

**DISEÑO DE UN SISTEMA AUTOMATIZADO PARA SELECCIÓN DE  
CAFÉ POR MEDIO DE FLOTES**

**HAROLD CORTES ORDOÑEZ  
GABRIEL ENRRIQUE MARTINEZ LLANO**

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DEL CARIBE  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
INGENIERÍA MECATRONICA  
BARRANQUILLA  
2015**

**DISEÑO DE UN SISTEMA AUTOMATIZADO PARA SELECCIÓN DE  
CAFÉ POR MEDIO DE FLOTES**

**HAROLD CORTES ORDOÑEZ  
GABRIEL ENRRIQUE MARTINEZ LLANO**

**Proyecto de grado**

**Director  
KELVIN DE JESUS BELEÑO SAENZ  
Ingeniero electrónico**

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DEL CARIBE  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
INGENIERÍA MECATRONICA  
BARRANQUILLA  
2015**

Nota de aceptación

---

---

---

---

---

Firma  
Nombre:  
Presidente del jurado

---

Firma  
Nombre:  
Jurado

---

Firma  
Nombre:  
Jurado

Barranquilla, Enero 19 de 2015

## AGRADECIMIENTOS

Yo, Harold Cortes Ordoñez, quiero agradecerle a mi familia por confiar en mi en esta decisión de prepararme y terminar de educarme en una ciudad lejos de casa.

Le doy gracias a mi padre, por brindarme esa compañía incondicional y que sin el, estos logros no serian un hecho.

A mi madre, Adela Ordoñez Torrez(QEPD), que desde el cielo me guía y bendice mis metas logradas.

A mis hermanos Orlando y Walter, por escucharme en momentos difíciles vividos en la distancia y por brindarme esa amistad que desde pequeño me han dado.

A la sra Luz Mary Ramirez, le agradezco por brindarme su amistad, su guía y brindarme consejos a partir de su experiencia.

Yo, Gabriel Martínez LLano, Agradezco a toda mi familia por el apoyo incondicional recibido durante estos cinco años de mi carrera. Sin ellos, esto no sería posible.

Agradezco a mi padre por sus consejos que alimentan mi visión y por su inmensurable esfuerzo en ser la mejor versión de él mismo para nuestra familia.

Agradezco a mi madre por velar por mi bienestar a cada instante y enseñarme historias que marcan mi vida.

Agradezco a mi hermana porque con su forma de ser y ver la vida he visto que todavía tengo mucho que aprender.

Nosotros, Harold y Gabriel, al ingeniero Kelvin Beleño Saenz, darle gracias por estar pendiente de nuestros progresos y brindarnos su experiencia y sabiduría para engruesar nuestros conocimiento.

También, queremos agradecerle a nuestros compañeros de curso y futuros colegas por los gratos momentos que pasamos durante estos cinco años. Nunca serán olvidados.

## CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN . . . . .	9
1. Planteamiento del problema . . . . .	10
1.1. Identificación y descripción del problema . . . . .	10
1.2. Sistematización del problema . . . . .	10
2. Justificación . . . . .	11
2.1. Pertenencia institucional . . . . .	11
2.2. Pertenencia social . . . . .	11
2.3. Aportes a la educación . . . . .	12
3. Objetivos . . . . .	13
3.1. Objetivo General . . . . .	13
3.2. Objetivos específicos . . . . .	13
4. Marco Referencial . . . . .	14
4.1. Marco Teórico . . . . .	14
4.1.1. Mecánica de fluidos . . . . .	14
4.1.2. Ecuaciones de dinámica de fluidos . . . . .	15
4.1.3. Elementos fundamentales de un sistema . . . . .	16

4.1.4.	Tuberías . . . . .	18
4.1.5.	Perdida de carga . . . . .	19
4.1.6.	Sistemas de control . . . . .	20
4.1.7.	Relevador eléctrico . . . . .	21
4.1.8.	Puente H . . . . .	21
4.1.9.	Cableado . . . . .	22
4.1.10.	Selección de café: Método de flote . . . . .	23
4.2.	Marco Conceptual . . . . .	25
4.3.	Estado de Arte . . . . .	26
5.	Diseño metodológico . . . . .	32
5.1.	Tipo de estudio . . . . .	32
5.2.	Metodología de la investigación . . . . .	32
5.2.1.	Revisión bibliográfica . . . . .	32
5.2.2.	Diseño . . . . .	32
5.3.	Fuentes y técnicas de recolección de información . . . . .	33
5.4.	Población y muestra . . . . .	33
6.	Cronograma . . . . .	34
7.	Diseño de sistema . . . . .	35
7.1.	Diseño de tanque . . . . .	35
7.2.	Diseño de Mecanismo de Remoción . . . . .	37
7.2.1.	Mecanismo . . . . .	37

7.2.2.	Barrido . . . . .	39
7.2.3.	Cálculos de potencia del motor del mecanismo . . . . .	40
7.3.	Diseño de aspas . . . . .	43
7.3.1.	Prototipo . . . . .	43
7.4.	Sistema de reutilización de agua . . . . .	43
7.5.	Sistema de control . . . . .	45
7.5.1.	Programación de controlador . . . . .	45
7.5.2.	Circuitos de potencia . . . . .	48
7.6.	Simulación de esfuerzos . . . . .	49
7.6.1.	Estudio de movimiento . . . . .	50
7.6.2.	Análisis de elementos finitos . . . . .	53
7.7.	Implementación de prototipo . . . . .	56
8.	Presupuesto . . . . .	59
9.	Resultados . . . . .	60
10.	Conclusión . . . . .	61
	BIBLIOGRAFÍA . . . . .	63

## INTRODUCCIÓN

La automatización de procesos industriales es un actividad que cada vez se hace con más frecuencia a nivel nacional, como parte de la tendencia que demuestra las innumerables ventajas que ofrece a nivel productivo. Por esta razón, y por los nuevos niveles de competitividad que las empresas colombianas deben alcanzar para poder hacer frente a la economía internacional. Aquellas empresas que se abstengan de seguir este nuevo modelo de producción experimentarán retrasos en el desarrollo de su empresa.

En contraste, a nivel del campo colombiano no se evidencia la misma búsqueda de la tecnificación de los procesos a pesar de que sectores como el cafetero otorgan productos claves para la economía del país. Esto significa que mientras los demás países tecnifican el sector del agro para mejorar su competitividad, en Colombia se evidencia una falta de interés por automatizar los procesos de recolección y primeras fases del procesado de sus recursos naturales

Por medio de esta investigación se propone realizar un aporte al sector cafetero nacional en el área de selección de los granos de café aptos para consumo. Se plantea un sistema que realice de manera automatizada dicha tarea y solo requiera de la supervisión del campesino para que dicha labor se cumpla en menor tiempo y con mayor eficiencia que usando las técnicas convencionales.

De esta manera se pretende demostrar los beneficios de iniciar la automatización de los procesos del sector del campo e incitar a que otras entidades consideren en invertir en el agro como un sector con mucho más potencial de producción que el que actualmente posee.[1][2][3][4]

## 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### 1.1. IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Los métodos de procesado del café en Colombia, tales como recolección, selección del fruto, lavado, despulpado, selección del grano de café, secado, tostado y últimamente la molienda, son convencionales en su mayoría. En el caso particular de la selección consiste en elegir los granos uno por uno, lo cual hace que los tiempos de producción sean prolongados ya que este método puede durar de 3 a 8 días, lo que perjudica al sector cafetero al momento de hacer competencia con el mercado internacional en donde hay empresas que han industrializados dichos procesos. Además los métodos convencionales no son lo suficientemente efectivos para filtrar todos los frutos no aptos porque el campesino se enfoca sólo en la búsqueda de defectos superficiales en el grano y descuida los desperfectos que pueda tener el fruto por dentro, añadiendo impurezas al producto final y deteriorando su calidad, como ocurre en la Finca El Manantial, en el municipio de Rovira-Tolima, donde se están llevando acabo las investigaciones.

### 1.2. SISTEMATIZACIÓN DEL PROBLEMA

- ¿Qué tan competitivo es el sector cafetero en Colombia?
- ¿Como se realiza la selección de café en Colombia?
- ¿Que inconveniente presenta actualmente este proceso?
- ¿Que tan eficiente es el proceso?

## **2. JUSTIFICACIÓN**

### **2.1. PERTENENCIA INSTITUCIONAL**

Para la Universidad Autónoma del Caribe, la propuesta planteada refleja una oportunidad para fortalecer la línea de automatización del grupo GIIM conformada actualmente por estudiantes del programa de ingeniería mecatrónica, sin embargo la magnitud de la investigación permite proyectar la vinculación al proyecto de estudiantes y docentes pertenecientes de programas afines, tales como ingeniería mecánica, a fin de complementar el trabajo de los miembros actuales, convirtiendo la investigación en un trabajo de carácter interdisciplinario. La ejecución e implementación de dicho proyecto permite mostrar un aporte resultado del trabajo de miembros del alma amateur el cual refleja la manera en como la institución se preocupa por el desarrollo del país y entrega, como resultado de ello, un avance en uno de los campos más característicos del país a nivel internacional: el sector de la industria cafetera.

### **2.2. PERTENENCIA SOCIAL**

Por medio de la investigación planteada, se pretende generar una mejora significativa al sector cafetero gracias a la reducción de los tiempos de producción de los frutos. De esta manera se muestra un ejemplo de cómo la automatización de procesos industriales genera resultados positivos en el desarrollo de los mismos. Cabe recordar que las implementaciones mencionadas a lo largo del documento van enfocadas a generar el menor impacto ambiental posible, centrándose especialmente a la protección de nacaderos u otros cuerpos de agua comúnmente presentes bajo este tipo de condiciones geográficas. A través de los resultados mostrados, se espera conseguir la propagación del modelo de automatización hacia otras zonas del eje cafetero, lo cual fomentaría un mayor desar-

rollo en dichas regiones al aumentar su productividad y competitividad en el mercado local e internacional.

### **2.3. APORTES A LA EDUCACIÓN**

La automatización del procesado de los frutos abarca un compendio de múltiples temas para poderse llevar a cabo exitosamente. Gracias a ello, esta investigación está en capacidad de realizar diversas documentaciones que señalan el desarrollo de cada una de las etapas presentadas en el cronograma y la metodología utilizada para el cumplimiento de las mismas. Los documentos serán presentados en diversos congresos de ingeniería, comenzando en modalidad de póster y conforme al desarrollo de las investigaciones se optará por la elaboración de artículos para la participación de ponencias y publicación de los resultados en revistas científicas. En cada documento realizado se mostrará el proceso realizado para a la recolección de datos que servirán de base para mostrar las alternativas de diseño mecánico y mecatrónico para la elaboración del proyecto con la intención de que sirvan de guía para la gestión de investigaciones que presenten situaciones de índoles similares a las presentadas.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1. OBJETIVO GENERAL**

- Diseñar y fabricar un prototipo de un sistema que permita la automatización para la selección del fruto de café por medio de flotes.

#### **3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Diseñar un estanque para verter el café que satisfaga el nivel de producción de la Finca El Manantial, ubicada en Rovira-Tolima.
- Diseñar un batidor que permita el movimiento del contenido del estanque de manera efectiva.
- Diseñar un sistema que permita reutilizar el agua del estanque el mayor número de operaciones posibles.
- Diseñar un sistema que controle el proceso automatizado.
- Implementar un prototipo que ilustre los principios del funcionamiento de la máquina.

## 4. MARCO REFERENCIAL

### 4.1. MARCO TEÓRICO

#### 4.1.1. *Mecánica de fluidos*

La mecánica de fluidos es la rama de la física que estudia todas las propiedades de los fluidos, es decir líquidos y gases, y las fuerzas que los involucran. Esta se subdivide en dos grandes áreas: la estática de fluidos que se encarga de estudiar las condiciones para que estos permanezcan en reposo; y la dinámica de fluidos, la cual es clave para el desarrollo de este trabajo de grado, estudia las propiedades de los fluidos en movimiento.

Durante este marco teórico se detallará los conceptos claves de la dinámica e fluidos utilizados para el buen desarrollo de este proyecto.

- Consideraciones de un flujo en movimiento

Existen muchas propiedades de interés cuando se estudia el flujo d fluidos, tales como la presión, la densidad, el caudal y la velocidad. Dependiendo del tipo de sistema a analizar, o diseñar en este caso, estas propiedades pueden experimentar cambios o ser constante en todo momento. Según sea el caso, se puede analizar los flujos de luidos de la siguiente manera:

- Flujo Permanente: Un fluido se mueve de manera permanente cuando sus propiedades no dependen del tiempo, es decir que pueden cambiar en función de coordenadas espaciales (varían de un punto a otro del fluido), pero estas funciones son invariantes en el tiempo.
- Flujo Uniforme: El movimiento de un fluido se considera uniforme cuando sus propiedades permanecen constantes sin importar el punto donde se realice la medición. Las tuberías de diámetros constantes y largas dimensiones pueden considerarse entornos donde se desarrollan flujos uniformes [5]

- Flujo Laminar: Es un tipo de flujo permanente en el cual se puede describir el movimiento de las partículas del fluido como el movimiento de láminas paralelas entre sí que no se entrecruzan en ningún punto del movimiento del fluido.

En la mayoría de los diseños de sistemas hidráulicos se desea trabajar con un flujo laminar, ya que de lo contrario se trabajaría con un flujo turbulento que puede afectar a algunos de los equipos que conformen el sistema. Puede ser tan crítico como para generar problemas de cavitación en la bomba.

