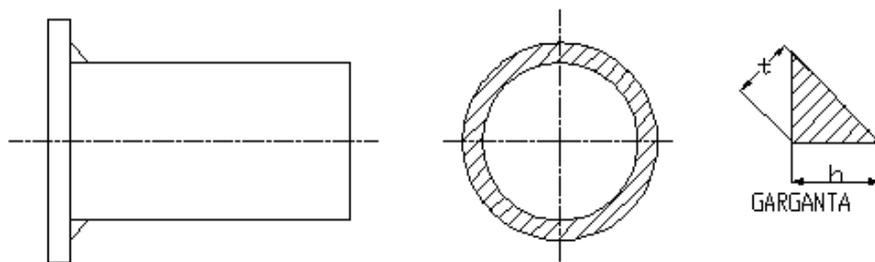


Fuente: *MDSOLIDS Version 1.5, Copyright © 1997 Timothy A. Philpot*

3.4.2 Análisis de la soldadura entre las tapas y el cilindro

La soldadura sometida a esfuerzo cortante primario, y esfuerzo flexionante causado por el momento flector (figura 13).

Figura 13. Cordón soldadura conjunto tapa cilindro



Fuente: *SolidWorks ® Office Premium 2007. UGS Corporation, EE.UU. Copyright © 1995-2006.*

- τ' = Esfuerzo cortante primario.
- σ = Esfuerzo flexionante.
- A = Área garganta de soldadura.
- I = Momento de inercia de la soldadura.
- γ = Peso específico de lámina.

h = Ancho de la soldadura.

I_u = Segundo momento del área unitaria.

F_s = Factor de seguridad.

$\sigma_p = 470,4 (10^6) \frac{N}{m^2}$ Límite de fluencia soldadura AWS E7010

$$\tau' = \frac{F}{A} \quad A = 1,414\pi hr \quad t = 0,001m \quad \gamma = 77008,5 \frac{N}{m^3}$$

$$\sigma = \frac{MC}{I} \quad I = 0,707hI_u \quad I_u = \pi^3 \quad h = 0,003m$$

Reemplazando se tiene:

$$\tau' = \frac{F}{A} = \frac{1399}{1,414\pi(0,003)(0,352)} = 298232,18 \frac{N}{m^2}$$

$$\sigma = \frac{393,83 (0,352)}{0,707\pi(0,352^3)0,003}$$

$$\sigma = 477015,98 \frac{N}{m^2} < \frac{\sigma_p}{F_s}$$

$$\sigma = 954031,96 \frac{N}{m^2} < 470,4 (10^6)$$

$$\sigma \ll \sigma_p$$

3.4.3 Esfuerzo en el eje

$$P_1 = 1399 \text{ N}$$

$$P_2 = 1399 \text{ N}$$

Donde P_1 y P_2 son cargas que deben soportar los rodamientos

Masa barra perforada 50x40= 6,1 kg/m

Longitud eje= 1,390 m

$$w_1 = 59,841 \frac{N}{m}$$

w_1 Carga del eje

\forall = Volumen ocupado por el café sobre el eje

$$\forall = 0,14(1,126)(0,05)$$

$$V = 0,007882 \text{ m}^3$$

$$\rho_{\text{café}} = 650 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$g = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$W_{\text{café sobre el eje}} = V \rho_{\text{café}} g$$

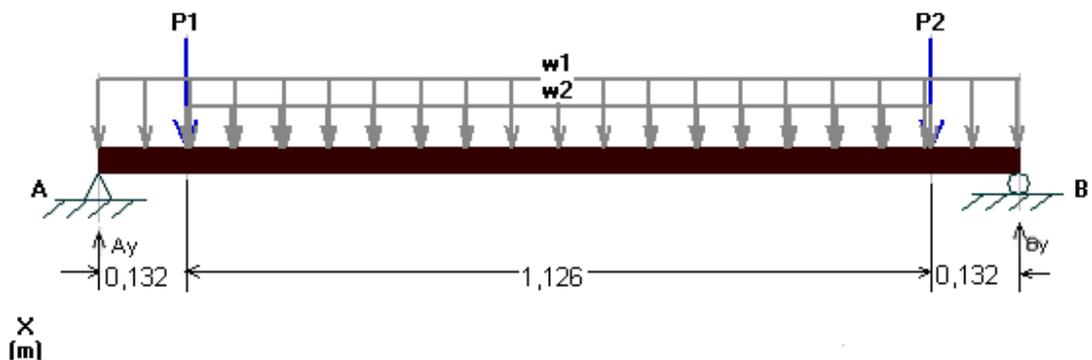
$$W_{\text{café sobre el eje}} = 50,26 \text{ N}$$

w_2 Carga distribuida que pertenece al volumen de café que actúa sobre el eje

$$w_2 = 44,64 \text{ N/m}$$

La figura 14 representa el diagrama de cuerpo libre para el eje, elemento encargado de soportar el cilindro y su contenido.

Figura 14. Diagrama de cuerpo libre para el eje



Fuente: *MDSOLIDS Version 1.5, Copyright © 1997 Timothy A. Philpot*

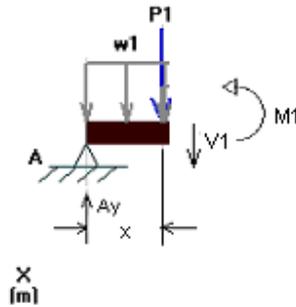
$$\sum M_{B=0}; -A_y(L) + P_1(1,258) + P_2(0,132) + w_1 \frac{(L^2)}{2} + w_2(L - 0,264) \frac{(L)}{2} = 0$$

$$A_y = 1465,72 \text{ N}$$

$$B_y = 1465,72 \text{ N}$$

Las figuras 15 y 16 representan el corte donde se encuentran los rodamientos. Por estos elementos es transmitida la fuerza que debe soportar el eje, proveniente del cilindro y su contenido.

Figura 15. Corte 1 $0 \leq x \leq 0,132$



Fuente: *MDSOLIDS Version 1.5, Copyright © 1997 Timothy A. Philpot*

$$v_1 + w_1 x + P_1 - A_y = 0$$

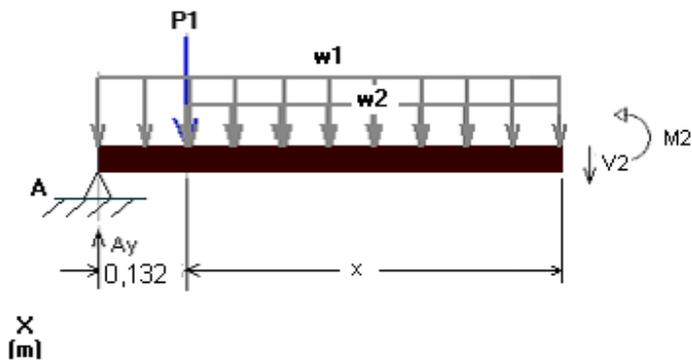
$$v_1 = 58,82 \text{ N}$$

$$M_1 = A_y(x) - w_1 \frac{(x^2)}{2}$$

$$x = 0 \quad M_1 = 0$$

$$x = 0,132 \quad M_1 = 192,95 \text{ N.m}$$

Figura 16. Corte 2 $0 \leq x \leq 0,563$



Fuente: *MDSOLIDS Version 1.5, Copyright © 1997 Timothy A. Philpot*

$$-A_y + w_1(0,132 + x) + P_1 + w_2(x) + v_2 = 0$$

$$v_2 = 1465,72 - w_1(0,132 + 0,563) - P_1 - w_2(0,563)$$

$$v_2 = -0,001815 \text{ N}$$

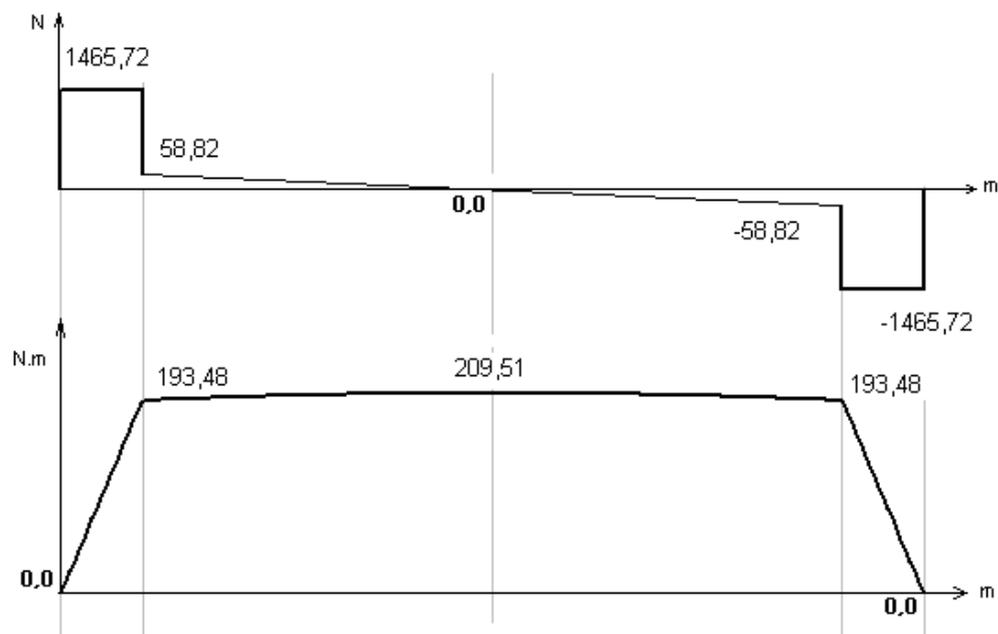
$$M_2 = A_y(0,132 + x) - w_1 \frac{(0,132+x)^2}{2} - P_1(x) - w_2 \frac{(x^2)}{2}$$

$$x = 0 \quad M = 193,48 \text{ N.m}$$

$$x = 0,563 \quad M = 209,51 \text{ N.m}$$

En la figura 17 se observa el esfuerzo cortante y el momento flector a que es sometido el eje.

Figura 17. Esfuerzo cortante momento flector para el eje



Fuente: *MDSOLIDS Version 1.5, Copyright © 1997 Timothy A. Philpot*

σ = Esfuerzo generado por el peso en el dispositivo.

I = Momento de inercia en el cilindro.

C = Distancia desde el centroide hasta la fibra más externa.