Para asegurarse en el diseño que un fluido tendrá las condiciones necesarias para desempeñarse de forma laminar, se utiliza un valor adimensional para determinar si dicho fluido tendrá el comportamiento deseado o no. Este valor se conoce como el número de Reynolds, el cual viene definido principalmente por las fuerzas de inercia que presenta el fluido debido a su viscosidad. La eq (1) define el cálculo del número de Reynolds ( $Re$ ) para el caso de tuberías cerradas de sección circular.[6]

$$Re = \frac{Vd}{\nu} \quad (1)$$

Donde  $\nu$  es la viscosidad absoluta del fluido,  $d$  es el diámetro de dicha tubería, y  $V$  representa la velocidad media del fluido. Valores del número de Reynolds menores a 2100 predicen el comportamiento laminar de un fluido en una tubería circular.

#### 4.1.2. Ecuaciones de dinámica de fluidos

- Ecuación de la continuidad

La eq (2) sólo aplica para fluidos en estado de flujo permanente. Está basado en el principio de la conservación de la materia. Por medio de esta ecuación se considera que el caudal de un fluido en estado permanente es constante sin importar los cambios en el área de la tubería, es decir:

$$A_1V_1 = A_2V_2 \quad (2)$$

Donde  $A_1$  y  $A_2$  representan las áreas de sección de la tubería y  $V_1$  y  $V_2$  son las velocidades medias del fluido.

- Teorema de Bernoulli

El Teorema de Bernoulli es la fórmula que resulta de aplicar el principio de la con-

servación de la energía a un fluido en estado permanente. La forma más conocida de esta ecuación es la presente en la eq (3). En ella se puede observar que todo fluido en movimiento puede exhibir tres tipos de energía; la energía cinética, correspondiente al primer término; la energía de flujo, correspondiente al segundo término; y la energía potencial que corresponde al último término. Bernoulli definió que la suma de los tres términos es constante a lo largo de una línea de corriente, teniendo cada uno de ellos unidades de energía por unidad de peso del fluido. [7]

$$\frac{V^2}{2g} + \frac{P}{\gamma} + z = \text{constante} \quad (3)$$

Donde  $V$  es la velocidad promedio del fluido,  $P$  la presión del fluido,  $\gamma$  es el peso específico, y  $Z$  es la altura que debe alcanzar el fluido desde su posición inicial en el recorrido, lo cual también se le conoce como carga.

#### 4.1.3. Elementos fundamentales de un sistema

- Bomba Hidráulica

Una Bomba es una máquina generadora que transforma su energía de trabajo en energía de flujo lo cual tiene un efecto en sus propiedades tales como la velocidad, la presión y el nivel con respecto a una referencia. Son utilizadas para transportar fluidos desde una zona de menor presión o altitud hacia una zona de mayor presión o altura.

Uno de los parámetros más importantes en la selección de la bomba es la definición de su potencia hidráulica. Por definición esta se expresa como el producto del caudal que genera sobre el sistema por la presión, sin embargo con el uso del teorema de Bernoulli la potencia para fluidos en estado permanente queda expresada tal y como se muestra en la eq (4).

$$P = \gamma QH \quad (4)$$

Donde  $Q$  es el caudal volumétrico,  $H$  es la carga que debe vencer la bomba, y  $\gamma$  es el peso específico del fluido.

Dependiendo de la forma en como la bomba aumenta la presión de flujo se puede clasificar en dos grandes grupos: Bombas de desplazamiento positivo y bombas centrífugas. Las primeras consisten el aumento de la presión del líquido de trabajo al hacerlo pasar por cámaras varía el volumen, y por consecuencia su presión cambia. Puede implicar

el uso de mecanismos de movimiento alternativo como elementos rotatorios. La figura 1 muestra un ejemplo de una bomba de engranes, un ejemplo típico de una bomba de desplazamiento positivo. El fluido avanza desde la entrada hacia la zona donde los dientes de los engranes comprimen el fluido e incrementan su presión hacia la zona de salida.

Figura 1. Bomba de engranes

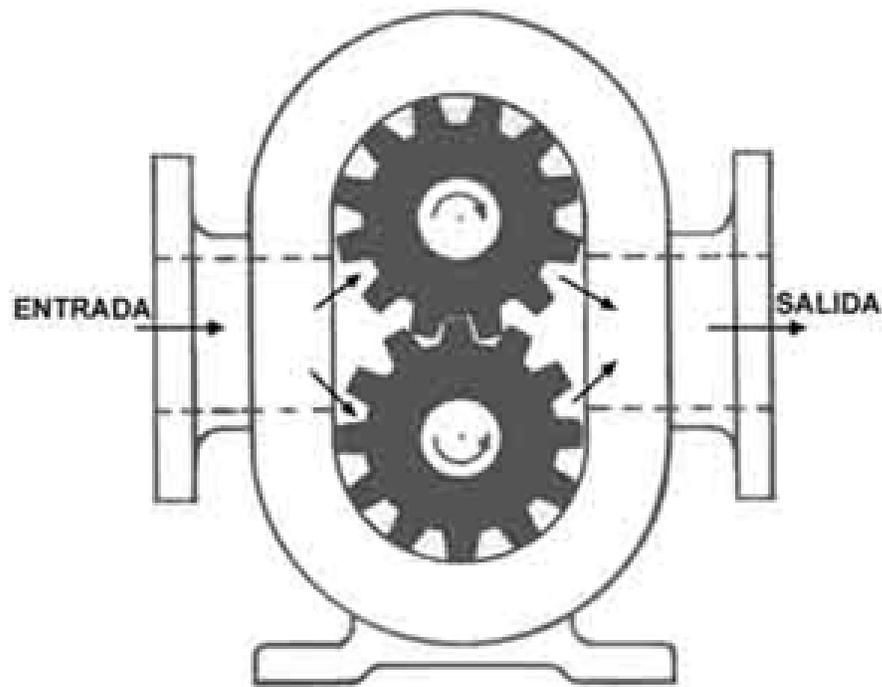


Foto tomada de [www.ingenierocivil.info](http://www.ingenierocivil.info)

Por otra parte, las bombas centrífugas son las más utilizadas en la industria porque han resultado tener mejores rendimientos y son más portátiles que sus equivalentes de las bombas de desplazamiento positivo. Son bombas rotatorias que aumentan la velocidad del fluido mientras que es conducido por medio de álabes hacia la tubería de salida. Toda la energía cinética adicionada por medio de estas máquinas es transformada en presión. La figura 2 muestra una bomba centrífuga típica. Obsérvese que cualquier bomba de este tipo consta de una parte giratoria, conformada por un elemento impulsor y una flecha, y una parte fija compuesta por el cuerpo, los sellos y las chumaceras.[8]

Figura 2. Bomba centrífuga

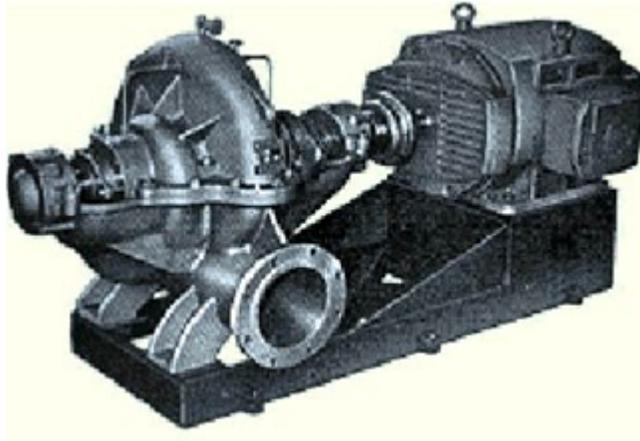


Foto tomada de [www.unet.edu.ve](http://www.unet.edu.ve)

#### 4.1.4. Tuberías

Las tuberías son conductos utilizados para transportar el fluido hacia zonas de interés. Son realizados de diferentes materiales dependiendo de consideraciones económicas y técnicas tales como la protección del fluido transportado. Pueden ser realizados de diversos tipos de materiales tales como cobre, PVC y acero galvanizado. Para el montaje del sistema de tuberías se cuenta con una gran variedad de accesorios que permiten realizar estos procesos de tal manera que se utilice la menor longitud de tubería posible. La figura 3 muestra algunos de estos accesorios tales como codos y adaptadores.

Figura 3. Accesorios para tubería. Tomada [www.ingenierocivilinfo.com](http://www.ingenierocivilinfo.com)



Foto tomada de [www.ingenierocivilinfo.com](http://www.ingenierocivilinfo.com)

#### 4.1.5. Pérdida de carga

El transporte de fluidos a lo largo de grandes distancias a través de un sistema de tuberías se ve afectado por la rugosidad de las paredes internas del conducto. Si no es tenido en cuenta este factor, el fluido perderá presión a medida que avanza por los canales y puede causar que este no llegue hacia la zona proyectada por falta de energía.

Tanto el teorema de Bernoulli como la Potencia de una bomba hidráulica no incluyen en sus variables la longitud de la tubería; sólo incluyen la altura. Para tenerla en consideración, es necesario expresar las pérdidas de energía por fricción de tal manera que se pueda recalcular la potencia mínima que requiere la bomba para operar según condiciones planteadas. Para ello existen muchas ecuaciones empíricas y analíticas utilizadas en los sistemas hidráulicos, siendo la que utilizará en este proyecto la ecuación de Darcy-Weisbach la cual es aplicable para tramos de tuberías circulares tanto en flujo laminar como turbulento. Esta se puede apreciar en la eq (5)

$$h_f = f \frac{LV^2}{D2G} \quad (5)$$

Se puede apreciar la variable  $L$  que hace referencia a la longitud de la tubería. También se puede apreciar que las pérdidas de carga también dependen de la gravedad, la velocidad promedio y el diámetro de la tubería y del coeficiente de frotamiento de la tubería, el cual se puede calcular utilizando la eq (6).

$$f = \frac{64}{Re} \quad (6)$$

Esta última ecuación es válida sólo para el flujo laminar, donde el coeficiente de frotamiento depende únicamente del número de Reynolds. En caso de flujos turbulentos este coeficiente depende también de la rugosidad relativa de la tubería. [9]

- Pérdidas locales

Además de las pérdidas de carga por fricción a lo largo de la tubería, también se presentan pérdidas en puntos especiales de tubería donde se genera flujo turbulento. Estos puntos se le conocen como singularidades. Ejemplos típicos de ellas son los codos, las válvulas y los cambios de diámetro.

Las pérdidas locales dependen de la velocidad del fluido, de la gravedad medio y un coeficiente adimensional que depende del tipo de singularidad. La eq (7) muestra la

formular para calcular dichas pérdidas locales de carga. El cociente entre el cuadrado de la velocidad media y el doble de la gravedad es una de las componentes de energía presentes en la ecuación de Bernoulli y se le conoce como altura de velocidad.

$$h_{loc} = k \frac{V^2}{2g} \quad (7)$$

El valor de k depende de la geometría de la singularidad, el cual ya se encuentra tabulado para los accesorios más habituales que generan este tipo de pérdidas. [10]

#### 4.1.6. *Sistemas de control*

La palabra "sistema de control" se define como una serie de componentes que interactúan entre si, para ello, es necesario hacer una frontera imaginaria entre las entradas del sistema y las salidas del mismo, a este tipos de sistemas se les conoce como sistemas de la caja negra por que no importa lo complejo que sea el conjunto de componentes y sus interacciones dentro del sistema, solo importan las entradas y salidas del sistema.[11]

Figura 4. Sistema de control de un motor electrico

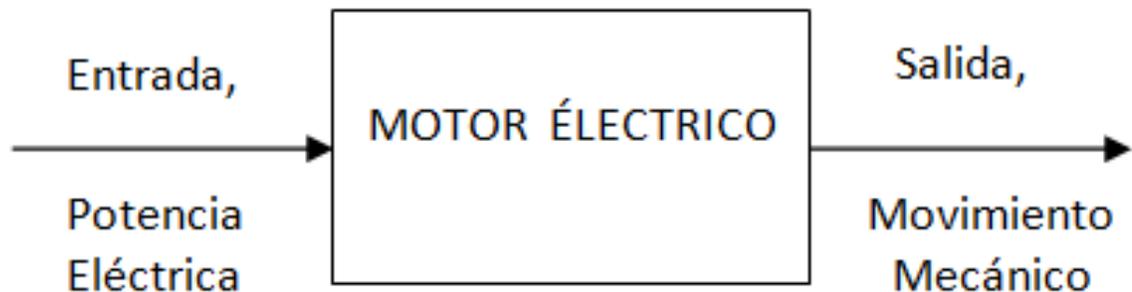


Foto tomada del libro *Ingenieria de control*, Bolton

En la figura 4 se muestra la representación gráfica de un sistema mediante una caja con las entradas y las salidas marcadas con flechas y líneas.

#### 4.1.7. Relevador eléctrico

Un relé o relevador es un interruptor accionado por el campo electromagnético de una bobina de bajo consumo. Gracias a ello resulta sencillo manipular el accionamiento de circuitos de gran potencia utilizando señales de bajo voltaje provenientes de un circuito de mando o de algún controlador programado.

La figura 5 muestra las partes típicas de un relé electromecánico. Como se puede apreciar, la conmutación se da gracias a la fuerza que efectúa el campo magnético sobre un inducido por consecuencia se mueve desplaza un contacto móvil de manera que produce o pierde conexión con uno o más contactos fijos.

Figura 5. Partes de un relevador

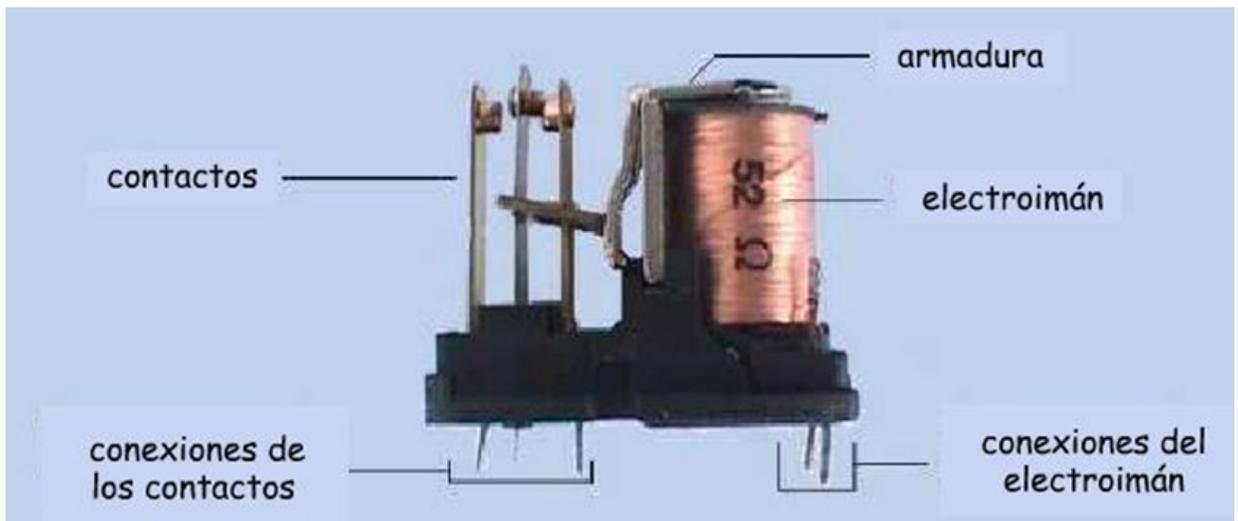


Foto tomada de [www.gobiernodecanarias.org](http://www.gobiernodecanarias.org)

#### 4.1.8. Puente H

Es uno de los circuitos más populares en la electrónica para el control de motores eléctricos. Consiste en un arreglo de interruptores puesto de tal manera que se pueda cambiar el sentido de giro de los motores de corriente directa. Es muy usado en proyectos de robótica.

La figura 6 muestra un ejemplo típico de un puente H construido a base de transistores

bipolares. Cada transistor debe ser activado en el momento adecuado para lograr el cambio de polaridad necesaria para obtener el sentido de giro deseado; es por esa razón que estos circuitos siempre van acompañados por circuitos de control que los gobiernan.

Figura 6. Ejemplo de puente H

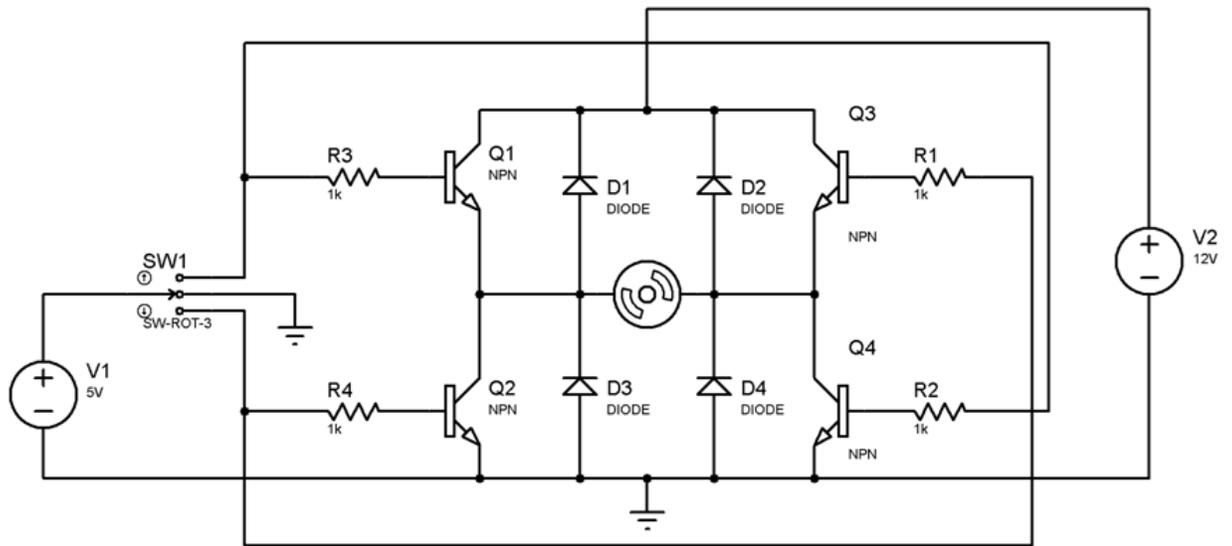


Foto tomada de [www.panamahitek.com](http://www.panamahitek.com)

#### 4.1.9. Cableado

Los circuitos de control pueden trabajar con cables de bajo calibre gracias a que son diseñados para funcionar con consumos muy bajos, de hecho basta con usar cables calibre 24AWG y calibre 22AWG para todo lo relacionado con alimentación lógica, recepción de señales y salidas digitales y analógicas del PLC. Sin embargo lo mismo no ocurre para el circuito de potencia donde las corrientes pueden alcanzar valores considerables y por ello es necesario definir el diámetro necesario para que dicha corriente fluya sin destruir los conductores. Para ello es necesario calcular las corrientes que demandará el circuito de potencia con base en las hojas de especificaciones de los motores eléctricos. Una vez obtenidos. Se puede recurrir a una tabla de Calibres AWG como la mostrada en la figura 7. A partir de ella se puede obtener información importante para la selección del cableado tal como la corriente máxima de circulación y la resistencia por unidad de longitud.

Figura 7. Propiedades de los cables con calibre AWG

AWG gauge	Conductor Diameter Inches	Conductor Diameter mm	Ohms per 1000 ft.	Ohms per km	Maximum amps for chassis wiring	Maximum amps for power transmission	Maximum frequency for 100% skin depth for solid conductor copper	Breaking force Soft Annealed Cu 37000 PSI
0000	0.46	11.684	0.049	0.16072	380	302	125 Hz	6120 lbs
000	0.4096	10.40384	0.0618	0.202704	328	239	160 Hz	4860 lbs
00	0.3648	9.26592	0.0779	0.255512	283	190	200 Hz	3860 lbs
0	0.3249	8.25246	0.0983	0.322424	245	150	250 Hz	3060 lbs
1	0.2893	7.34822	0.1239	0.406392	211	119	325 Hz	2430 lbs
2	0.2576	6.54304	0.1563	0.512664	181	94	410 Hz	1930 lbs
3	0.2294	5.82676	0.197	0.64616	158	75	500 Hz	1530 lbs
4	0.2043	5.18922	0.2485	0.81508	135	60	650 Hz	1210 lbs
5	0.1819	4.62026	0.3133	1.027624	118	47	810 Hz	960 lbs
6	0.162	4.1148	0.3951	1.295928	101	37	1100 Hz	760 lbs
7	0.1443	3.66522	0.4982	1.634096	89	30	1300 Hz	605 lbs
8	0.1285	3.2639	0.6282	2.060496	73	24	1650 Hz	480 lbs
9	0.1144	2.90576	0.7921	2.598088	64	19	2050 Hz	380 lbs
10	0.1019	2.58826	0.9989	3.276392	55	15	2600 Hz	314 lbs
11	0.0907	2.30378	1.26	4.1328	47	12	3200 Hz	249 lbs
12	0.0808	2.05232	1.588	5.20864	41	9.3	4150 Hz	197 lbs
13	0.072	1.8288	2.003	6.56984	35	7.4	5300 Hz	150 lbs
14	0.0641	1.62814	2.525	8.282	32	5.9	6700 Hz	119 lbs
15	0.0571	1.45034	3.184	10.44352	28	4.7	8250 Hz	94 lbs
16	0.0508	1.29032	4.016	13.17248	22	3.7	11 k Hz	75 lbs

Foto tomada de *www.powerstream.com*

#### 4.1.10. Selección de café: Método de flote

La calidad del café depende en gran medida del valor que imprime la selección de los frutos que han de ocupar un lugar en el procesamiento sistemático de la producción final. Por ende, no deben escatimarse esfuerzos a la hora de escoger un método efectivo para tal fin, más cuando la calidad de la pepa es generadora de confiabilidad del producto. Para ello, el método de flote se configura como una herramienta efectiva en la selección del fruto.

Este método se beneficia de la densidad del fruto para realizar una elección a través de un sifón de flote. Allí, ¿los granos que flotan? pasan a despulparse por separado a un equipo de repaso. Los granos más pesados, que se sumergen, son los de mejor calidad y se despulpan en el sistema convencional[12].

En este sentido, es imprescindible conocer el tipo de fruto útil para la producción y el fruto no deseado. Como primera medida, existen los frutos maduros que se caracterizan

por presentar un color rojo oscuro; estos gozan de mayor peso y volumen con respecto de los frutos verdes lo cual hace del método objeto de estudio, la mejor salida para automatizar el proceso de selección.

Figura 8. Frutos maduros



Fuente propia

Por su parte, los frutos brocados, vanos, verdes, secos o enfermos, son los que usualmente tienden a flotar a través del sistema de sifón y son susceptibles de inutilidad. La importancia de que estos frutos sean separados de los cerezos buenos, radica en la calidad de la bebida que generará a largo plazo pérdidas o ganancias económicas significativas al productor.

Sin embargo, los experimentos recientes demostraron que ciertos frutos brocados o verdes, desarrollan resistencia al desperdicio. Tal y como lo indica la figura 10, se pueden apreciar sobre el fondo del recipiente algunos frutos seleccionados como brocados y verdes. Lo anterior se debe a la superficialidad del alcance de la broca, que aún no

Figura 9. Frutos no deseados



Fuente propia

afecta al grano que seguirá su proceso.

#### 4.2. MARCO CONCEPTUAL

Las palabras a continuación definen los términos utilizados a lo largo de todo el documento. De esta manera evitamos interpretaciones duales o de ámbitos de áreas que no están relacionados con el tema:

- Despulpado: Extraer la pulpa de algunos frutos
- Lavado: Acción que consiste en lavar o limpiar una cosa con agua, o con agua y jabón o detergente, o en lavarse uno mismo
- Escogencia: Elegir a una persona o cosa de un conjunto por una razón determinada
- Fruto maduro: Se aplica al fruto que ha alcanzado su desarrollo completo
- Fruto inmaduro: Se aplica a la fruta que todavía no tiene la maduración que la hace adecuada para ser cogida y comida

Figura 10. Frutos brocados



Fuente propia

- Pulpa: Parte blanda y carnosa de la fruta
- Tostado: Poner un alimento al fuego o exponerlo a un calor intenso hasta que toma color sin llegar a quemarse.
- Secado: Operación que consiste en eliminar totalmente el líquido o humedad contenido en una cosa
- Molienda: Proceso que consiste en triturar una materia hasta reducirla a trozos muy pequeños o a polvo

#### 4.3. ESTADO DE ARTE

Los procesos de recolección de café cuyo beneficio ecológico han demostrado impactar positivamente el equilibrio natural, procuran ir de la mano con los nuevos retos de la ingeniería mecatrónica a fin de desarrollar estrategias que fortalezcan este campo. En este sentido, el objeto de estudio de la presente investigación se centra en la elaboración de un estado del arte que retome los procedimientos que se llevan a cabo en el tratamiento del café, teniendo como objetivo propio el desarrollo de beneficios ecológicos.

Como primera medida, se debe tener en cuenta el alcance de dichos beneficios que generan mejor rendimiento y optimización de la calidad del café. Así, un estudio sobre selección del café atacado por la broca en el proceso de beneficio con desmucilaginado mecánico en Chinchiná, Colombia, expuso las diferencias de los procesos de beneficio ecológico tradicionales, en comparación con el desmucilaginado mecánico. La investigación dedujo que con este último proceso disminuyó la proporción de peso de café afectado por la broca en un 64 por ciento, apreciando mejor calidad en el café procesado. Sin duda, son beneficios que afectan considerablemente la relación entre producto procesado y beneficio ecológico, ya que se aprecia que cerca de 600 kg de café cereza por hora son procesados a través de diferentes procesos.

Otro estudio evaluó la dinámica en los procesos de beneficio tradicional y ecológico, de los granos afectados por la broca del café en el plano nacional. Según los autores, los beneficios causados de los procesos tradicionales y ecológicos se miden bajo los criterios de utilización de las semillas afectadas por la broca y el nivel de calidad en el procesamiento del café: Con el proceso de beneficio con desmucilaginado mecánico (PBDM), la proporción de peso del café afectado por la broca (CB), disminuyó un 65 por ciento, mientras que con el proceso de beneficio tradicional (PBT) se redujo en un 66 por ciento. La relación del CB, antes y después de los procesos, es de tipo lineal e independiente al proceso de beneficio, para un rango de frutos afectados entre 1 y 40 por ciento.

En el PBDM la remoción mecánica del mucílago resultó ser la operación que permitió retirar en mayor proporción (16 por ciento), la masa afectada por el insecto, mientras que en el PBT fue la clasificación por densidad (21 por ciento). La trilla del café redujo la proporción de CB en un 12 por ciento para el PBDM y 17 por ciento en el PBT. Esta operación puede ser una alternativa importante para retirar masa afectada por la broca.