F_s = Factor de seguridad.

r_0 = Radio inicial.

r_1 = Radio final.

$$\sigma_p = 58000 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2} \quad \text{Para barra perforada AISI 1518 equivalente}$$

$$\sigma_p = 399,896 (10^6) \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

$$\sigma = \frac{MC}{I} \quad I = \frac{\pi}{4} r^4 \quad I = \frac{\pi}{4} (r_0^4 - r_1^4)$$

$$r_0 = 0,05$$

$$r_1 = 0,05 - t = 0,05 - 0,005 = 0,045$$

$$\sigma = \frac{209,51(0,05)}{\frac{\pi}{4}(0,05^4 - 0,045^4)}$$

$$\sigma = 6,205 (10^6) \frac{N}{m^2} < \frac{\sigma_p}{F_s}$$

$$\sigma = 12,41 (10^6) \frac{N}{m^2} < \sigma_p$$

$$\sigma \ll \sigma_p$$

3.4.4 Deflexión en el eje

$$M_2 = A_y(0,132 + x) - w_1 \frac{(0,132 + x)^2}{2} - P_1(x) - w_2 \frac{(x^2)}{2}$$

Cambio de límites $0 \leq x \leq 0,695$

$$M_2 = A_y(x) - w_1 \frac{(x)^2}{2} - P_1(x - 0,132) - w_2 \frac{(x - 0,132)^2}{2}$$

$$\int EId_\theta = \int \left(A_y(x) - w_1 \frac{(x)^2}{2} - P_1(x - 0,132) - w_2 \frac{(x - 0,132)^2}{2} \right) dx$$

$$EI\theta = \frac{A_y x^2}{2} - w_1 \frac{x^3}{6} - P_1 \left(\frac{x^2}{2} - 0,132x \right) - w_2 \left(\frac{x^3}{6} - \frac{x^2(0,132)}{2} + (0,132^2)x \right) + C_1$$

$$\int EId_Y = \int \left(\frac{A_y x^2}{2} - w_1 \frac{x^3}{6} - P_1 \left(\frac{x^2}{2} - 0,132x \right) - w_2 \left(\frac{x^3}{6} - \frac{x^2(0,132)}{2} + (0,132^2)x \right) + C_1 \right) dx$$

$$EIY = \frac{A_y x^3}{6} - w_1 \frac{x^4}{24} - P_1 \left(\frac{x^3}{6} - 0,132 \frac{x^2}{2} \right) - w_2 \left(\frac{x^4}{24} - \frac{x^3(0,132)}{6} + (0,132^2) \frac{x^2}{2} \right) + C_1 x + C_2$$

Condiciones de frontera

$$Y = 0 \quad \text{en } X = 0, \quad X = L$$

$$\theta = 0 \quad \text{en } X = 0,695$$

$$0 = \frac{A_y x^2}{2} - w_1 \frac{x^3}{6} - P_1 \left(\frac{x^2}{2} - 0,132x \right) - w_2 \left(\frac{x^3}{6} - \frac{x^2(0,132)}{2} + (0,132^2)x \right) + C_1$$

$$C_2 = 0$$

$$C_1 = -139,49$$

$$EIY = \frac{A_y x^3}{6} - w_1 \frac{x^4}{24} - P_1 \left(\frac{x^3}{6} - 0,132 \frac{x^2}{2} \right) - w_2 \left(\frac{x^4}{24} - \frac{x^3(0,132)}{6} + (0,132^2) \frac{x^2}{2} \right) - 139,49x$$

$$Y_{\text{máximo}} \quad x = 0,695$$

$$Y = - \frac{49,49}{EI}$$

$$I = \frac{\pi}{4} r^4 \quad E = 205,985(10^9) \frac{N}{m^2}$$

$$r_0 = 0,05$$

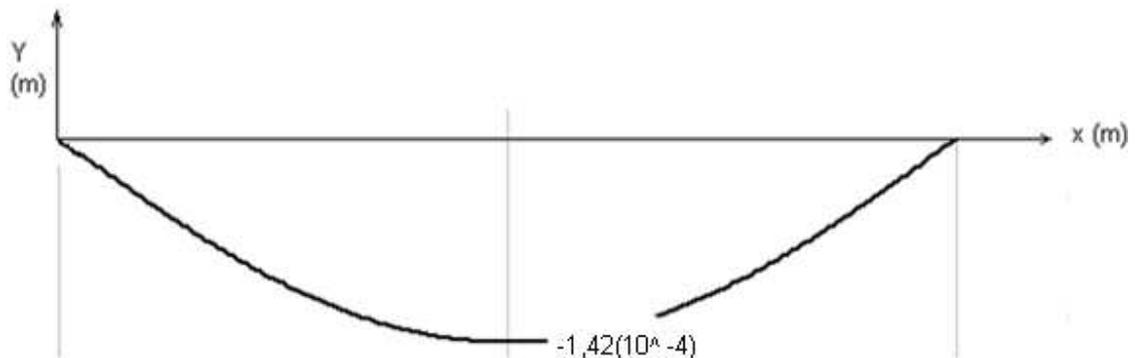
$$r_1 = 0,05 - t = 0,05 - 0,005 = 0,045$$

$$Y = - \frac{49,49}{(205,985(10^9)) \frac{\pi}{4} (0,05^4 - 0,045^4)}$$

$$Y = -1,42 (10^{-4}) \text{ m}$$

La figura 18 hace referencia a la deformación a que es sometido el eje.

Figura 18. Deflexión en el eje



Fuente: *MDSOLIDS Version 1.5, Copyright © 1997 Timothy A. Philpot*

3.5 CÁLCULO DE RODAMIENTOS

De acuerdo a la carga generada en el dispositivo y después de seleccionar el rodamiento respecto al tamaño del eje, su montaje y el dispositivo, se empleó la calculadora de rodamientos del programa *SolidWorks* [10].

En la calculadora fueron seleccionados los rodamientos a emplear para el caso 6010, en ambos lados. Se inserta la carga equivalente (1399 N) y la velocidad con la que debe girar el cilindro (6 r/min). El sistema arrojó la capacidad que puede soportar el rodamiento, la vida en revoluciones y en horas (figura 19).

Se observa mediante los resultados que la carga a la que son sometidos los rodamientos es menor a la que pueden soportar.

Rodamiento 6010

Capacidad máxima = $27403,468278\text{ N}$

Carga equivalente = 1399 N

Carga equivalente \ll Capacidad máxima

Figura 19. Cálculo rodamiento 6010

Confiabledad	
L(10) =	90%

Capacidad	
<input checked="" type="radio"/> Calculada	<input type="radio"/> Introducir capacidad
Calibre	50 mm
Diámetro exterior	80 mm
Nº de bolas	18
Diámetro de bola	9.000000 mm
Capacidad	27403.468278 N

Carga	
Carga equivalente	1399 N

Vida básica	
Vida en revs.	7515.596455 $\times 10^6$ revs.
Velocidad	6 r/min
Vida en horas	20876656.8180 hrs.

Unidades: EE.UU. SI

SKF

Rodamiento rígido de bolas

- 61809
- 16009
- 61909
- 6009
- 6209
- 6309
- 6409
- 61810
- 16010
- 61910
- 6010**

Fuente: *SolidWorks*® Office Premium 2007. UGS Corporation, EE.UU. Copyright © 1995-2006.

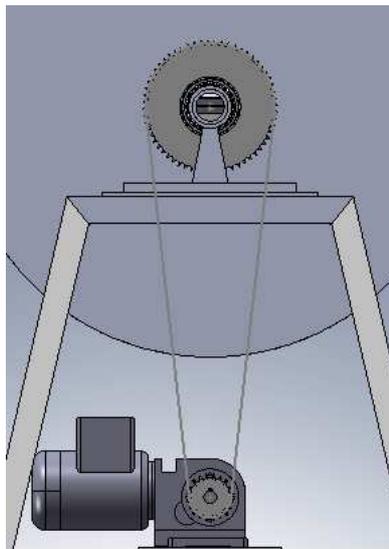
3.6 SELECCIÓN DEL MOTOR REDUCTOR, CADENA Y RUEDAS DENTADAS

Con base en la figura 20 se debe elegir motor reductor y transmisión por cadena. Se estima que las revoluciones del tambor deben ser del orden de 5 a 8 min^{-1} , ya que el objetivo es que los granos solo se mezclen generando una homogenización de los granos en el secado. La revolución no debe ser muy alta pues puede provocar deterioro en el grano.

La velocidad de rotación en el cilindro está basada en modelos de secadoras rotativas tipo Guardiola empleados en países como México, Guatemala y Costa Rica, sitios donde se estima que las secadoras rotativas tipo Guardiola tienen mayor acogida.

Del numeral 3.4 fue tomada como referencia la carga del cilindro y su contenido 2798 N .

Figura 20. Conjunto de transmisión mecánica



Fuente: Autor, realizado en *SolidWorks*® Office Premium 2007. UGS Corporation, EE.UU. Copyright © 1995-2006.

$$W_{\text{conjunto}} = 2798 \text{ N} \quad \text{Ver numeral 3.4}$$

$$F_s = 1,5 \quad \text{Factor de seguridad asumido.}$$

$$W_{\text{conjunto}} = 2798 (1,5) = 4197 \text{ N}$$

Una preselección de reductores comerciales manejan las relaciones de 80:1, 70:1. Se toma inicialmente un dato base de 80:1.

3.6.1 Cadena

La selección de la cadena se determinó por la carga que debe soportar, de acuerdo al catálogo de transmisión y potencia de *SKF* [9].

Referencia: PHC06B

Paso = 9,525 mm

Carga límite de rotura = 9 kN

3.6.2 Ruedas Dentadas

Se tomó como base el paso de la cadena seleccionada en 3.6.1 y mediante la relación 80:1 se determinó que para alcanzar de 5 a 8 min^{-1} en el tambor, la relación de transmisión de la cadena debe ser de 3:1.

- **Rueda conducida**

Referencia PHS 06B – 1A60

Número de dientes = 60 mm

Diámetro primitivo = 182 mm

- **Rueda conductora**

Referencia PHS 06B – 1B20

Número de dientes = 20 mm

Diámetro primitivo = 60,89 mm

3.6.3 Conjunto motor reductor

La relación de transmisión rueda conductora conducida 3:1

$$\tau_{\text{rueda conducida}} = 4197 \left(\frac{0,182}{2} \right) = 381,927 \text{ N.m}$$

$$\tau_{\text{rueda conductora}} = \frac{381,927 (1)}{3} = 127,309 \text{ N.m}$$

Velocidad del cilindro = 6 min^{-1} valor asumido

Velocidad salida reductor = 18 $\text{min}^{-1} = 1,885 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$

$$\dot{w}_{\text{reductor}} = 127,309(1,885) = 239,97 \frac{\text{N.m}}{\text{s}}$$

$Efr = \text{Eficiencia reductor} = 0,65$

$$\dot{w}_{\text{reductor}} = \frac{239,67}{0,65} = 369,2 \frac{\text{N.m}}{\text{s}}$$

Con los anteriores datos se eligió el conjunto motor reductor SK 250-71L/4 (SK 373,1 IEC80) de *NORD*

Características

$$\dot{w} = 0,37 \text{ kW}$$

$$\text{Velocidad salida reductor} = 17 \text{ min}^{-1}$$

$$\text{Velocidad entrada reductor} = 1400 \text{ min}^{-1}$$

$$\tau = 203 \text{ N.m}$$

En el anexo A se pueden observar los dibujos de conjunto y de partes.