De esta manera, el desempeño de la recuperación en la semilla afectada por la broca ha de sumarse al beneficio general en la recolección del café, cuyos procesos de generación de producto han de aumentar considerando el impacto ecológico en pro de la productividad, la calidad y el aprovechamiento completo de la semilla de café.

La importancia de llevar las técnicas y tecnologías de la automatización hacia las actividades desarrolladas en la agricultura no es un proyecto de vanguardia. De hecho no

es más que seguir con la tendencia de mejorar la calidad y el rendimiento de las actividades desarrolladas por el ser humano al incorporar nuevas herramientas en actividades conocidas.

Esto se puede evidenciar cuando se analiza el trabajo realizado por estudiantes de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México. Llegaron a la conclusión que automatizar todos las etapas de procesado del café sería una propuesta que fomentaría el cultivo del café por parte del campesinado al reducir los costos y tiempos de producción, los cuales estaban dejando dicha practica porque consideraban que no era rentable.

La propuesta de automatización presentada se basó en el diseño de un sistema electro neumático controlado por un PLC en instrumentado a base de sensores inductivos para detectar el estado de cada proceso en cada instante de su desarrollo. Sus diseños involucraron la implementación de los sistemas eléctricos de control y potencia, la programación del PLC, y el esquematizado de los circuitos electro neumáticos en las etapas de despulpado, presecado, secado, fermentación y molienda del café.

Uno de los trabajos de automatización realizados en Colombia fue realizado por Willian Acero de la universidad de la Salle en su trabajo de tesis en el cual realizó la automatización del proceso de tostado de café. Para ello realizó el diseño del lazo cerrado de control. Esto incluyó diseño del controlador de temperatura del sistema, instrumentación de todas las variables del proceso y diseño de la interfaz Hombre máquina.

Uno de los aspectos más relevantes de su trabajo consiste en la selección de las variables del proceso. Resalta que no es necesario realizar un control total de las variables que afectan el tostado, sino que es mejor enfocarse en manipular las variables que tengan un mayor efecto sobre la temperatura de tostado a fin de simplificar el diseño y no entregar un proyecto demasiado costoso que no podría implementarse fácilmente. Su criterio de selección de variables de control resulta de guía para desarrollar la automatización del proceso de selección de los frutos de café.

Otro de los trabajos relacionados involucra el diseño del sistema mecatrónico usado para la automatización del secado de los granos de café. Este fue realizado por Dany Echeverry de la Universidad Tecnológica de Pereira. A diferencia del trabajo de Acero, este diseño abarca la implementación desde cero. Se resalta mucho el diseño mecánico del sistema, especialmente el de de la transmisión de potencia y del secador. Esto

permite obtener mucha información acerca de la validación de los resultados teóricos utilizando técnicas de simulación en el programa Solid Works. Además adapta su diseño a los materiales y elementos de máquinas comerciales que mejor satisfagan sus objetivos.

En menor extensión, pero no por eso menos importante, se observan los elementos usados para la instrumentación y control de las variables del secador. La integralidad de la instrumentación con el diseño mecánico es fundamental para que el control del sistema funcione de manera efectiva. Todos los sensores fueron seleccionados para puedan tomar las mediciones sin verse afectados por las condiciones de trabajo del secador.

Baratza, una compañía estadounidense que distribuye diversos productos para el consumo de bebidas a base de café, ofrece a sus clientes una moladora automatizada de fácil transporte, de manera que los aficionados de estas bebidas pueden tener café de calidad profesional en cualquier parte. La empresa llama a este producto el Vario-W.

El sistema consta de una tolva que dirige los granos a un arreglo de fresas cerámicas que se encargan de la molienda. El Vario-W consta de una interfaz de usuario para que este pueda modificar el tamaño de las partículas; también cuenta con un sistema de programación por pesos, de manera que el molino funciona por un tiempo calculado por el dispositivo de acuerdo a la cantidad de granos colocados en la tolva, dando la posibilidad de guardar hasta tres configuraciones de tiempos en la memoria del equipo. La figura 11 muestra al vario-W ilustrando sus diversas partes.

Figura 11. Molienda Automatiza. Tomada de manual de instrucciones del dispositivo



Foto tomada de Manual de Usuarios WARIO-W

Investigadores de la universidad Nacional de Colombia realizaron diferentes estrategias de control para el automatizar el proceso de secado del café. Para ello propusieron un sistema de secado con lecho húmedo en el cual se seca café utilizando diferentes temperaturas del aire de secado. Entre las distintas técnicas de control utilizadas se destaca el uso de lógica difusa. La figura 12 muestra el prototipo de secado propuesto.

Figura 12. Prototipo de secado con lecho húmedo

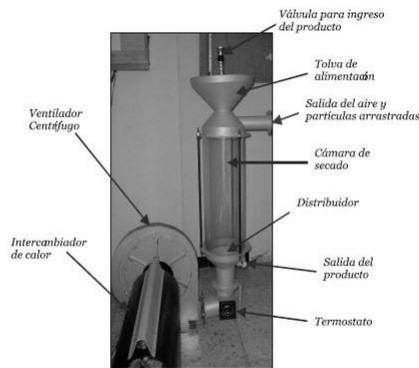


Foto tomada de [www.scielo.org.co](http://www.scielo.org.co)

A pesar de que durante este proyecto se tuvo que lidiar con el desconocimiento de la función de transferencia, se obtuvo un producto con propiedades organolépticas de buena calidad por medio del control de la velocidad superficial del aire y la definición de una temperatura de secado inicial de 50°C: Esto es una clara muestra de uno de tantos esfuerzos por tecnificar las distintas etapas del tratamiento del café en el país.[13]

El secado del café es uno de los procesos más trabajados por distintos ingenieros en Colombia. Carlos Álvarez Restrepo propuso un sistema mecánico para la tostación de café que tiene incluido un sistema de control automático y un sistema de monitoreo de todas las señales con el objetivo de perfeccionar esta técnica al obtener mejores sabores de infusión que satisfaga a los clientes finales del producto. Para ello se recurrió al diseño de un sistema mecatrónico partiendo de las bases de los tostadores convencionales.

La clave del diseño mecatrónico propuesto por Carlos Álvarez Restrepo, es el hecho de tener en cuenta la capacidad de integrar cada uno de los diseños menores, el mecánico, el electrónico y la programación del sistema de control, de manera que estos acoplen entre sí, es decir que cada diseño individual tuvo en cuenta el hecho de que debía coordinar

con otros para poder obtener un producto que hoy en día tiene la patente WO 136632 A2 [14].

## 5. DISEÑO METODOLÓGICO

### 5.1. TIPO DE ESTUDIO

El tipo de estudio propuesto es la investigación es campo-documental, ya que se necesita de los documentos y teorías ya propuestas para solucionar el problema y de campo por que se necesita sacar muestras del fruto de café en el lugar donde se va a efectuar el proyecto.

### 5.2. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

#### 5.2.1. *Revisión bibliográfica*

Antes de realizar cualquier tipo de proyecto, es importante saber cómo está constituido, de que se trata. En todo proyecto la revisión bibliográfica es la base y es paso muy fundamental para empezar a construir una base fuerte.

Se iniciara investigando cuidados y consejos para seleccionar la semilla de café, características de un fruto maduro y todo lo que tiene que ver con despulpar la semilla.

#### 5.2.2. *Diseño*

Cuando ya se tiene una base fuerte en la revisión bibliográfica, se empieza la etapa final que es la del diseño del sistema automatizado para despulpar y seleccionar el fruto de café.

### **5.3. FUENTES Y TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN**

Se tiene contacto directo con los caficultores de la región cafetera del departamento del Tolima, ellos expresan su problemática y demás problemas que tiene con el proceso del café.

### **5.4. POBLACIÓN Y MUESTRA**

- Caficultores del municipio de Rovira-Tolima.
- Finca El Manantial, Rovira-Tolima.

## 6. CRONOGRAMA

ETAPA	INICIO DE TAREA	FIN DE TAREA
1. Diseño de estanque	3-20-14	5-26-14
1.1. Estudio de producción	3-20-14	3-23-14
1.2. Diseño preliminar	3-24-14	4-26-14
1.3. Diseño detallado	4-28-14	5-20-14
1.4. Análisis de etapa	5-21-14	5-26-14
2. Diseño del batidor	5-27-14	7-12-14
2.1 Investigaciones previas	5-27-14	5-31-14
2.2 Diseño preliminar	6-01-14	9-15-14
2.3 Selección de material	6-24-14	9-15-14
2.4 Análisis mecánico	6-27-14	9-19-14
2.5 Análisis de etapa	7-05-14	9-19-14
3. Análisis estadístico	10-13-14	11-13-14
3.1 Eficiencia del batidor	10-13-14	10-30-14
3.2 Producción del sistema	10-31-14	11-11-14
4 Implementar prototipo	11-11-14	01-20-15

Figura 13. Diagrama de Gantt

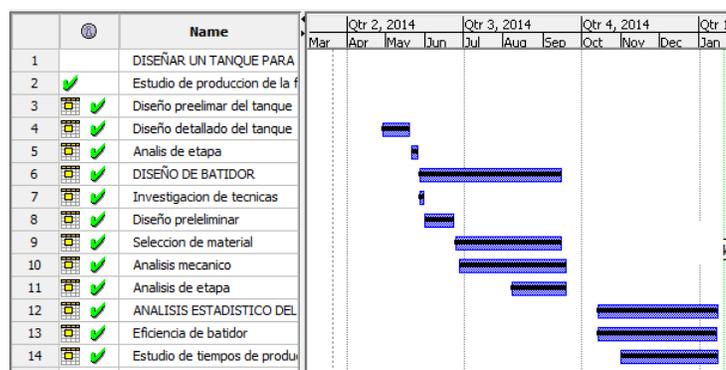


Foto tomada de la interfaz gráfica de Openproj.

## 7. DISEÑO DE SISTEMA

Para solucionar el problema propuesto en este proyecto, el equipo decidió implementar un sistema que consta de un tanque para verter el grano de café, un sistema de aspas para mantener en constante movimiento el agua y así asegurarse que ningún grano de café de poca densidad quede atrapado en el fondo del tanque, un mecanismo manivela- corredera (MBC) para remover los granos de café de baja densidad que están flotando en la superficie del agua y un sistema que permita reutilizar el agua. Otro paso muy importante para desarrollar el diseño de este prototipo es el sistema eléctrico que controlara cada uno de los movimientos.

### 7.1. DISEÑO DE TANQUE

Para establecer la capacidad del tanque, es necesario realizar un estudio previo de producción de la finca. En la tabla.1 se pueden observar los estudios realizados en la Finca el manantial del año 2012. Para determinar la capacidad del tanque con más precisión, como se puede observar en la figura 13 se realizaron unos estudios de peso y densidad de 20 granos café escogidos al azar.

En la tabla.2 se pueden observar los resultados de los estudios realizados, se puede apreciar que el peso aproximado de un grano de café, es aproximadamente de 0.20 gramos con un volumen aproximado de 2,14 centímetros cúbicos.

Se aprecia en la tabla.1 que el mes de Mayo es el mes de mayor producción, por medio de una regla de tres se pudo calcular que los 6525 kilogramos de café producidos en este mes , son aproximadamente 32845000 granos de café; esta cantidad de granos tienen un volumen aproximado de 70288300 centímetros cúbicos.

Dado que el proceso de selección se realizará 6 veces al día por todo el mes según

Tabla 1. Producción de café en la Finca El Manantial

MES	CARGAS	SACOS	LIBRAS	KILOGRAMOS
Enero	3	6	750	337.5
Febrero	3	6	750	337.5
Marzo	6	12	1500	675
Abril	10	20	2500	1125
Mayo	58	116	14500	6525
Junio	3	6	750	337.5
Julio	3	6	750	337.5
Agosto	8	16	2000	900
Septiembre	17	34	4250	1912.5
Octubre	53	106	13250	5962.5
Noviembre	20	40	5000	2250
Diciembre	7	14	1750	787.5
TOTAL	191	382	47750	21487.5

Fuente propia

las especificaciones del diseño, entonces las dimensiones más adecuadas para el tanque son de 100cm x 50 cm x 80 cm que equivalen a 400.000 centímetros cúbicos. Cabe resaltar que para que los granos de café que no están en condiciones puedan flotar, se le ha aumentado 10 cm de altura al tanque.

En la figura 14 se puede observar el diseño del tanque, en la parte superior derecha, se ve una especie de "playa" en esa parte, el café dañado(Café de baja densidad) sera separado de los frutos actos para el consumo.

Figura 14. Estudio de densidad y peso de granos de café

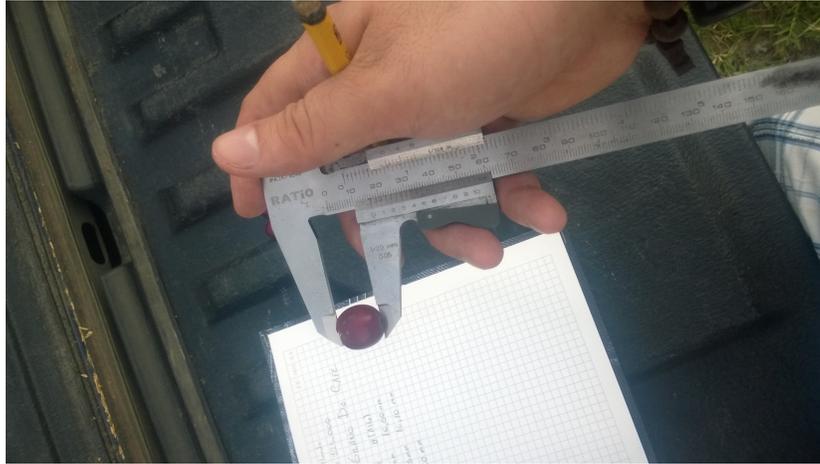
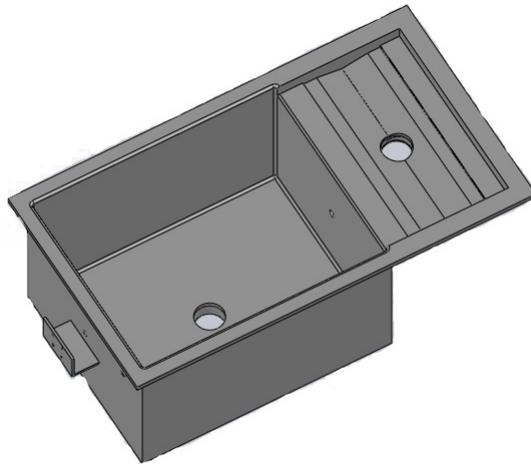


Figura 15. Diseño de tanque



## 7.2. DISEÑO DE MECANISMO DE REMOCIÓN

### 7.2.1. Mecanismo

Gracias al método de flotes, todos los granos que experimente algún tipo de desperfecto flotan en la superficie. Por esa razón es necesario diseñar un sistema capaz de retirarlos del agua. Para ello se planteó un mecanismo manivela-biela-corredera (MBC) que desplazara un elemento que barra la superficie a lo largo del tanque en dirección a la zona de desagüe. Para ello se diseña el mecanismo para que su carrera coincida con el

Tabla 2. Resultado de los estudios de densidad realizados del fruto de café.

N°	Ancho(mm)	Alto(mm)
1	15.00	16.50
2	13.65	16.10
3	16.20	16.85
4	14.55	16.60
5	15.40	15.65
6	14.45	15.15
7	16.00	17.20
8	13.90	15.85
9	16.80	16.85
10	14.40	16.70
11	15.35	16.70
12	14.55	15.90
13	14.55	16.60
14	13.60	18.75
15	14.20	16.80
16	14.50	16.85
17	13.00	13.55
18	13.05	14.05
19	13.75	15.80
20	16.30	17.60
PROM	14.66	16.30

Fuente propia

largo del tanque.

Con base en la teoría de mecanismos y en algebra básica, un mecanismo MBC en el cual el punto de giro de la manivela y la línea de acción de la corredera estén a la misma altura, y dados los puntos máximo y mínimo de desplazamiento  $S_{max}$  y  $S_{min}$  respectivamente, queda definido por el siguiente sistema de ecuaciones.

$$L2 = \frac{S_{max} - S_{min}}{2} \quad (8)$$

$$L1 = S_{max} - L2 \quad (9)$$

Donde  $L_1$  y  $L_2$  son las longitudes de la manivela y biela respectivamente. De esta forma se puede adaptar el mecanismo para cualquier tipo de carrera. La figura 15, muestra un bosquejo del Mecanismo hecho en SolidWorks.

Figura 16. Mecanismo MBC



Foto tomada de *Solidwork*

### 7.2.2. Barrido

Una vez obtenido el desempeño deseado del mecanismo, se puede empezar con el diseño del barredor. Para que este se pueda mover solidario al mecanismo, dicho barredor reposará sobre dos apoyos móviles que son dirigidos por el mecanismo. De esta manera se asegura que el barredor experimente un movimiento lineal alternativo para cumplir su trabajo. La figura 16 muestra el bosquejo del barredor en SolidWorks.

Figura 17. Mecanismo acoplado al barredor

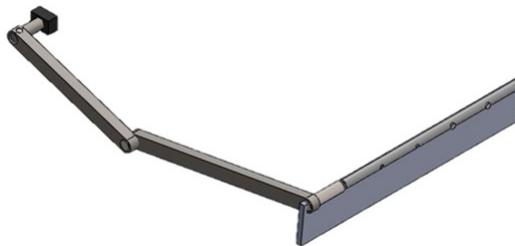


Foto tomada de *Solidwork*

### 7.2.3. Cálculos de potencia del motor del mecanismo

Para definir el motor necesario para una aplicación específica se necesitan tener claros la potencia de trabajo, el torque necesario y la velocidad de giro nominal requerida según la situación. Estas tres magnitudes quedan relacionadas mediante la ecuación 10:

$$P = \tau\omega \quad (10)$$

Donde  $\tau$  es torque en  $Nm$  y  $\omega$  en la velocidad angular dada en radianes sobre segundo.

- Estudio de la inercia del mecanismo

En el caso del motor se sabe que la velocidad angular está relacionada con la rapidez del barredor, así que esta es definida por el diseñador. Por otra parte el torque depende de la inercia que se opone a la rotación y a la aceleración angular requerida para llegar a la velocidad especificada. Esto se puede apreciar en la ecuación 11:

$$\tau = \alpha I \quad (11)$$

Donde  $\alpha$  es la aceleración angular en Radianes sobre segundo al cuadrado e  $I$  es el momento de inercia del mecanismo con respecto al eje del motor en  $kgm$  cuadrado. Este valor de inercia que se debe tener en cuenta es que obtenga los efectos de las inercias de los eslabones individuales. Para ello es necesario tener la sumatoria de todos los momentos de inercia del mecanismo desde un mismo punto o eje de rotación.

Dado  $O$  como el punto de giro del motor que acciona el mecanismo,  $I_{bk}$  e  $I_{mk}$  como las inercias de la biela y manivela en un punto de giro  $k$  respectivamente, la inercia total del sistema se obtiene con base en la ecuación 12:

$$I_O = I_{bo} + I_{mo} \quad (12)$$

Estos datos de inercia pueden ser obtenidos por usando el programa de modelado Solid-Works. Con la inercia neta calculada y definida la aceleración angular del mecanismo de acuerdo a las necesidades del diseño, se puede calcular el torque necesario para satisfacer las condiciones planteadas.

La figura 17 muestra la ventana de propiedades físicas de SolidWorks, en donde se puede apreciar toda la información relacionada con la masa, volumen e inercia tanto de cada una de las partes como del mecanismo ensamblado.

Figura 18. Propiedades físicas del mecanismo utilizando SolidWorks

```

Propiedades de masa de MBC3
Configuración: Predeterminado
Sistema de coordenadas: -- predeterminado --

Masa = 24.549 kilogramos

Volumen = 0.003 metros cúbicos

Área de superficie = 0.633 metros cuadrados

Centro de masa: ( metros )
X = 0.488
Y = -0.000
Z = 0.164

Ejes principales de inercia y momentos principales de inercia: ( kilogramos * metros cuadrados )
Medido desde el centro de masa.
Ix = (0.998, 0.003, 0.060)      Px = 0.032
Iy = (-0.004, 1.000, 0.019)   Py = 2.668
Iz = (-0.060, -0.019, 0.998)  Pz = 2.671

Momentos de inercia: ( kilogramos * metros cuadrados )
Obtenidos en el centro de masa y alineados con el sistema de coordenadas de resultados.
Lxx = 0.041      Lxy = 0.008      Lxz = 0.157
Lyx = 0.008      Lyy = 2.668      Lyz = 0.001
Lzx = 0.157      Lzy = 0.001      Lzz = 2.661

Momentos de inercia: ( kilogramos * metros cuadrados )
Medido desde el sistema de coordenadas de salida.
Ixx = 0.700      Ixy = 0.005      Ixz = 2.121
Iyx = 0.005      Iyy = 9.177      Iyz = -0.000
Izx = 2.121      Izy = -0.000     Izz = 8.511

```

Foto tomada de *Solidwork*

- Efectos del peso del mecanismo sobre el motor

Además de la inercia neta del sistema, es necesario analizar si los pesos de cada uno de los eslabones ejercen una oposición al movimiento lo suficientemente considerable como para tenerlos en cuenta la especificación del torque mínimo para que el mecanismo funcione. Para ello se hace el DCL del mecanismo en la posición donde los pesos tienen una mayor palanca con respecto al eje del motor tal como se ilustra en la figura 18. Para este análisis se considera el momento que pueda ejercer la corredera despreciable y por tal razón no se incluye en el DCL.

De acuerdo con el DCL, el torque mínimo necesario para el movimiento del mecanismo, denotado como T es definido por la ecuación 13:

Figura 19. DCL del mecanismo en posición crítica

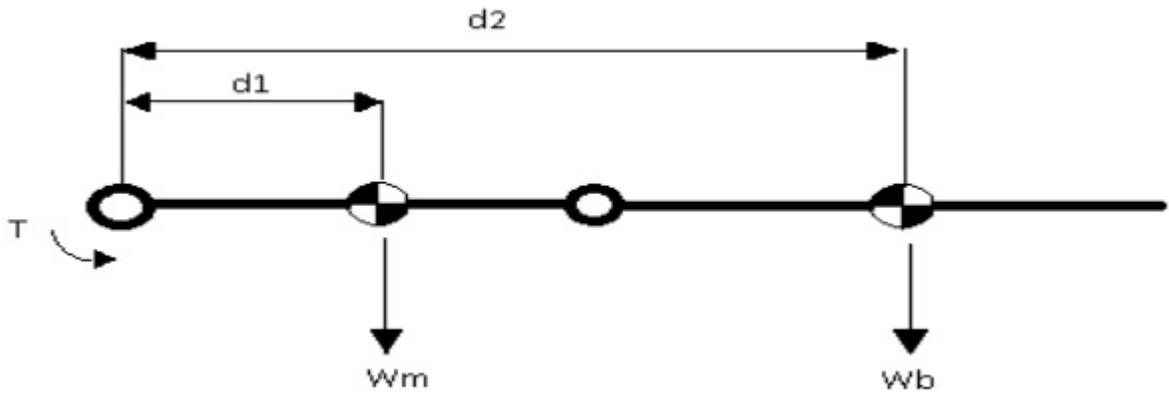


Foto tomada de *Solidwork*

$$T > d_1 w_m + d_2 w_b \quad (13)$$

Donde  $d_1$  y  $d_2$  son las palancas de los pesos de los eslabones medidas desde el origen hasta centros de masa respectivos.

Una vez obtenidos los torques a través de los dos métodos anteriores, es necesario sumarlos para obtener el torque mínimo para soportar los pesos del mecanismo y a la vez acelerarlo hacia la velocidad requerida. La tabla 3 Muestra los resultados obtenidos por ambos métodos y las potencias nominales que satisfacen dicho par bajo una velocidad nominal deseada. Los datos de masa y longitudes de los eslabones utilizados en el diseño del modelo en SolidWorks están basados en los valores a escala real de la máquina, es decir que los resultados de la tabla 3 representa una aproximación válida para la selección del motor del mecanismo.

Tabla 3. Resultados de los métodos de cálculo de potencia del motor

MÉTODO	TORQUE(Nm)	VEL(RPM)	POTENCIA(HP)
Inercias	106.592	12	0.180
Por peso	116.676	12	0.1970
TOTAL	223.268	12	0.376

Fuente propia

Como se puede apreciar, estudiar los efectos del peso del mecanismo arroja un motor con una potencia ligeramente mayor. Con base en estos resultados se llega a la conclusión que un motor de 0.5 HP y con una velocidad nominal de 12 RPM ejercería un torque más que suficiente para lograr el buen movimiento del mecanismo.

### 7.3. DISEÑO DE ASPAS

#### 7.3.1. Prototipo

Para diseñar el componente que tiene como función mantener el agua en constante movimiento para que los frutos dañados salgan a flote, se tuvo en cuenta las aspas de los batidores, como se observa en la figura 19; para ajustar el modelo a el tanque ya diseñado, se pueden observar unos pequeños cambios en la figura 20.

Figura 20. Aspas de pliegue y bata



Foto tomada de [www.csunitec.com](http://www.csunitec.com)

### 7.4. SISTEMA DE REUTILIZACIÓN DE AGUA

El tanque será llenado de agua gracias a una bomba que suministra el líquido mediante unas tuberías de PVC. Lo más importante es la selección de la bomba, la cual se sabe que depende del fluido de trabajo, la gravedad del medio, la altura que debe impulsar el líquido y el caudal deseado. Por tal razón es necesario establecer las consideraciones

Figura 21. Aspas de pliegue y bata modificadas

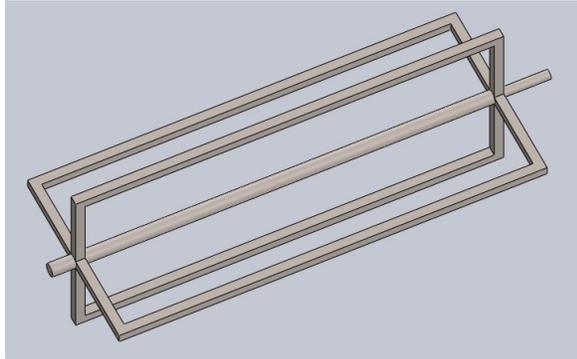


Foto tomada de *Solidwork*

para la selección de la bomba, las cuales son las siguientes:

- El tanque debe llenarse en 40 segundos
- La tubería será de 1/2"
- Se desprecian las pérdidas por fricción y las pérdidas locales por las dimensiones del sistema

Es entendible despreciar las pérdidas de carga al tener en cuenta que esta tiene un valor de 60cm y que este representa mayoritariamente toda la longitud de tubería a utilizar ya que la bomba se colocará lo más cerca posible del tanque.