La tabla 4 presenta un resumen de la selección de los componentes de medición, control y automatización seleccionados en los numerales correspondientes al capítulo 3.

Tabla 4. Componentes mecánicos

Ítem	Cantidad	Descripción
1	1	Cilindro
2	2	Tapa
3	1	Base
4	1	Ducto aire ventilador secador
5	1	Ducto aire ventilador quemador
6	1	Reductor
7	1	Ventilador
8	2	Rodamiento 6010
9	1	Rueda dentada PHS 06B-1A60
10	1	Rueda dentada PHS 06B-1B20
11	1	Cadena PHC 06B
12	1	Ducto aire 8"
13	1	Ducto aire 3"

Fuente: Autor, realizado en Microsoft ® Office Word 2007

Peso estimado de la estructura= 170 kg

3.7 SIMULACIÓN DEL DISEÑO MECÁNICO

En la simulación se ha utilizado el *software Solidworks* [10], en el análisis del eje y el cilindro.

3.7.1 Análisis de tensiones en el eje

La tabla 5 hace referencia a las propiedades del eje.

Tabla 5. Características del eje

Nº	Nombre de pieza	Material	Masa	Volumen
1	eje	AISI 304	7.86026 kg	0.000982533 m ³

Fuente: *SolidWorks*® Office Premium 2007. UGS Corporation, EE.UU. Copyright © 1995-2006.

La tabla 6 representa las cargas a que es sometido el eje y las restricciones de movimiento necesarias en la simulación.

Tabla 6. Cargas y restricciones del eje

Restricción		
Restricción-2 <eje>	activar 2 Cara(s) fijo.	
Descripción:		
Carga		
Fuerza-2 <eje>	activar 1 Cara(s) aplicar fuerza normal 59.841 N utilizando distribución uniforme	Carga secuencial
Descripción:		
Fuerza-3 <eje>	activar 1 Cara(s) aplicar fuerza normal 44.64 N utilizando distribución uniforme	Carga secuencial
Descripción:		
Cargas/Masa remotas-1 <eje>	Carga (Transferencia directa) activar 1 Cara(s) aplicar fuerza - 1399 N a lo largo de la dirección Y en la ubicación (0.132 m, 0.025 m, 0 m) con Sistema de coordenadas1	Carga secuencial
Descripción:		
Cargas/Masa	Carga (Transferencia directa)	Carga

remotas-2 <eje>	activar 1 Cara(s) aplicar fuerza - 1399 N a lo largo de la dirección Y en la ubicación (1.258 m, 0.025 m, 0 m) con Sistema de coordenadas1	secuencial
------------------------------	---	------------

Fuente: *SolidWorks*® Office Premium 2007. UGS Corporation, EE.UU. Copyright © 1995-2006.

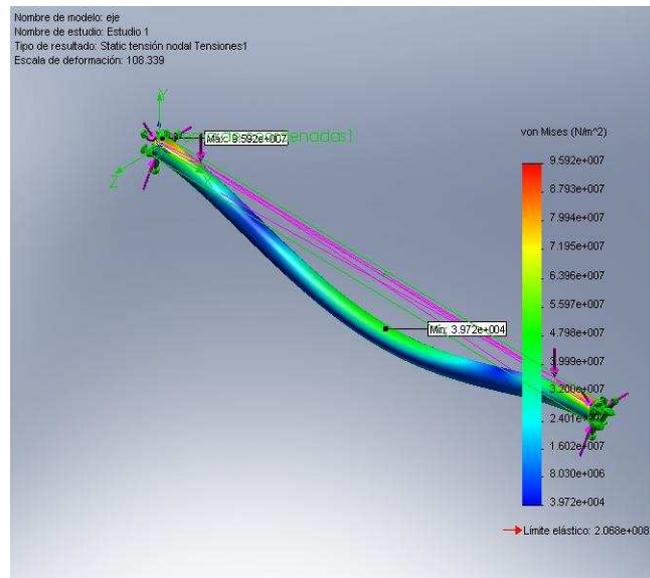
La tabla 7 y las figuras 21, 22 y 23 se observan los resultados de tensiones, deformaciones y desplazamientos en el eje a causa de las cargas a que es sometido.

Tabla 7. Resultados para el eje

Nombre	Tipo	Mín.	Ubicación	Máy.	Ubicación
Tensiones1	VON: Tensión de von Mises	18178.6 N/m ² Nodo: 20964	(695 mm, - 2.18557e- 006 mm, -25 mm)	4.36335e+007 N/m ² Nodo: 17330	(4.96425 mm, 24.7567 mm, -3.47933 mm)
Desplazamientos1	URES: Desplazamientos resultantes	0 m Nodo: 1	(1390 mm, 21.6506 mm, -12.5 mm)	0.00058361 m Nodo: 930	(695 mm, 0 mm, 25 mm)
Deformaciones unitarias1	ESTRN: Deformación unitaria equivalente	2.30671e- 007 Elemento: 2653	(690.036 mm, - 1.94436e- 006 mm, -22.2815 mm)	0.000188263 Elemento: 3847	(4.96429 mm, 23.5897 mm, - 0.652666 mm)

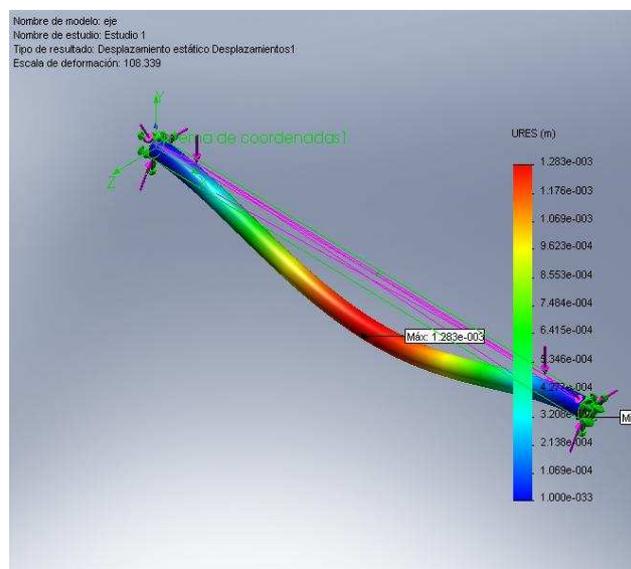
Fuente: *SolidWorks*® Office Premium 2007. UGS Corporation, EE.UU. Copyright © 1995-2006.

Figura 21. Tensiones en el eje



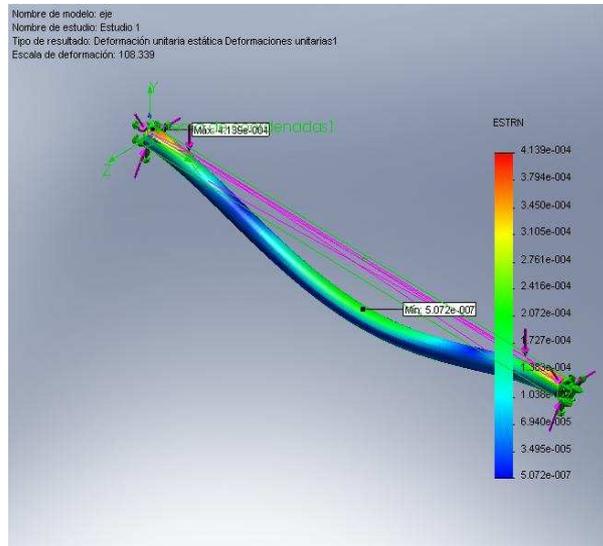
Fuente: Autor, realizado en *SolidWorks*® Office Premium 2007. UGS Corporation, EE.UU. Copyright © 1995-2006.

Figura 22. Desplazamientos en el eje



Fuente: Autor, realizado en *SolidWorks*® Office Premium 2007. UGS Corporation, EE.UU. Copyright © 1995-2006.

Figura 23. Deformaciones en el eje



Fuente: Autor, realizado en *SolidWorks*® Office Premium 2007. UGS Corporation, EE.UU. Copyright © 1995-2006.

En la tabla 8 se tabulan las propiedades de resistencia del material en que está fabricado el eje.

Tabla 8. Propiedades del material (eje)

Nombre de propiedad	Valor	Unidades	Tipo de valor
Módulo elástico	1.9e+011	N/m ²	Constante
Coefficiente de Poisson	0.29	NA	Constante
Módulo cortante	7.5e+010	N/m ²	Constante
Densidad	8000	kg/m ³	Constante
Límite de tracción	5.1702e+008	N/m ²	Constante
Límite elástico	2.0681e+008	N/m ²	Constante
Coefficiente de dilatación térmica	1.8e-005	/Kelvin	Constante
Conductividad térmica	16	W/(m.K)	Constante
Calor específico	500	J/(kg.K)	Constante

Fuente: *SolidWorks*® Office Premium 2007. UGS Corporation, EE.UU. Copyright © 1995-2006.

3.7.2 Análisis de tensiones de cilindro

La tabla 9 hace referencia a las propiedades del cilindro.

Tabla 9. Materiales cilindro

N°	Nombre de pieza	Material	Masa	Volumen
1	cilindro	ASTM A36 Steel	37.5708 kg	0.00478609 m ³

Fuente: *SolidWorks*® Office Premium 2007. UGS Corporation, EE.UU. Copyright © 1995-2006.

La tabla 10 representa las cargas a que es sometido el cilindro y las restricciones de movimiento necesarias en la simulación.

Tabla 10. Cargas y restricciones del cilindro

Restricción		
Restricción-1 <cilindro>	activar 2 Cara(s) fijo.	
Descripción:		
Carga		
Fuerza-1 <cilindro>	activar 1 Cara(s) aplicar fuerza normal 2485 N utilizando distribución uniforme	Carga secuencial
Descripción:		

Fuente: *SolidWorks*® Office Premium 2007. UGS Corporation, EE.UU. Copyright © 1995-2006.