Las dimensiones del tanque ya han sido expresadas previamente en el diseño mecánico. Con ellas se sabe que el volumen del tanque es de  $0.7m^3$ . Con ello se puede calcular el caudal que se necesita para llenar el tanque en 40 segundos, alrededor de  $0.018m^3/s$ .

Ya con el caudal obtenido se tienen todos los datos necesarios para calcular la potencia de la bomba. La potencia mínima necesaria es de 0.14 HP, lo cual es fácilmente asequible por cualquier bomba comercial.

El diámetro de la tubería jugaría un papel importante en la determinación de las pérdidas por fricción, pero en este tipo de sistemas de dimensiones tan pequeñas se puede obviar este proceso ya que no implican aportes considerables a la selección de la bomba.

## 7.5. SISTEMA DE CONTROL

### 7.5.1. Programación de controlador

Para realizar controlar cada uno de los actuadores en el sistema, se ha determinado usar un PLC S7 1200 SIEMENS ya que este dispositivo posee un variador de frecuencia y así poder manipular los motores monofasicos. El primer paso para diseñar el de control, es realizar unos diagramas de flujo para una pequeña, pero en realidad la partes mas importante para empezar el código se observa en las tablas 4 y 5.

Tabla 4. Variables de entrada

N°	Etiqueta	Concepto	Puerto PLC
1	B1	Start	I.0.0
2	B2	Stop	I.0.1
3	B3	Open Valve	I.0.2
4	B4	Close Valve	I.0.3
5	S1	Level sensor	I.0.4
6	S2	Limit switch	I.0.5
7	S3	Career start	I.0.6
8	B5	Full thank	I.0.7

Tabla 5. Variables de salida

N°	Etiqueta	Concepto	Puerto PLC
1	M1	stirring machine motor	Q.0.0
2	M2	Mechanism Motor	Q.0.1
3	M3	Open valve signal	Q.0.2
4	M3.1	Close valve signal	Q.0.3
5	M4	Pump	Q.0.4
6	M5	Up sweeper	Q.0.5
8	M5.1	Down sweeper	Q.0.6

Se pueden observar en el diagrama 1, la función de llenado del tanque, en esta parte interactua el sensor de nivel y la motobomba que llena el tanque..Teniendo en cuenta

el diagrama 2 se aprecia la función del swicth "Start", esta función enciende el motor del batidor y el motor del mecanismo. La función "Stop" detiene todos los procesos relacionados del sistema, se hace esta función como precaución.

Diagrama.1. Función de llenado de tanque

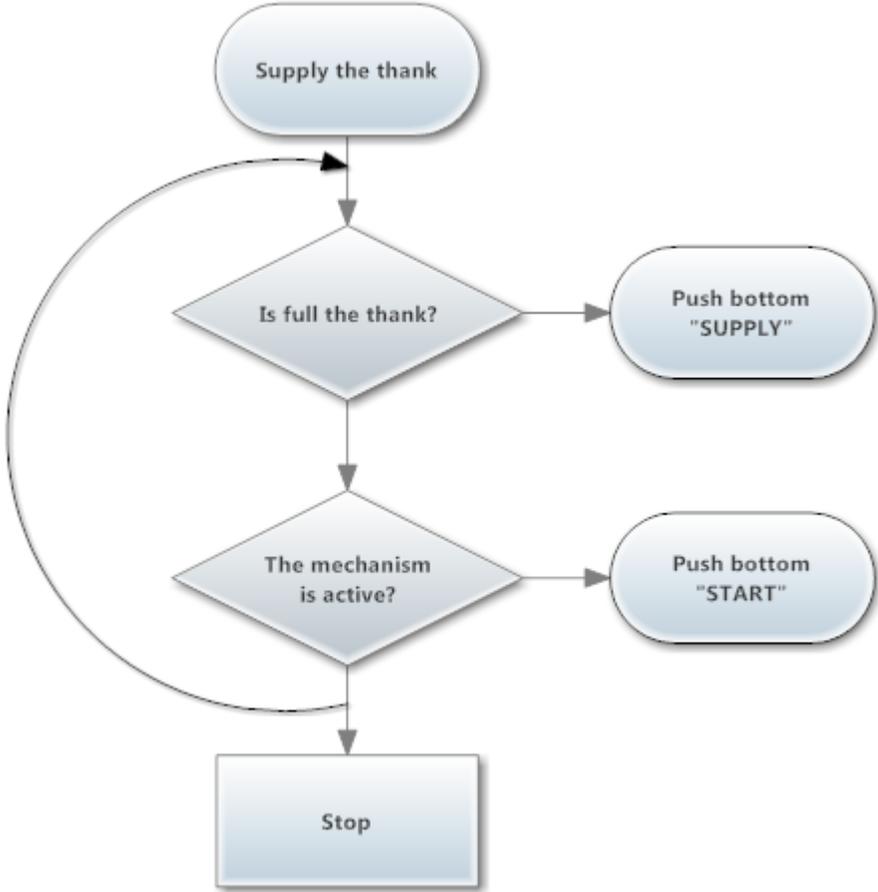
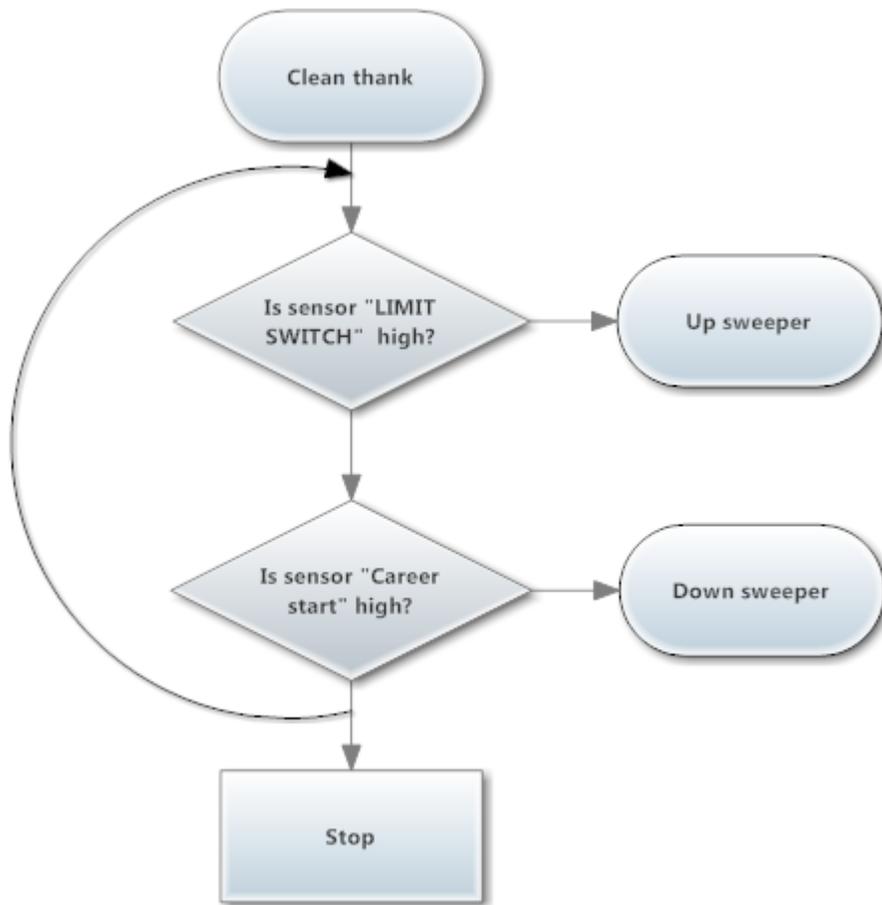
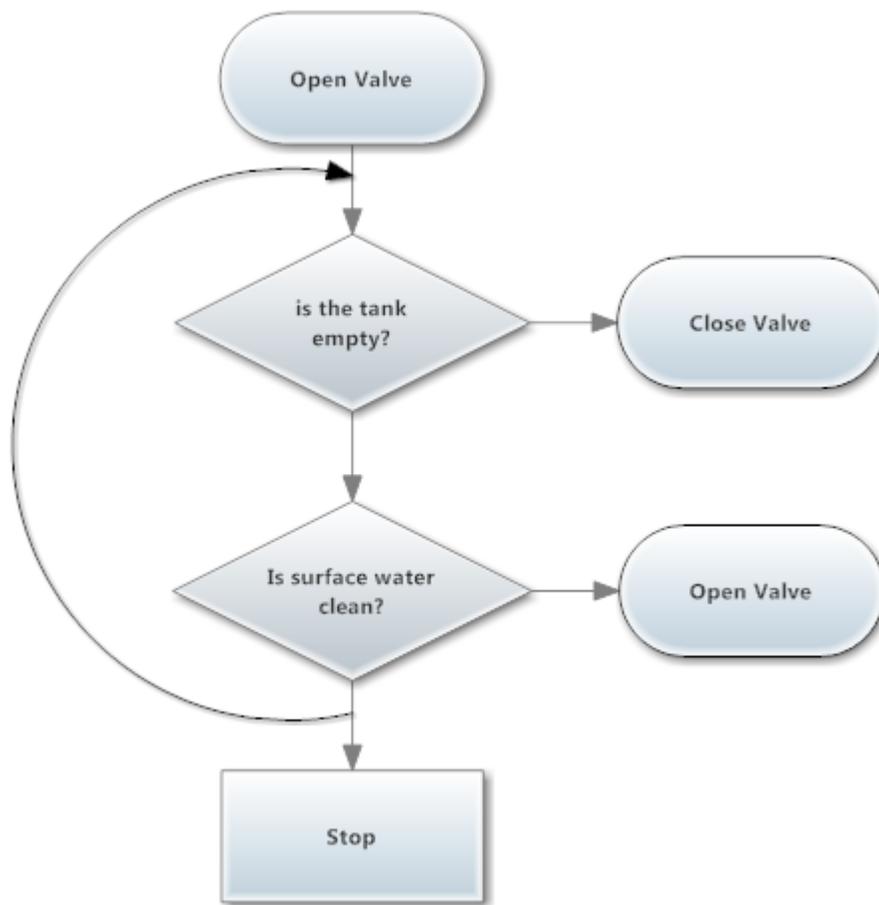


Diagrama.2. Función de "Start".



La parte restante del código, es la función de la abertura y cierre de la válvula por donde va a salir el café seleccionado. Diagrama 3.

Diagrama.3. Función "Apertura de válvula de tanque"



### 7.5.2. Circuitos de potencia

Utilizando un PCL como sistema embebido, es necesario diseñar una etapa de potencia para tener control sobre todos los motores eléctricos de la máquina y de la bomba. Para ello se requiere el uso de circuitos puente H para controlar la apertura y cierre de la válvula y circuitos para el accionamiento de los motores del batidor y del mecanismo de remoción. Basta con la utilización de relés para realizar las conmutaciones de acuerdo a la programación del PLC. La figura 21 muestra el diseño de los circuitos de potencia para el manejo de la válvula. En este caso se utilizaron dos relés DPDT accionados por bobinas de 5 Volts para la elaboración del circuito Puente H.

En el caso de circuitos para el batidor y el mecanismo de remoción el circuito es esencialmente el mismo. La figura 22 muestra el esquema del circuito de potencia usado para ambos casos. La única diferencia radica en la utilización de un relé de corriente

Figura 22. Circuito de potencia de accionamiento de la valvula

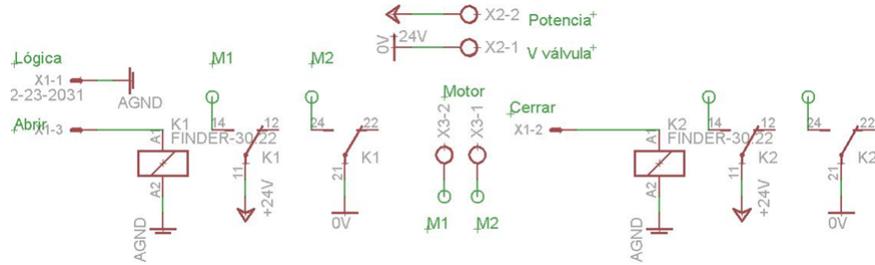


Foto tomada de *Eagle*

alterna para el caso del motor del batidor mientras que se usa uno de corriente directa para el caso del mecanismo.

Figura 23. Circuitos de arranque de motores para mecanismo y batidor

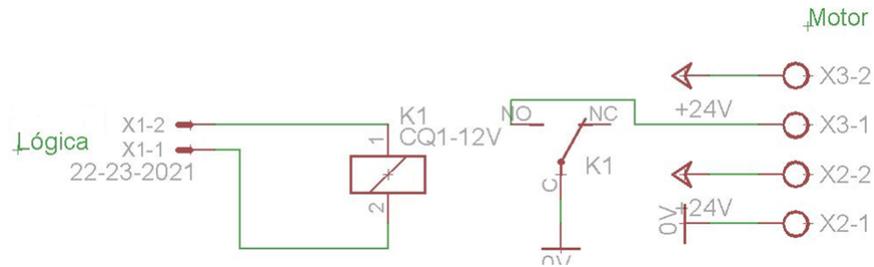


Foto tomada de *Eagle*

## 7.6. SIMULACIÓN DE ESFUERZOS

Para la selección de material, los espesores de cada uno de los elementos que conforman la máquina y los motores que conforma se recurre a la utilización de las herramientas de simulación que ofrece el software Solidworks. De esta manera se ahorra mucho tiempo y recursos al no ser necesario el uso de cálculos a manos para aplicar los criterios de falla y los estudios de movimiento de las piezas móviles del prototipo.

### 7.6.1. Estudio de movimiento

El prototipo cuenta con dos elementos móviles: Mecanismo de remoción de los granos de café, y el batidor. En ambos casos los movimientos de estos elementos son accionados por motores. En secciones anteriores se describió las fórmulas para la selección de un motor con el torque y la velocidad angular con base en un mecanismo prototipo. Ahora se utiliza esta técnica de ingeniería asistida por computadora como alternativa analizar los elementos móviles teniendo en cuenta factores que implicarían el uso de fórmula más engorrosas tales como la fricción y las fuerzas generadas entre los pasadores y demás elementos de unión de los eslabones u otras piezas móviles.

La figura 23 muestra una versión mejorada y más detallada del mecanismo de remoción. En este caso se utiliza el acrílico como material de los eslabones para reducir el peso y se ha añadido el elemento de barrido como corredera. También se ha detallado un riel propuesto para guiar el movimiento de la corredera.

Figura 24. Prototipo detallado de mecanismo de barrido

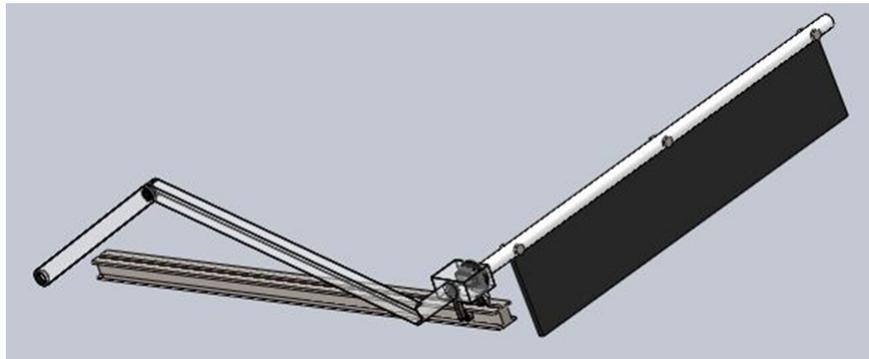


Foto tomada de *Solidwork*

Por medio del complemento SolidWorks Motion es posible simular el comportamiento de un motor en un entorno tan realista como diseñador configure la simulación. Para el estudio del mecanismo de remoción se propone el motor de la figura 24. Se puede apreciar que se presenta una velocidad que aumenta linealmente hasta que adquiere una velocidad nominal.

Con base en el motor propuesto, basta con realizar los estudios de movimiento respectivos. Se consideró los efectos de la gravedad y la especificación del material de cada

Figura 25. Motor propuesto para simulación de mecanismo

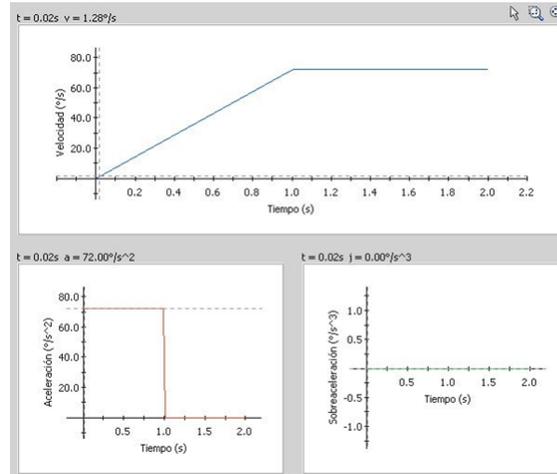


Foto tomada de *Solidwork*

uno de las piezas que conforman el mecanismo. Se tomaron mediciones del torque que experimenta el eje del motor y el consumo de energía. De esta manera se puede seleccionar un motor con un factor de servicio considerable para un desempeño seguro del mecanismo. La figura 25 muestra el torque que ejerce el motor para cumplir la velocidad definida mientras que la figura 26 muestra la potencia mecánica consumida por dicho motor.

Figura 26. Torque de motor según simulación

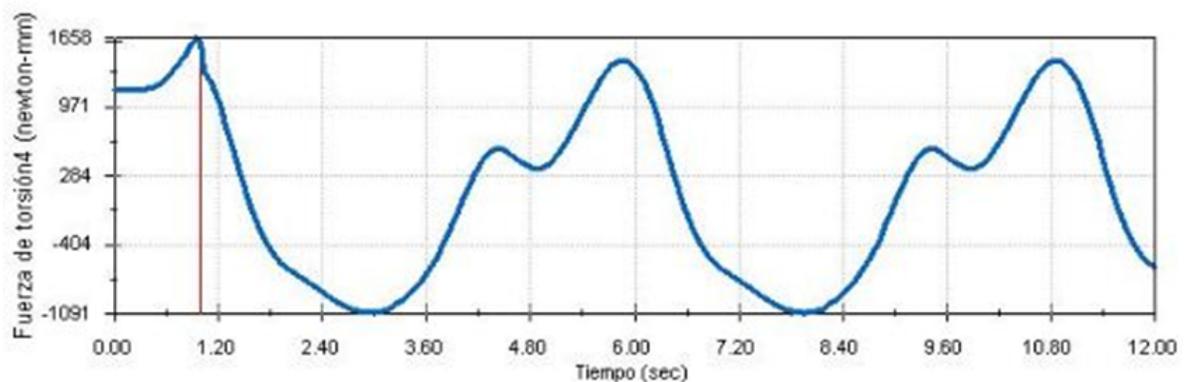


Foto tomada de *Solidwork*

Una de las grandes cualidades de este nuevo prototipo es la gran reducción de potencia comparado con la versión de eslabones de acero. Este avance facilita mucho la

Figura 27. Potencia de motor según simulación

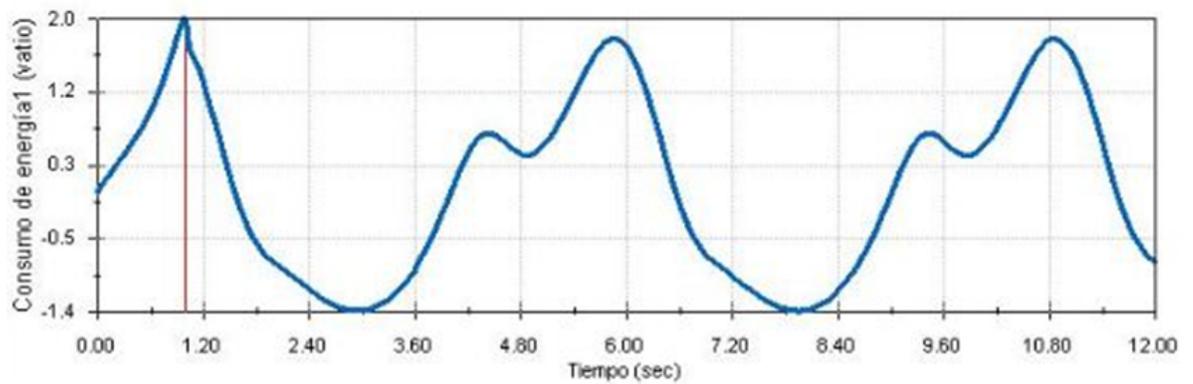


Foto tomada de *Solidwork*

implementación del prototipo y reduce los costos de los motores de manera significativa.

El estudio de movimiento también se puede realizar en el batidor. Sin embargo se ha omitido los efectos que ejerce el agua sobre el movimiento de esta pieza. Para compensar esta simplificación se optará por seleccionar un motor eléctrico que tenga un factor de servicio lo suficientemente considerable para hacer frente a estas variables.

Para el motor del batidor se ha determinado que tenga una velocidad de 100 RPM. Con base en esta consideración se cargan las propiedades del motor en la simulación y se obtienen los resultados de torsión y potencia de las figuras 27 y 28 respectivamente.

Figura 28. Torque del motor del batidor según simulación

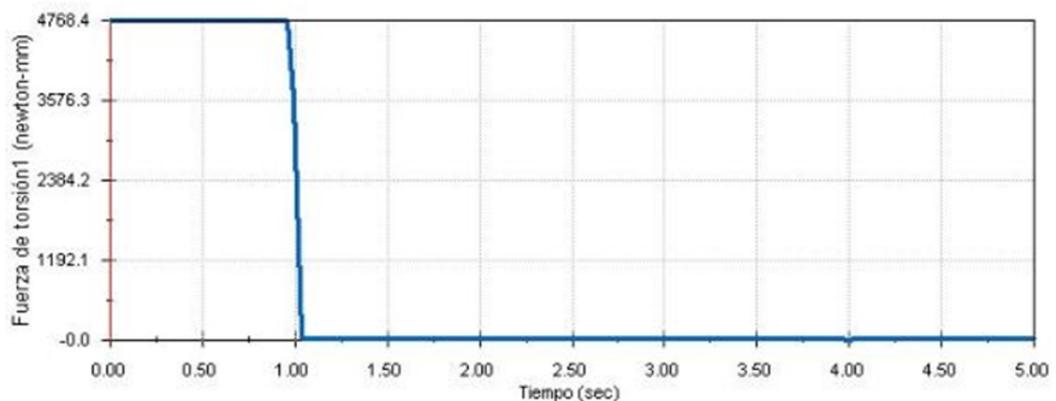


Foto tomada de *Solidwork*

Figura 29. Potencia de motor de batidor según simulación

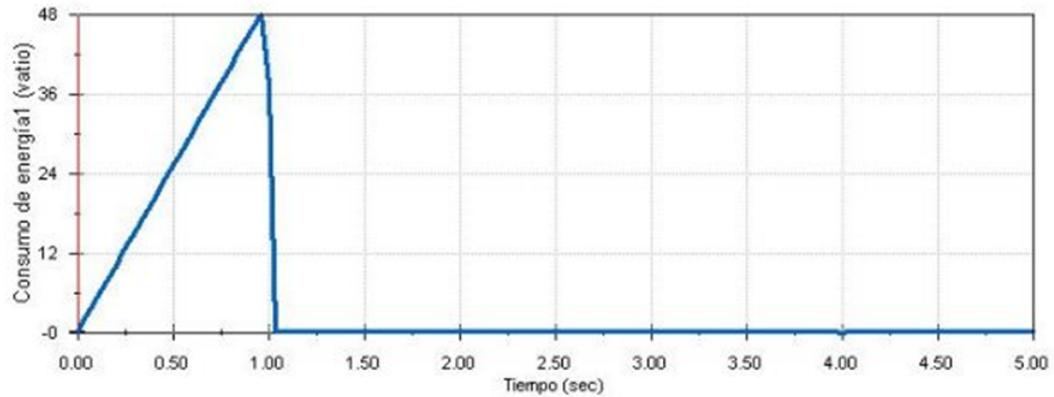


Foto tomada de *Solidwork*

En el caso del batidor se observan que se realiza un mayor consumo de potencia. Esto se debe a que las aspas del batidor están hechas de acero inoxidable, sin embargo por las dimensiones de la máquina aún se puede utilizar motores eléctricos de baja potencia.

#### 7.6.2. *Análisis de elementos finitos*

Para complementar los estudios de movimiento, Solidworks ofrece un complemento para el análisis de elementos finitos (FEA por sus siglas en inglés) para realizar estudios estáticos de estructuras. Esto resulta muy útil para analizar los efectos que ejerce el agua sobre el batidor, es decir que por medio de esta herramienta se puede simular los efectos de la presión hidrostática y la fuerza de empuje que el batidor experimenta al estar sumergido durante su operación. También se puede analizar el diseño del tanque que debe soportar el peso del agua, del batidor y la presión hidrostática en sus paredes laterales. De esta manera se puede realizar un trazado del factor de seguridad de cada una de las piezas del sistema propuesta.

El primero de los estudios de elementos finitos presente en este documento es el realizado sobre el batidor. Para ello, primero hay que tener en cuenta las siguientes consideraciones que definen las cargas que soportar el batidor.

- El batidor se encuentra sumergido a una profundidad fija. Esto implica que todo elemento debe experimentar presión hidrostática, siendo las aspas que se encuentran

a mayor profundidad las que experimentan una mayor presión.

- El batidor experimenta una fuerza de empuje que es proporcional al volumen que este desplaza.
- El agua es un fluido con cierta viscosidad que ofrece resistencia al movimiento de las aspas, sin embargo en este estudio se considera este efecto despreciable.

Figura 30. Trazado de esfuerzos de Von Mises del batidor

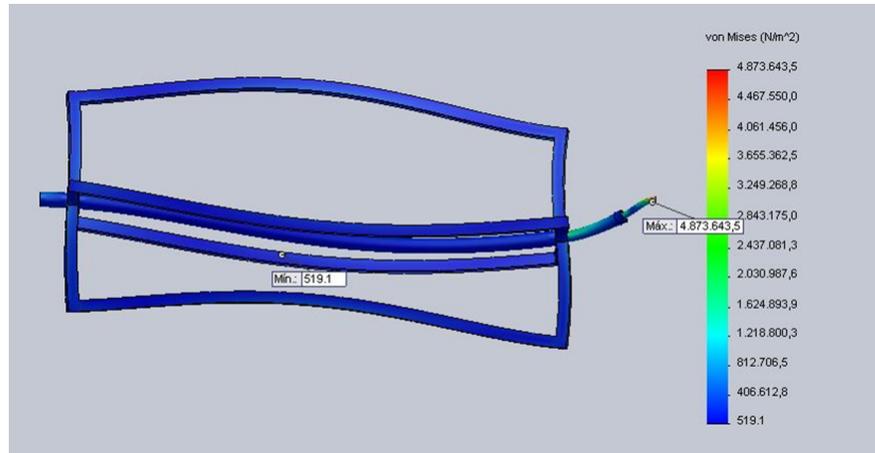


Foto tomada de *Solidwork*

La figura 29 muestra el análisis de elementos finitos del barredor con un trazado del esfuerzo de Von Mises. Se puede observar que con las condiciones actuales de diseño el batidor está lejos de alcanzar esfuerzos considerables; las deformaciones están exageradas con fines ilustrativos. Sólo en la zona en la conexión del eje del motor se evidencia un aumento considerable de esfuerzos porque es donde se concentra todo su peso y los efectos del agua. No obstante la figura 30 muestra que el eje actualmente opera de manera segura puesto que presenta un factor de seguridad elevado.