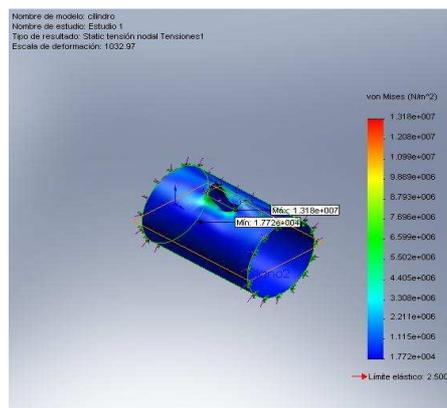
La tabla 11 y las figuras 24, 25 y 26 se observan los resultados de tensiones, deformaciones y desplazamientos en el eje a causa de las cargas a que es sometido.

Tabla 11. Resultados para el cilindro

Nombre	Tipo	Mín.	Ubicación	Máx.	Ubicación
Tensiones1	VON: Tensión de von Mises	8059.13 N/m ² Nodo: 51239	(529.773 mm, 223.286 mm, 272.116 mm)	5.99555e+006 N/m ² Nodo: 25110	(706.579 mm, 339.522 mm, 85 mm)
Desplazamientos1	URES: Desplazamientos resultantes	0 m Nodo: 1	(1110 mm, 4.28626e- 014 mm, 350 mm)	5.39406e-005 m Nodo: 52576	(555 mm, 341.583 mm, 85 mm)
Deformaciones unitarias1	ESTRN: Deformación unitaria equivalente	6.46977e- 008 Elemento: 35694	(563.409 mm, 239.055 mm, -257.624 mm)	1.13931e-005 Elemento: 50752	(401.37 mm, 339.497 mm, -88.8866 mm)

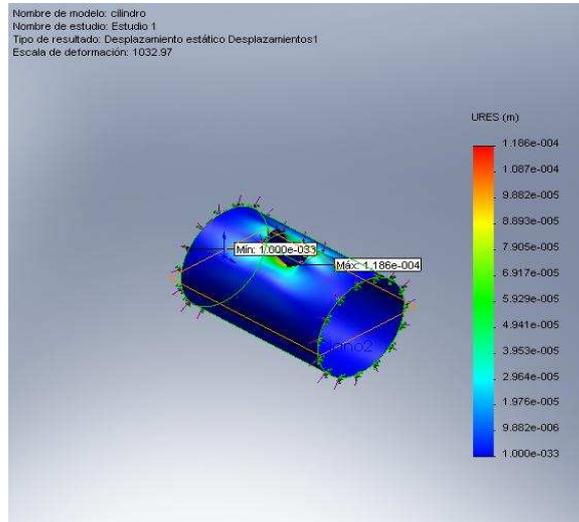
Fuente: SolidWorks ® Office Premium 2007. UGS Corporation, EE.UU. Copyright © 1995-2006.

Figura 24. Tensiones en el cilindro



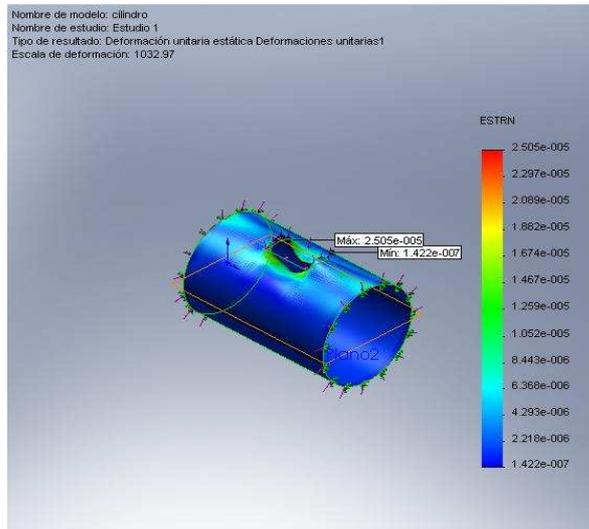
Fuente: Autor, realizado en SolidWorks ® Office Premium 2007. UGS Corporation, EE.UU. Copyright © 1995-2006.

Figura 25. Desplazamientos en el cilindro



Fuente: Autor, realizado en *SolidWorks*® *Office Premium* 2007. *UGS Corporation*, EE.UU. *Copyright* © 1995-2006.

Figura 26. Deformaciones unitarias en el cilindro



Fuente: Autor, realizado en *SolidWorks*® *Office Premium* 2007. *UGS Corporation*, EE.UU. *Copyright* © 1995-2006.

En la tabla 12 se tabulan las propiedades de resistencia del material en que está fabricado el eje.

Tabla 12. Propiedades del material (cilindro)

Nombre de propiedad	Valor	Unidades	Tipo de valor
Módulo elástico	2e+011	N/m ²	Constante
Coefficiente de Poisson	0.26	NA	Constante
Módulo cortante	7.93e+010	N/m ²	Constante
Densidad	7850	kg/m ³	Constante
Límite de tracción	4e+008	N/m ²	Constante
Límite elástico	2.5e+008	N/m ²	Constante

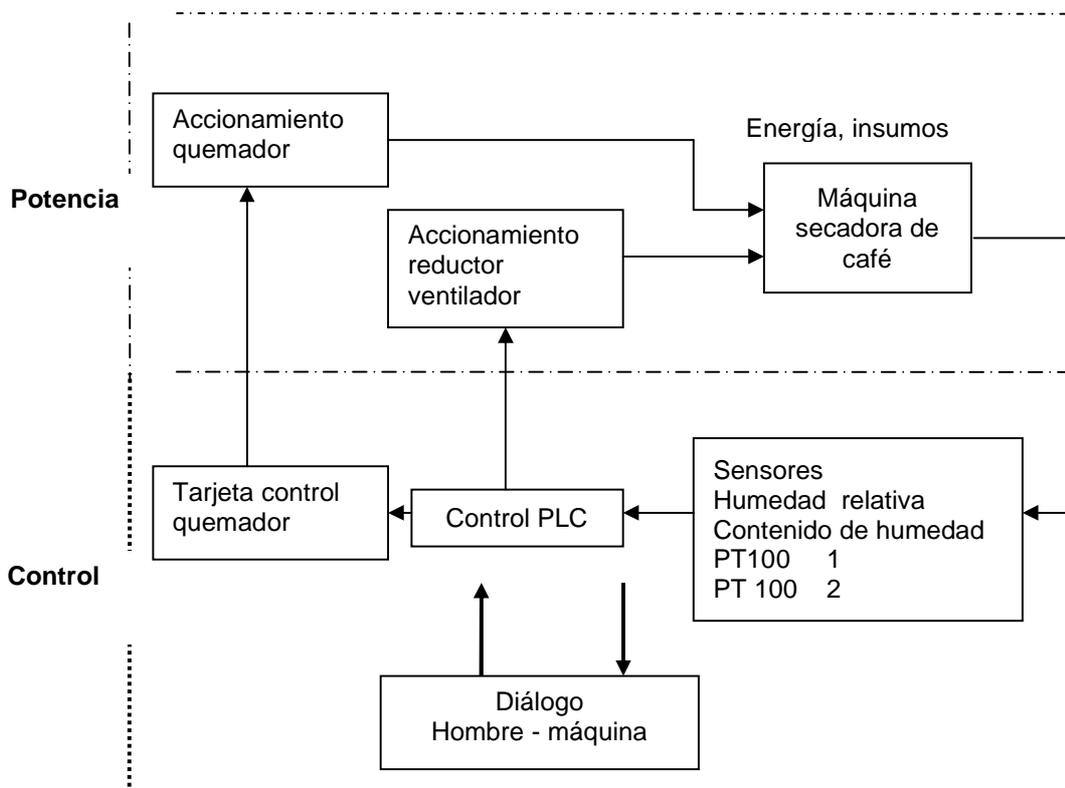
Fuente: *SolidWorks*® Office Premium 2007. UGS Corporation, EE.UU. Copyright © 1995-2006.

4. SELECCIÓN DE COMPONENTES FÍSICOS DE LOS SUBSISTEMAS ELÉCTRICO Y DE INSTRUMENTACIÓN. SIMULACIÓN.

En el presente capítulo se describen los componentes eléctricos y de control del secador electromecánico elegidos. A continuación se hará una breve descripción de la operación de secado.

La figura 27, relaciona el esquema general de un sistema mecatrónico, asociado al secador de café electromecánico en estudio. Por medio de un seccionador es alimentado el circuito general del dispositivo, siendo a partir de este elemento que el circuito se divide en dos subsistemas. El primer subsistema lo conforman motor ventilador, motor reductor y quemador a gas (actuadores). El segundo subsistema es el encargado del control de los actuadores anteriores, es decir, de la tarjeta del quemador y el PLC. Además se encuentra la sensórica (sonda de humedad relativa, Pt 100, etc.).

Figura 27. Esquema operación general del sistema



Fuente: Autor, realizado en Microsoft® Office Word 2007

4.1 SENSORES

Para la correcta operación de secado es necesario medir la humedad relativa, humedad en el grano y la temperatura de secado, ya que a partir de estas tres variables se desarrolla todo el concepto de secado. “El proceso de transferencia de humedad del grano al aire termina cuando la presión de vapor del agua en la superficie del grano se iguala con la presión de vapor del aire, evento que puede presentarse si se dispone del tiempo necesario para desarrollarse el proceso. Depende del contenido de humedad del grano, de la humedad y del aire y en temperatura que es igual a la temperatura del aire del grano”¹⁰

De acuerdo con lo anterior y con base en las investigaciones de Cenicafé, existe un contenido de humedad (% base seca de equilibrio), en función de la humedad relativa y la temperatura °C.

$$M_{eq} = (61,030848\varphi - 108,37141\varphi^2 + 74,461059\varphi^3)e^{(-0,037047\varphi+0,070114\delta^2-0,035177\varphi^3)\theta} \quad 11$$

M_{eq} = Contenido de humedad de equilibrio del café pergamino (%), bs.

φ =Humedad relativa (decimal)

θ =Temperatura del aire, (°C), grados Celsius

4.1.1 Sensor de humedad relativa. Las mediciones de humedad relativa se realizan por medio de sensores basados en psicometría, desplazamiento, resistivos, capacitivos y por absorción de líquido. Se considera que la salida de todos los sensores de humedad por absorción es afectada sensiblemente por la temperatura y la humedad relativa. Por lo cual se hace necesario el utilizar mecanismos de compensación de temperatura en aplicaciones que demanden alto nivel de precisión o un amplio rango de temperaturas.

Los sensores capacitivos (figura 28) son diseñados normalmente con platos paralelos, con electrodos porosos o con filamentos entrelazados en el sustrato, siendo apropiado para ambiente de alta temperatura, ya que el coeficiente de la misma es bajo y el polímero dieléctrico puede soportar altas temperaturas. Respecto al material se destacan condiciones importantes que posibilitan la absorción o eliminación del vapor de agua del medio ambiente con los cambios del nivel de humedad, en el caso del material dieléctrico; y con relación al material sensor, el ser muy delgado posibilita alcanzar cambios significativos en la señal con la humedad, lo cual permite al vapor de agua entrar y salir fácilmente.

¹⁰ ROA, M Gonzalo. Beneficio ecológico del café, Colombia: Cenicafé, 1999. 181

¹¹ ROA, M Gonzalo. Beneficio ecológico del café, Colombia: Cenicafé, 1999. 181

Figura 28. Sensor humedad relativa



Fuente: img.directindustry.es/images_di/photo-g/sensor-de-humedad-relativa-204398.jpg

Humedad relativa (hr). La humedad relativa se comprende como una medida del contenido de humedad del aire, dependiente de la temperatura del momento. De esta manera la humedad relativa expresa la relación entre la humedad absoluta y la cantidad de humedad en condiciones de saturación. Dicha humedad es medida mediante detectores de humedad, los cuales disponen de un rango de medición limitados, indicando desde el 0% como aire seco absoluto, hasta el 100% como el aire saturado ya sea de niebla, nubes o baño de vapor.

De acuerdo con lo anterior, se considera que el aire de bienestar físico está entre el 40% y el 65% h.r, puesto que el aire caliente tiene la característica de absorber más vapor que el aire frío; por lo tanto si el aire se calienta, aumenta la cantidad de vapor que tendría en caso de saturación y como resultado el porcentaje de vapor h.r disminuye, incluso si la cantidad de agua permanece constante.

Vale aclarar que algunos detectores de humedad no solo cumplen con la función de medición de humedad relativa y la temperatura, sino también con el cálculo del punto de rocío y la temperatura del punto de rocío. Esta última es definida como la temperatura en la cual el contenido de vapor en el aire es el máximo, 100% de humedad relativa.¹²

¹² <http://www.pce-iberica.es/instrumentos-de-medida/metros/detectores-humedad.htm>

4.1.2 Sensor contenido de humedad. El sensor de contenido de humedad está basado en un modelo de tipo capacitivo (figura 29), este método dieléctrico posibilita la medición en superficies continuas o pavimentos con suelo radiante. Para llevar a cabo la medición, es necesario colocar el medidor sobre la superficie del material que se desea medir; de acuerdo con ello los valores más elevados de humedad generan un aumento de la conductividad eléctrica y un aumento de la constante dieléctrica. Según el material dieléctrico varía la capacidad del condensador, de este modo si se encuentra en el campo de dispersión material con un contenido superior de humedad, se reduce esta en una constante dieléctrica. Por su parte la capacidad del condensador también varía y el medidor lo convierte indicándolo como peso en porcentaje.

El sensor de contenido de humedad para el proceso en el secador electromecánico se basó en el modelo desarrollado en el trabajo de grado denominado “Diseño y construcción de un sistema para la medición de contenido de humedad en granos”.¹³

Figura 29. Sensor contenido de humedad



Fuente: www.instrumentacion.com.mx/HTML/HY2.htm

¹³ PÉREZ C, Wilson. Diseño y construcción de un sistema para la medición de contenido de humedad en granos. Trabajo de grado Ingeniero en Mecatrónica. Pereira: Universidad tecnológica de Pereira, 2010. 34. p

4.1.3 PT100. El sensor PT 100 (figura 30), es considerado un detector de temperatura que basa su funcionamiento en la variación de la resistencia a cambios de temperatura en el medio, es decir, con base en la variación de la resistencia de un conductor con la temperatura. Los materiales empleados para la construcción de sensores RTD suelen ser conductores tales como el cobre, el níquel o el platino; los cuales poseen un coeficiente de temperatura de resistencia que a su vez determina la variación de la misma en el conductor por grado que cambie su temperatura. Para representación de dicho proceso se utiliza un símbolo como indicador de la variación lineal con coeficiente de temperatura positivo.¹⁴

Figura 30. Sensor temperatura



Fuente: www.jaffal.com/bilder/PT100

4.2 FUNCIONAMIENTO ELÉCTRICO DEL SECADOR

Para ingresar las señales de temperatura y las humedades, es necesario emplear transmisores de corriente que conviertan las señales enviadas por los sensores en una señal análoga de 4 a 20mA o en su defecto, con la ayuda de una resistencia de 250 Ω en una señal de 1 a 5V. Estas señales ya pueden ser percibidas por el PLC para la aplicación del control.

El control se encargará de accionar relés que a su vez permiten la puesta en marcha tanto del quemador como de los motores.

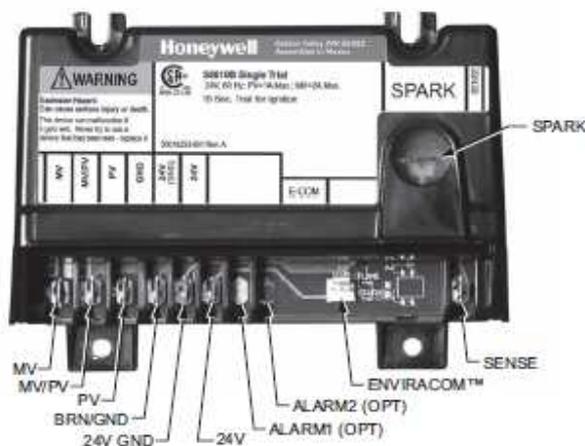
Después de energizar el circuito y accionar el interruptor del quemador, se espera que el PLC energice la bobina kmv (figura 36) encargada de cerrar el contacto normalmente abierto asociado a este relé, que a su vez acciona el contactor kv (figura 35); con ello se activa el ventilador. De igual forma ocurre con el motor del ventilador, para este caso la secuencia es kmr, kr.

¹⁴ www.ingecozs.com/pt100.pdf

Utilizando un elemento de seguridad como el presóstato, se espera que este detecte el flujo de aire y con ello active kpre; de este modo ha sido alimentada la tarjeta de control del quemador (figura 31). La tarjeta es la encargada de controlar las electroválvulas de gas principal (figura 32) y gas piloto (figura 33) por medio de un contacto kg1, comandado por el relé, activado por el PLC dentro del ciclo de temperatura. Dicha temperatura es medida por la PT100 (1). En caso de falla en PT100 (1), PT100 (2) toma el valor de temperatura y energiza kal indicando fallo por alta temperatura.

De acuerdo con la ecuación anteriormente descrita en el numeral 4.1 (M_{eq}), el proceso de secado debe finalizar cuando la lectura en el sensor de humedad del grano sea igual o menor al resultado de dicha ecuación, justo en ese instante se activa kf, generando activación de aviso al operador de que el secado ha terminado.

Figura 31. Módulo de control quemador



Fuente: www.cyb-tec.com/S8600_2010.pdf

El módulo de control quemador es el S8670D

Alimentación: 24 VAC

Salidas: 24 VAC

Pv válvula gas principal

Mv válvula gas piloto

Mv/Pv alimentación común para ambas válvulas

Figura 32. Válvula gas principal



Fuente: www.shopping.com/honeywell-gas-valve-vr8104a

La válvula de gas se eligió de acuerdo al flujo másico de combustible necesario para la operación.

$$\dot{m}_{\text{gas}} = 4,623 \times 10^{-4} \text{ kg/s} \text{ Valor tomado de la sección 3.1.2}$$

$$\rho_{\text{gas}} = 0,753 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$\dot{V} = 2,210 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ Al comparar el resultado con los valores de la tabla 13 se tiene una conexión de 1/2" x 1/2" entra y salida de la válvula, para el modelo VR8104.

Tabla 13. Capacidad válvula de gas

Model	Size Inlet-Outlet (in.)	AGA Certified Capacity for Natural Gas		AGA Certified Minimum Regulation for Natural Gas		AGA Certified Maximum Regulation for Natural Gas	
		ft ³ /hr	m ³ /hr	ft ³ /hr	m ³ /hr	ft ³ /hr	m ³ /hr
VR8104	1/2 x 1/2	85	2.3	10 ^d	0.4	120	3.4
VR8204		150	4.2	20 ^e	0.6	200	5.7
VR8304 ^{b,c}		240	6.8	30 ^f	0.8	340	9.6
VR8304 ^{b,c}	1/2 x 3/4	270	7.6			370	1.05
VR8304 ^{b,c}	3/4 x 3/4	300	8.5			415	11.8