Otro de los elementos estudiados por medio de elementos finitos es el tanque, pieza fundamental en el diseño. Para analizarlo, es necesario tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Las paredes del tanque son afectadas por la presión hidrostática.
- La base del tanque debe soportar todo el peso del agua y peso del batidor.
- El peso del batido carga a una de las paredes.

Con base en ello se realizan los análisis de la pieza y se obtienen los resultados de

Figura 31. Trazado del factor de seguridad del batidor

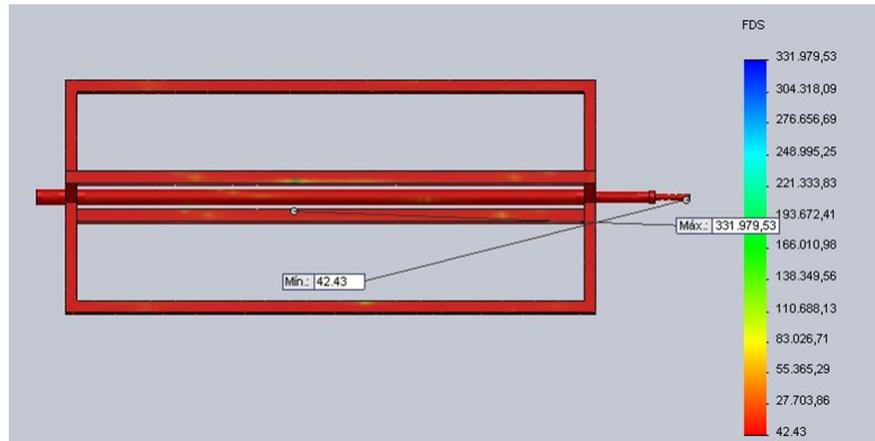


Foto tomada de *Solidwork*

esfuerzo de von mises. Estos se pueden ver en la figura 31. Dado que el material del tanque es acero inoxidable, se observa que los valores de esfuerzos no son lo suficientemente grandes como para alcanzar el límite de fluencia de un material metálico típico, el cual va desde el orden de decenas a hasta centenares de megapascuales, lo cual lleva a la idea de considerar la reducción de los espesores para bajar el peso y los costos de construir el tanque.

Figura 32. Esfuerzos Von Mises del tanque

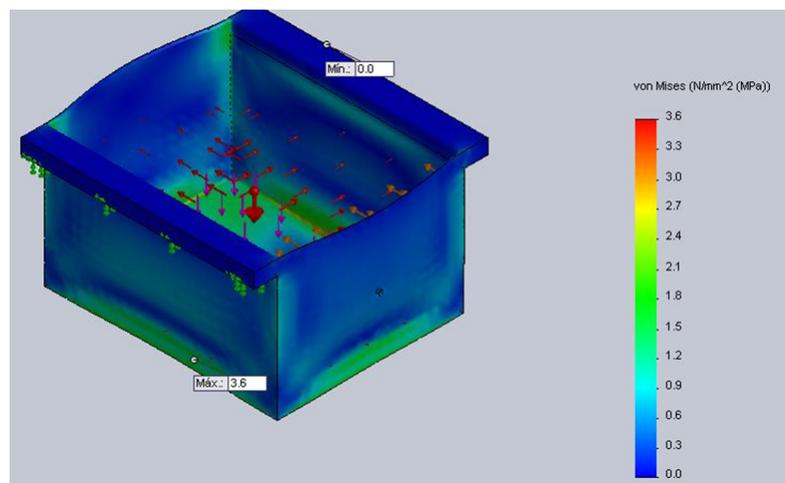


Foto tomada de *Solidwork*

## 7.7. IMPLEMENTACIÓN DE PROTOTIPO

Para visualizar cada una de las etapas del proceso automatizado, se procedió a construir un modelo que emule cada una de las fases que implican limpiar el café de todas las imperfecciones provocadas por plagas.

El mecanismo de remoción mostrado en la figura 33 está basado en el diseño realizado en Solidworks. Consta de eslabones de acrílico articulados por medio de rodamientos que otorgan los grados de libertad necesarios para el desempeño adecuado del mecanismo.

Figura 33. Mecanismo de remoción del prototipo



Fuente propia

El tanque fue elaborado con acero calibre 20. Se muestra el detalle en la figura 34. Cabe resaltar la ventaja de utilizar acero inoxidable de ser un material que no desprende residuos sobre el agua y por tal razón no afectará las propiedades del café. Será motivo de debate la posibilidad de usar un material diferente con el objetivo de reducir los costos de la máquina.

El tanque cuenta con las perforaciones para insertar el batidor. En la figura 35 se aprecia dicha pieza Este está fabricado de barras de acero soldadas para obtener la forma necesaria. Este será impulsado por un motorreductor de 12V que ofrece el torque necesario para que el batidor gire a una velocidad adecuada para este trabajo, alrededor

Figura 34. Tanque diseñado con lamina de acero



Fuente propia

de las 100RPM en este caso.

Figura 35. Batidor



Fuente propia

El sistema que controlara los actuadores y cada uno de los movimientos del prototipo sera un Arduino Mega, cabe resaltar que tambien se tienen circuitos de potencia para unos pocos actuadores, en su mayoría, motores D.C. En la figura 36 se puede apreciar un plano superior del prototipo.

Figura 36. Prototipo



(2).jpg

Fuente propia

## 8. PRESUPUESTO

ARTICULO	VU(COP)	CANT	Total(COP)
Sensor final de carrera	4.000	2	8.000
Lamina Acero inoxidable	520.000	2	1.040.000
Servo Motor 5V	59.500	1	59.000
Rodamiento lineal	40.000	1	40.000
Rodamiento de patines	3.750	8	30.000
Tubo PVC 1/2"	1.328	18	23.900
Rejilla de caucho	8.424	1	8,424
Tubo de cobre 12mm	7.650	1	7.650
Lamina Acrílico 5mm	51.000	2	102.000
Tornilleria	50.000	1	50.000
Ladrillo alcarra	740	100	74.000
Bulto cemento Argos	40.900	2	81.800
Valvula API 600	226.600	1	226.600
Transformador de alta tension	5.500.000	1	5.500.000
Motor AC monofasico 1 HP	270.000	1	270.000
PLC S7 1200 Siemens	720.000	1	720.000
Sensor de nivel	10.000	1	10.000
Valor intelectual	2.155.552	2	4.311.104
Variador de frecuencia Siemens	600.000	1	600.000
Servomotor truncado SKU 12v	55.000	1	55.000
Fuente conmutada	30.000	1	30.000
Accesorios de electrónica	50.000	1	50.000
-	TOTAL	-	13.297.478

## 9. RESULTADOS

Como resultado de este trabajo se ha desarrollado un estaque que satisface las necesidades de la finca El Manantial. Esto es posible gracias a que fue diseñado con base los niveles de recolección de café registrados en años anteriores. Además el estanque cuenta con un diseño robusto capaz de resistir el peso del batidor sin dificultad alguna tal como ilustra la figura 31; los esfuerzos que el estanque debe soportar no se acercan al límite elástico del acero utilizado para su implementación.

El diseño del batidor reflejado en las figuras 26 y 27 muestra que este puede operar bajo las condiciones deseadas de manera adecuada. Se aprecia un valor alto en el factor de seguridad del batidor al fabricarlo con acero inoxidable. De hecho, esto significa que puede optimizarse el diseño al reducirle espesor a las dimensiones del batidor sin que esto afecte su resistencia de manera considerable, sin embargo dicha posibilidad será tomada en cuenta después de realizar pruebas con el prototipo implementado.

## 10. CONCLUSIÓN

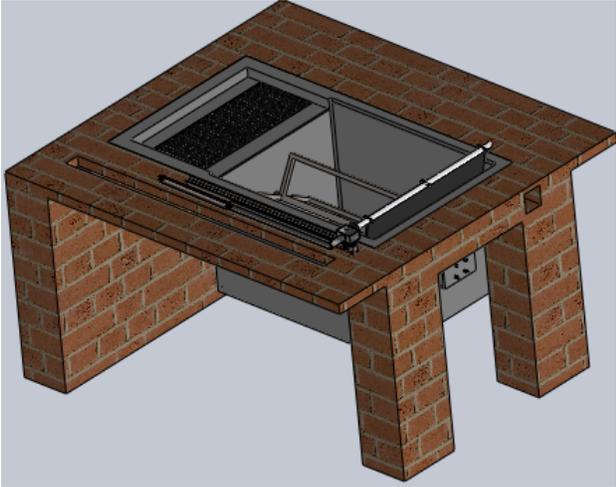
El sistema automatizado para la eliminación de granos defectuosos es un ejemplo claro de un sistema mecatrónico que otorga beneficios al sector productivo. En este caso en particular se trata de una mejora significativa en el procesado del café ya que la detección de defectos en los granos es una de las etapas más demoradas del proceso, y por medio de esta propuesta se obtienen reducciones significativas de tiempo en dicha etapa.

Por medio de este trabajo se resalta la relevancia de llevar la automatización de procesos industriales a sectores donde es poco o nula su práctica; de esta forma se puede optimizar los procesos realizados de manera artesanal de tal manera que se mejore la calidad de los productos terminados. El sector agrícola en Colombia representa un área en potencial para aumentar su competitividad a frente a otros países agrícolas al reforzar el empleo de distintas estrategias para instrumentar y automatizar las actividades rurales a Colombia.

Este proyecto de grado también resalta la importancia de la utilización la ingeniería asistida por computadora como herramienta fundamental para la simplificación de trabajos para diseñador, sobre todo en el área de los cálculos que pueden ser fácilmente realizados por algoritmos de métodos numéricos integrados en distintos softwares. La figura 38 muestra el diseño detallado del sistema automatizado.

Con base a los resultados obtenidos de este trabajo de grado, se puede proceder refinar el diseño de detalle para finalmente pasar a la etapa de implementación.

Figura 37. Diseño detallado del sistema automatizado



## BIBLIOGRAFÍA

- [1] ICA . Guía técnica para el beneficiado del café protegido bajo una indicación geográfica o denominación de origen. [En Línea]. ¡ <http://iica.int/Esp/regiones/central/guatemala/Documents/Guia> ¿. . [Citado el 05 de agosto del 2014].
- [2] WILBAUX, R. El beneficio húmedo del café. [En Línea]. Subdirección de ingeniería rural, 1964; ¡ [scienti.colciencias.gov.co:8084/publindex/docs/articulos/1692](http://scienti.colciencias.gov.co:8084/publindex/docs/articulos/1692) ¿. . [Citado el 07 de julio de 2014].
- [3] CAFÉ DE COLOMBIA. Proceso del café. . [En Línea]. ¡ <http://cafedecolombia.weebly.com> ¿. [Citado el 13 de abril de 2013].
- [4] DESCO. Control de calidad del café. . [En Línea]. ¡ <http://www.desco.org.pe> ¿. [Citado el 20 de Mayo de 2014 ].
- [5] DELGADO; Carlos. Libro del café. Editorial Alianza. Página 12-13. ISBN 9788420608273.
- [6] RANALD; Giles. Mecánica de fluidos e hidráulica. 3ra Edición; 2013. Pág. 71. ISBN 9789684229365.
- [7] ibíd. Pág. 96
- [8] ROCHA; Arturo, Hidráulica de tuberías y canales, 2011., Pág. 7-8. ISBN 9786034511002.
- [9] UNET; Universidad Nacional Experimental de Táchira. Concepto de bomba. [En Línea]. ¡ <http://www.unet.edu.ve/maqflu/doc/LAB?1?95.htm> ¿. [Citado el 29 de febrero de 2014].
- [10] ROCHA; Arturo, Hidráulica de tuberías y canales, 2011., ISBN 9786034511002. Óp. Cit, p. 91 ? 94.

- [11] ROCHA; Arturo, Hidráulica de tuberías y canales, 2011., ISBN 9786034511002. Óp. Cit, p. 150 ? 151.
- [12] BOLTON, W. Ingeniería de control moderno. Ediciones Alfaomega, 2006. 414 pág. ISBN 970-15-0636-7
- [13] MARIN, Gino; Control de Calidad del Café; Lima; Programa Selva Central; Desco, 2013; ISBN: 978-612-4043-46-8; p. 10.
- [14] LOPEZ; Elkin. Sistemas de lógica difusa en el proceso de secado de café en lecho fluidizado. [En Línea]. ¡ <http://www.scielo.org.co>. [Citado el 25 de septiembre de 2014].
- [15] ALVAREZ, Carlos. Propuesta De Automatización Del Proceso De Tostación De Café En Lecho Fluidizado. [En Línea]. ¡ <http://repositorio.utp.edu.co>. [Citado el 15 de Octubre del 2014].