Fuente: www.absolutaire.com/docs/component_docs/indexed/290.pdf

Figura 33. Válvula gas piloto

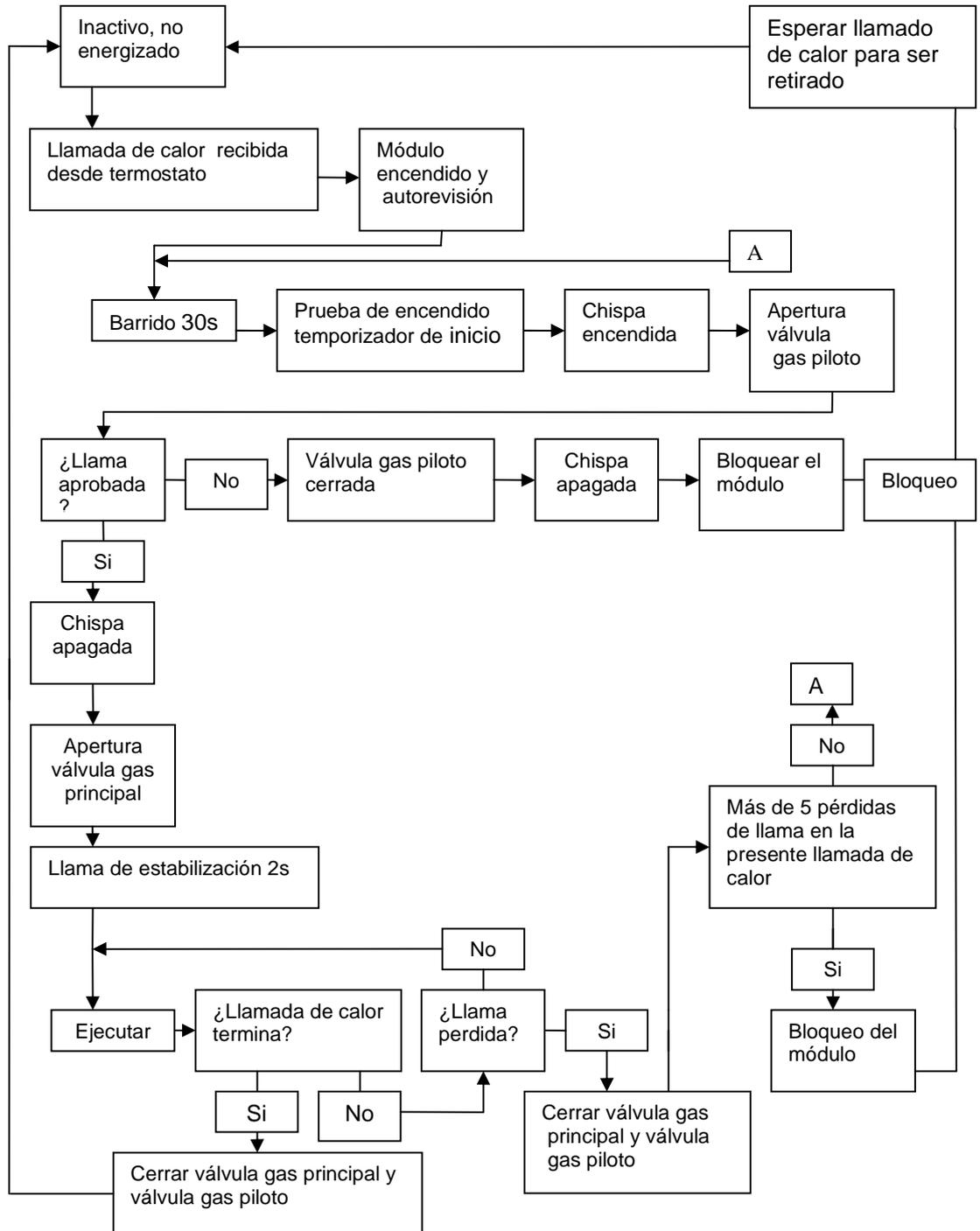


Fuente: www.ascovalve.com/Common/PDFFiles/Product/8262_GasR2.pdf

Válvula gas piloto
ASCO Red Hat II
8262H077

La operación de control de la tarjeta del quemador puede ser observada en la figura 34.

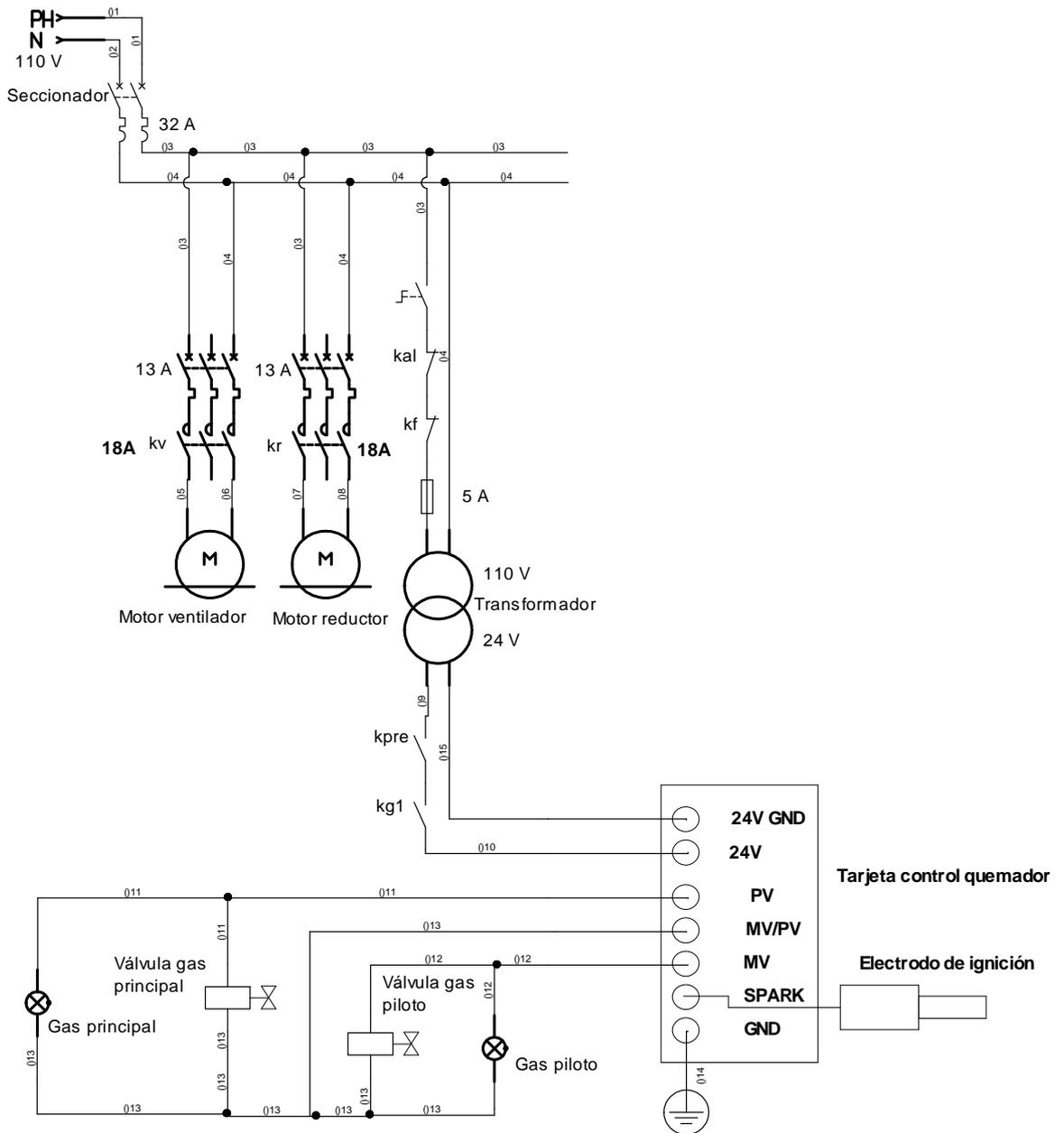
Figura 34. Operación tarjeta de control quemador



Fuente: www.cyb-tec.com/S8600.pdf

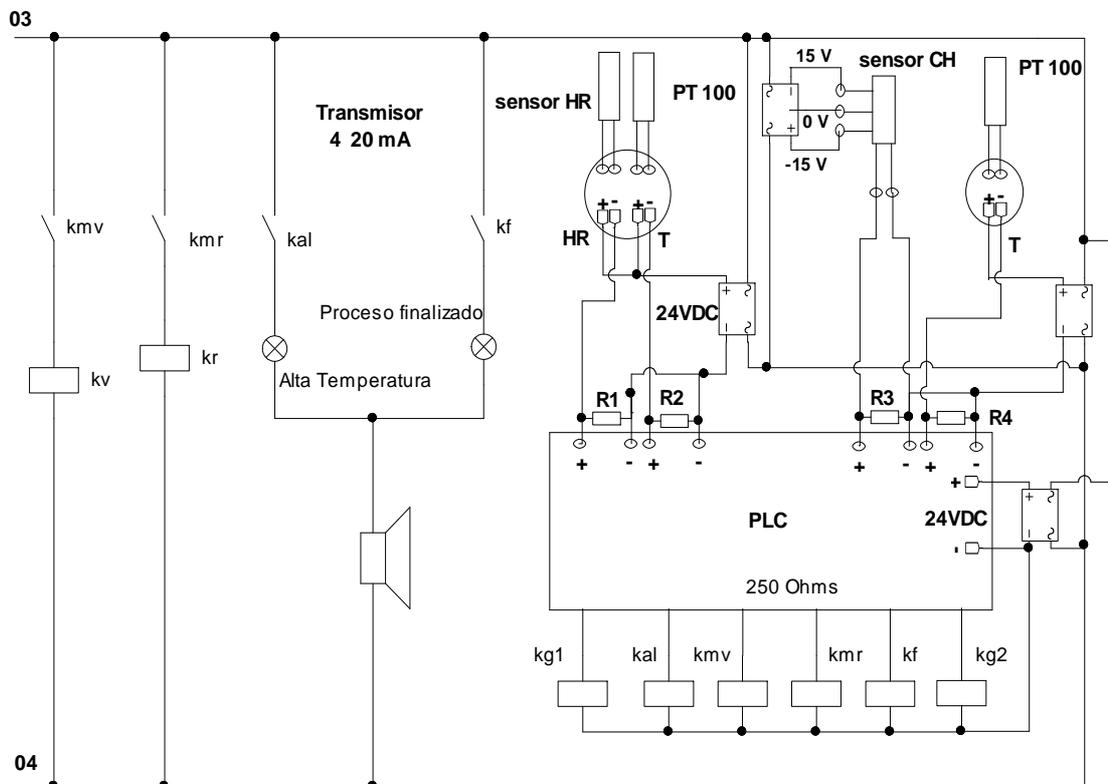
Las figuras 35 y 36 representan el diagrama de conexiones eléctricas del secador de café.

Figura 35. Diagrama circuito eléctrico (control y potencia) parte 1



Fuente: Autor, realizado en *Automation Studio 5.6*, Canadá. Copyright © *Famic Technologies Inc.* 1996-2008.

Figura 36. Diagrama circuito eléctrico (control y potencia), parte 2



Fuente: Autor, realizado en *Automation Studio 5.6*, Canadá. Copyright © *Famic Technologies Inc.* 1996-2008.

4.3 SIMULACIÓN DE LAS SEÑALES CON EL MÉTODO *GRAF CET*

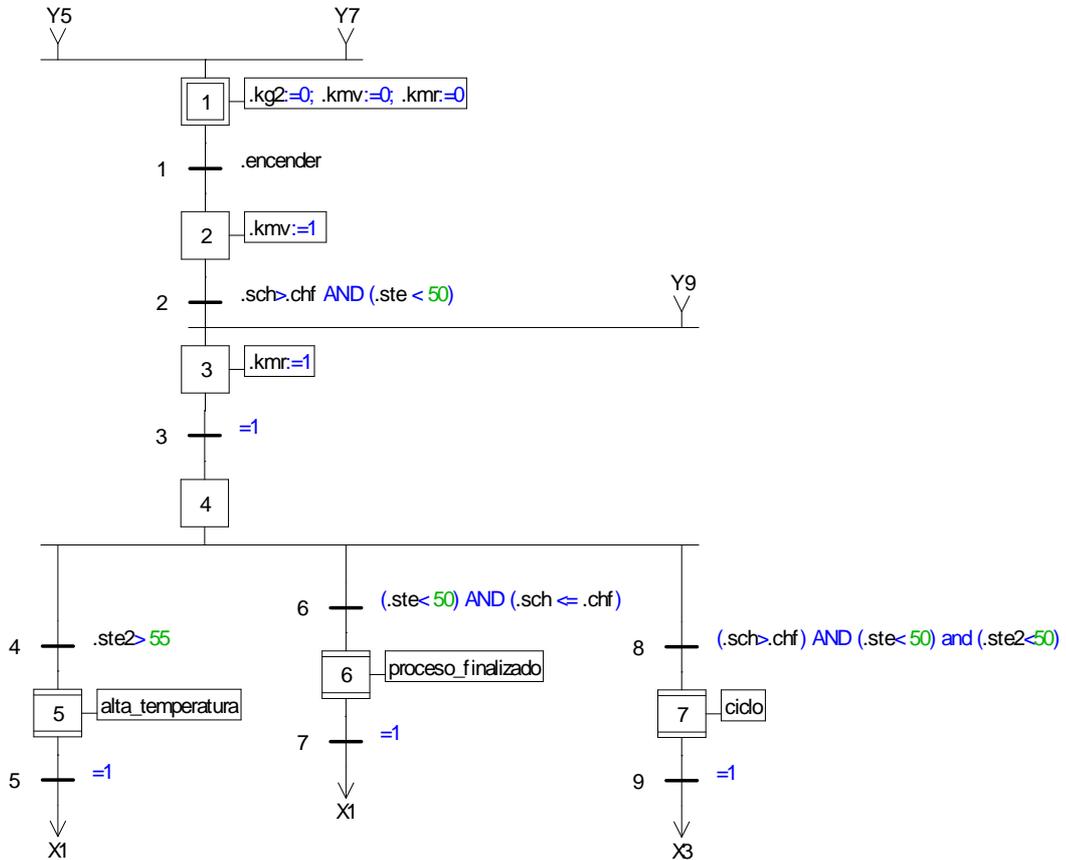
Para la simulación del sistema de control de secado se ha empleado el *software Automation Studio 5.6* [1] versión estudiantil, por ser previamente conocida.

Dentro del contexto se espera tener cuatro señales análogas, para la simulación de estas fué empleado el generador de variables.

Se creó un *grafcet* general (figura 37) conformado a su vez por tres macroetapas.

En la etapa 1 se da inicio a toda la operación. A continuación se espera la señal de encender, la cual habilita la puesta en marcha del ventilador; posteriormente para permitir la acción del reductor, es necesario que se cumplan dos condiciones, la primera de ellas es que el contenido de humedad en el grano debe ser mayor al contenido de humedad final calculado en la ecuación y en una segunda instancia la temperatura debe ser menor a 50 °C.

Figura 37. Grafcet general



Fuente: Autor, realizado en *Automation Studio 5.6*, Canadá. Copyright © *Famic Technologies Inc.* 1996-2008.

ST1

.sch := 1-1WH2.H *10

ST2

.shre := 1-1WH3.hr /10

ST3

.ste := 1-1WH1.tem *10

ST4

.op :=(-0.037047*(.shre)+0.070114*(.shre**2)-0.035177*(shre**3))*ste

ST5

.eu:=(.op **0)+ .op +((.op **2)/2)+((.op **3)/6)+((.op **4)/24)

ST6

.chf := (61.030848*.shre -108.37141*(.shre **2)+74.461059*(.shre **3))*eu

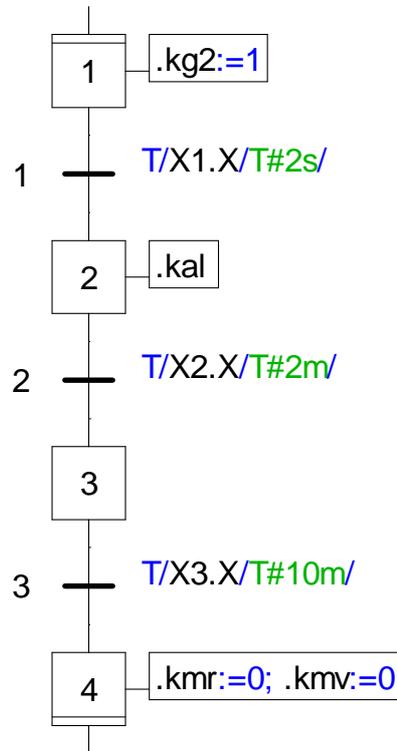
ST7

.ste2 := 1-1WH4.tem2 *10

Después de ejecutarse la etapa 3 el *grafcet* se divide por medio de una función *or* en tres posibilidades: alta temperatura, finalizar y ciclo. A continuación se amplía la descripción de cada una de estas etapas.

4.3.1 Macroetapa alta temperatura. En el caso de que la temperatura detectada en el sensor 2 alcance valores mayores a 55 °C, el café puede empezar a presentar problemas de sobrecalentamiento, siendo pertinente tomar acciones correctivas. Es necesario apagar el quemador (kg2) e inmediatamente generar la alarma por sobrecalentamiento (kal); el ventilador (kv) y el reductor (kr) continúan encendidos alrededor de 10 minutos más, con el objetivo de evacuar el exceso de temperatura del cilindro (Figura 38).

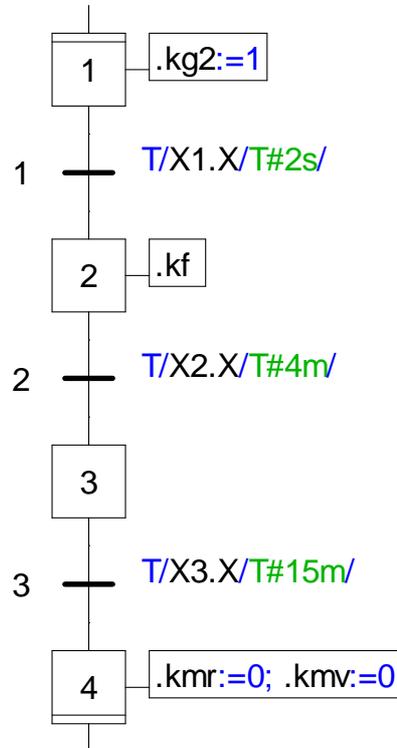
Figura 38. Macroetapa alta temperatura



Fuente: Autor, realizado en *Automation Studio 5.6*, Canadá. Copyright © *Famic Technologies Inc.* 1996-2008.

4.3.2 Macroetapa finalizar. El proceso de secado finaliza en el momento en que el sensor de contenido de humedad detecte que el valor de esta sea igual o menor al contenido de humedad de equilibrio y la temperatura menor a 50°C, valor indicado en el resultado de la ecuación. De acuerdo con ello, las acciones a seguir en primer medida es apagar el quemador energizado el relé (kg2) e inmediatamente generar la alarma de proceso terminado (kf). El ventilador (kv) y el reductor (kr) continúan encendidos alrededor de 15 minutos más con el objetivo de evacuar el exceso de temperatura del cilindro (Figura 39).

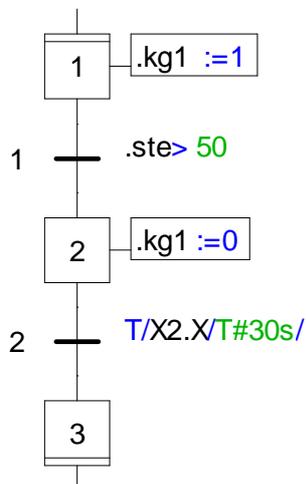
Figura 39. Macroetapa finalizar



Fuente: Autor, realizado en *Automation Studio 5.6*, Canadá. Copyright © *Famic Technologies Inc.* 1996-2008.

4.3.3 Macroetapa ciclo. En esta macro etapa el ciclo (figura 40) de secado se ejecuta constantemente. En el instante en que la temperatura es menor a 50°C, se activa el quemador (kg1) suministrando el calor necesario al proceso. El quemador es desactivado (kg1) cuando la temperatura sobrepasa los 50 °C, posteriormente se espera un tiempo prudente de 30s para volver a capturar las señales de temperatura y contenido de humedad en el *grafcet* general; esto es posible al emplear la convergencia en *or*.

Figura 40. Macroetapa ciclo de temperatura



Fuente: Autor, realizado en *Automation Studio* 5.6, Canadá. Copyright © *Famic Technologies Inc.* 1996-2008.

La simulación realizada en el software *Automation Studio* se puede observar en el anexo B.

4.4 SELECCIÓN DEL CONTROLADOR

Entre las diversas posibilidades (FPGA, microcontrolador, *Software* virtual y tarjeta de adquisición de datos, etc.) para el control de variables y elementos de potencia se ha elegido un **PLC** (*Programmable Logic Controller* en sus siglas en inglés, figura 41) o Controlador de lógica programable, por las siguientes razones:

- El utilizar *Software* de instrumentación virtual requiere de un ordenador y tarjeta de adquisición de datos, los cuales por un lado son costosos, y por otro lado no son aptos para el ambiente donde podría laborar el equipo.
- En el caso de los microcontroladores, no son confiables para aplicaciones en ambientes rurales (líneas no compensadas, elevado ruido eléctrico, etc.).
- Las tarjetas FPGA son demasiado robustas para esta aplicación y requieren *hardware* y *software* adicional para su programación y asignación de datos.

- Los PLC son dispositivos electrónicos ampliamente utilizados en Automatización Industrial. Los **PLC** no sólo controlan la lógica de funcionamiento de máquinas, plantas y procesos industriales, sino que también pueden realizar operaciones aritméticas, manejar señales analógicas para realizar estrategias de control, tales como controladores, proporcional integral derivativo (PID). Por otro lado, se consiguen de diversas capacidades (entradas/salidas) y en diversas gamas de calidad y costos.

Figura 41. Control lógico programable



Fuente: www.electricasbogota.com/popsp/74270.htm

El PLC elegido fue el siguiente:

Marca: Array-BAW

Modelo/serie: AF20MRD

Entradas: 6 Análogas 0- 10VDC

Salidas: 8

La tabla 14 presenta un resumen de la selección de los componentes de medición, control y automatización seleccionados en los numerales correspondientes al capítulo 4.

Tabla 14. Componentes de automatización, sensórica y eléctricos

Item	Cantidad	Descripción
1	1	Ventilador
2	1	PLC
3	1	Motor del reductor
4	1	Módulo S8670D
5	2	Contactador LC1 D18 F7
6	6	Relé 24VDC
7	1	Transformador 110 a 24 VAC
8	1	Fuente SP024
9	2	Disyuntor
10	2	Indicador luminoso
11	1	Alarma
12	1	Seccionador C60 C32A
13	1	Electroválvula vr8104
14	1	Interruptor 2 posiciones

Fuente: Autor, realizado en Microsoft ® Office Word 2007

5. PRESUPUESTO

DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL O SERVICIO	Valor/ UNIDAD	CANTIDAD	TOTAL
Lamina Cold Rolled Calibre 14 4'x8'	\$50.000	1	\$50.000
Lámina HR 5/16" (diámetro 352mm x 8mm)	\$25000	2	\$50.000
Canal en C ANSI 3" x 1 ½ "x 6m	\$79.500	1	\$79.500
Barra perforada 1518 (50x 40 mm x 1,4m)	\$68.228	1	\$68.228
PLC AF20MRD	\$400.000	1	\$400.000
Módulo quemador S8670D	\$297.414	1	\$297.414
Válvula para gas principal vr8104	\$282.759	1	\$282.759
Contactador LC1 D18 F7	\$116.324	2	\$232.648
Disyuntor LRD16 9 – 13 A	\$112.350	2	\$224.700
Relé 24 VDC	\$29.810	6	\$178.860
Ventilador completo	\$ 400.000	1	\$ 400.000
Motor reductor	\$800.000	1	\$800.000
Transmisor temperatura con sensor	\$260.000	1	\$260.000
Sensor contenido de humedad	\$200.000	1	\$200.000
Transmisor temperatura y humedad relativa	\$320.00	1	\$320.00
Seccionador	\$35.000	1	\$35.000
Alarma	\$20.000	1	\$20.000
Indicador luminoso	\$30.800	2	\$61.600
Interruptor 2 posiciones	\$32.240	1	\$32.240
Válvula para gas piloto Red hat II	\$238.000	1	\$238.000
Electrodo de ignición GN8601	\$270000	1	\$270.000
Rodamiento 6010	\$20.000	2	\$40.000
Fuente SP024 DC	\$73.000	1	\$73.000
Rueda dentada PHS 06B-1A60	\$152.000	1	\$152.000
Cadena PHC 06B	\$40.000	1	\$40.000
PHS 06B-1B20	\$51.000	1	\$51.000
Obra de mano fabricación	\$1000.000	Global	\$1.000.000
		Costo total	\$5.856.949

5.1 COSTO ENERGÉTICO

De los numerales 3.2 y 3.6.3 se tiene la potencia para el motor ventilador y para el motor reductor.

$$\dot{w}_{\text{total}} = 373 + 373 = 746 \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{s}} = 0,746 \text{ kW}$$

La operación de secado tiene un tiempo estimado de 18 h

1kWh = \$470 Tomado de recibo domiciliario de la CHEC para estrato 3, monofásico.

$$\text{Costo energía eléctrica} = 0,746 \text{ kW}(18\text{h}) \left(\frac{\$470}{1\text{kWh}} \right) = \$6311,16$$

$m_{\text{gas}} = 29,956\text{kg}$ Ver numeral 3.1.2 (para secar un bachado)

Para éste caso específico, se denomina bachado a la operación completa de secado con una carga de café de 200 kg.

$$\rho_{\text{gas}} = 0,753 \text{ kg/m}^3 \quad 15$$

$$V = \frac{29,956}{0,753} = 39,78 \text{ m}^3 \text{ Para secar un bachado}$$

$1\text{m}^3 \text{ gas} = \500 Tomado recibo gas natural domiciliario.

$$\text{Costo gas} = 39,78\text{m}^3 \left(\frac{\$500}{1\text{m}^3} \right) = \$19890/\text{bachado}$$

Costo secado = \$6311,16 + \$19890 = \$26201,16/bachado

$$\text{Precio venta caficultor Café húmedo} = \frac{\$60\,000}{@_{\text{café}}} = \frac{\$4800}{\text{kg}}$$

$$\text{Precio venta caficultor Café seco} = \frac{\$76\,000}{@_{\text{café}}} = \frac{\$6080}{\text{kg}}$$

$$\text{Ganancia bruta} = \text{Café seco} - \text{Café húmedo} = \frac{\$1280}{\text{kg}}$$

Para 200kg de café seco se tiene:

$$\text{Ganancia bruta} = \$256000$$

¹⁵www.fisicanet.com.ar/energias/gases

Ganancia neta= Ganancia bruta- Costo secado=\$229798,84/bachado

Costo total del equipo=\$5 896 949 Ver numeral 5

Retorno de la inversión= $\left(\frac{\text{bachado}}{\$229798,84}\right) (\$5896949) = 25,66$ bachados

De acuerdo con lo anterior se deduce que es necesario secar 5132 kg para obtener el retorno de la inversión.

Una finca pequeña de la región aproximadamente equivale a 5 cuadras, se estima que estas generen 500 @ ó 6250 kg en un año de producción.

% retorno de la inversión= $\left(\frac{5132}{6250}\right) 100 = 82,11\%$ de la producción anual

La inversión tendrá una tasa interna de retorno cuando la producción alcance el 82% del total de un año.

En la revisión efectuada de modelos ya existentes, se realizó una comparación con un fabricante "Metalcol" (Metalmecánicas de Colombia). Se halló una serie de particularidades respecto a la construcción y costo del equipo. Se identificaron ventajas y desventajas. Entre las ventajas de la secadora rotativa ofrecida por este fabricante, se encuentran diversos módulos para la disposición del grano; son equipos con un tiempo significativo de reconocimiento en el mercado.

Así mismo se encuentran una serie de desventajas del modelo de Metalcol frente al modelo de secadora rotativa diseñado en este trabajo, entre ellas, falta de control de variables, pues si bien Metalcol presenta un control de temperatura no posee un control de variables referidas a la humedad relativa y al contenido de humedad en el grano, además de un segundo control de temperatura; considerándose elementos esenciales para obtener un secado de optima calidad. De igual manera, hay falta en su diseño de una alarma por alta temperatura y alarma de finalización del proceso, además de que la secadora requiere de una obra civil en el lugar donde se instale.

6. CONCLUSIONES

Una vez concluido el presente trabajo se llegó a las siguientes conclusiones:

- Se efectuó una revisión bibliográfica de modelos industriales y artesanales existentes para hornos de secado de café.
- Se planteó un modelo de secador rotativo utilizable por pequeños agricultores y se realizó un diseño previo.
- Se determinaron y seleccionaron los componentes según el diseño realizado.
- Se definieron los instrumentos de medición y de procesamiento de información, se definió la comunicación e interacción de las señales presentes en el secador.
- Se simuló la operación del automatismo en un CAE.
- Se efectuaron ajustes finales al diseño
- Se elaboró un presupuesto de fabricación y de operación.

Una vez agotados los pasos anteriores se concluye que se pudo diseñar y simular la automatización de la operación de un secador electromecánico de café, para mejorar el tiempo de secado y humedad final.

Otras conclusiones:

- Mediante el trabajo de diseño y simulación de la automatización de una secadora rotativa, se efectuó articulación entre el medio social y la aplicación de temáticas de la Ingeniería en Mecatrónica.

- Se desarrolló el diseño y simulación de la automatización de la operación de un secador electromecánico de café, de acuerdo al caudal generado por el ventilador; en los cálculos efectuados se estima posibilidad de mejora en el tiempo de secado.

- El control de temperatura y el contenido de humedad en el grano, fue simulado en el *Software Automation 5.6* dando como resultado una operación controlada del proceso de secado, con protección respecto al exceso de temperatura. Al finalizar el proceso, se genera una comparación del valor del contenido de

humedad esperado respecto al real, para posteriormente dar por terminado el proceso mediante una señal activada desde el *PLC*.

- La implementación de un diseño electromecánico en una secadora rotativa, permitió la adaptación de nuevos elementos de base tecnológica, lo cual permitió la corrección de inestabilidades de las variables involucradas.

- Se dejó disponible una metodología bastante completa acerca del diseño de un secador rotativo electromecánico para café, la cual incluye tanto parte mecánica, como eléctrica como de instrumentación.

7. RECOMENDACIONES

Resulta de utilidad la constante problematización respecto a los mecanismos de secado de café, ya que la implementación de mejoras en los mismos se perciben como fuente de solución de problemas específicos que se presentan en la agricultura regional; beneficiando a medianos productores, al aumentar el control de la humedad presente en el grano y la disminución del tiempo de secado, reflejándose directamente en el ingreso del caficultor.

Se considera de importancia el estudio de equipos existentes, con el objetivo de incursionar en el campo constructivo experimental, posibilitando el establecer si los componentes empleados en su construcción son los adecuados.

Se recomienda efectuar una comparación entre el diseño de secadora rotativa descrito en este trabajo con los modelos ya existentes, con el objetivo de apropiarse de los apartes útiles para la implementación de mejoras en las secadoras tradicionales.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] *Automation Studio 5.6*, Canadá. Copyright © Famic Technologies Inc. 1996-2008.
- [2] ÇENGEL, A Yunus. *Termodinámica*. Traducido por González Virgilio. 6 ed. México: MacGraw Hill, 2002. ISBN 978-0-07-352921-9.
- [3] CRANE. *Flujo de fluidos en accesorios y tuberías*. México: MacGraw Hill, 1989. 532.54 F646.
- [4] NGECO, Sensor de temperatura. www.ingecozs.com/pt100.pdf
- [5] OROZCO, H Carlos Alberto, BEDOYA L Fernando. *Scientia et Technica* Año XIII, No 35, Agosto de 2007. Universidad Tecnológica de Pereira. ISSN 0122-1701
- [6] PCE, Detectores de humedad. www.pce-iberica.es/instrumentos-de-medida/metros/detectores-humedad.htm
- [7] PÉREZ C, Wilson. *Diseño y construcción de un sistema para la medición de contenido de humedad en granos*. Trabajo de grado Ingeniero en Mecatrónica: Universidad tecnológica de Pereira, 2010.
- [8] ROA, M Gonzalo. *Beneficio ecológico del café*, Colombia: Cenicafé, 1999.
- [9] SKF. *Manual de transmisión y potencia*. Hungría. 2006. 6219 ES.
- [10] *SolidWorks* ® Office Premium 2007. UGS Corporation, EE.UU. Copyright © 1995-2006.