

**SISTEMA DE CONTROL DE VELOCIDAD SINTONIZADO POR VISIÓN  
ARTIFICIAL DE UN RECIPIENTE PARA LA TOSTIÓN DE GRANOS DE  
CAFÉ.**

**HEIDER JAINOVER LINARES AGUIRRE**

**JORGE ANDRÉS MEJÍA URBANO**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO  
FACULTAD DE INGENIERIA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
SAN JUAN DE PASTO  
2013**

**SISTEMA DE CONTROL DE VELOCIDAD SINTONIZADO POR VISIÓN  
ARTIFICIAL DE UN RECIPIENTE PARA LA TOSTIÓN DE GRANOS DE  
CAFÉ.**

**HEIDER JAINOVER LINARES AGUIRRE  
JORGE ANDRÉS MEJÍA URBANO**

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

**DIRECTOR  
Mg. CAMILO LAGOS MORA  
INGENIERO MECÁNICO**

**CODIRECTOR  
Mg. JAIME ORLANDO RUIZ  
INGENIERO ELECTRÓNICO**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO  
FACULTAD DE INGENIERIA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
SAN JUAN DE PASTO  
2014**

## **NOTA DE RESPONSABILIDAD**

"La Universidad de Nariño no se hace responsable por las opiniones o resultados obtenidos en el presente trabajo y para su publicación prima las normas sobre el derecho de autor".

Acuerdo 1. Artículo 324. Octubre 11 de 1966, emanado del honorable consejo Directivo de la Universidad de Nariño.

**Nota de aceptación**

---

---

---

---

---

---

---

**Presidente de Tesis**

---

**Jurado 1**

---

**Jurado 2**

**San Juan de Pasto, marzo del 2014**

## **DEDICATORIA.**

*“El presente trabajo va dedicado a Dios por darme la vida y permitirme hacer parte de la gran familia de la universidad de Nariño, a mis padres por brindarme su apoyo incondicional y sacrificarse en todo sentido para sacar este proyecto adelante.”*

*Jorge Andrés Mejía Urbano.*

*“A Dios por haberme permitido llega hasta este punto.*

*A mis padres Anna Lucia Aguirre y Celso Román por haberme apoyado y guiado en todo momento, por sus consejos, sus sacrificios, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada, por su amor incondicional.*

*A mis abuelos María Stella, Ángel Augusto por su ejemplo y constante apoyo y en especial a mi abuelo Eliseo Linares quien desde el cielo me sigue ayudando y cuidando. Y a todos aquellos que participaron directa o indirectamente en la elaboración de este proyecto.*

*¡Gracias a ustedes!”*

*Heider Jainover Linares Aguirre*

## **AGRADECIMIENTOS.**

*Este trabajo no se habría podido realizar sin la colaboración de varias personas, agradecemos enormemente a los Ingenieros Jaime Orlando Ruiz y Camilo Lagos asesores de nuestro proyecto por su constante motivación, valiosas orientaciones, apoyo incondicional y confianza depositada en el grupo para el desarrollo de la investigación, quienes son además un modelo de profesionales a seguir comprometidos con el desarrollo de la región.*

*También a nuestros padres por estar presentes y apoyándonos en cada etapa del desarrollo de este proyecto para guiarnos hacia la consecución de nuestros objetivos.*

*Además a nuestros compañeros Otto Leonardo Chaves y Jorge Armando Jaramillo por su valiosa colaboración.*

## **TABLA DE CONTENIDO.**

	<i>pág.</i>
<b>GLOSARIO.....</b>	<b>14</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>18</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>19</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>20</b>
<b>1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....</b>	<b>23</b>
<b>1.1 OBJETIVOS.....</b>	<b>25</b>
1.1.1 Objetivo general.....	25
1.1.2 Objetivos específicos.....	25
<b>2. MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>26</b>
<b>2.1 EL CAFÉ.....</b>	<b>26</b>
<b>2.2 PROCESO PARA LA PRODUCCIÓN DE CAFÉ.....</b>	<b>27</b>
<b>2.3 PROCESO DE TOSTIÓN DE CAFÉ.....</b>	<b>28</b>
<b>2.4 SISTEMAS DE TUESTE.....</b>	<b>30</b>
<b>2.5 VISIÓN ARTIFICIAL.....</b>	<b>31</b>
2.5.1 Fuentes de luz.....	33
2.5.2 Sensores de imagen.....	34
2.5.3 Filtrado de imágenes.....	34
<b>3. METODOLOGIA.....</b>	<b>35</b>
<b>3.1 DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS PARA LA FABRICACIÓN DEL     RECIPIENTE DE TOSTIÓN.....</b>	<b>35</b>
3.1.1 Forma.....	35
3.1.2 Material.....	36
3.1.3 Dimensiones.....	37
<b>3.2 MODELAMIENTO DEL SÓLIDO EN 3D.....</b>	<b>38</b>
<b>3.3 RECIPIENTE PROVISIONAL.....</b>	<b>44</b>
<b>3.4 TOLVA PARA TOSTIÓN DE CAFÉ.....</b>	<b>45</b>

<b>3.5</b>	<b>ETAPA MECÁNICA.</b>	<b>50</b>
<b>3.6</b>	<b>FIRMWARE PARA EL SISTEMA DE VISIÓN ARTIFICIAL.</b>	<b>53</b>
3.6.1	Comunicación microcontrolador-pc.	54
3.6.2	Lectura de velocidad de la tolva de tostión.	55
3.6.3	Determinación de cambio de velocidad.	57
<b>3.7</b>	<b>SOFTWARE PARA EL SISTEMA DE VISIÓN ARTIFICIAL.</b>	<b>60</b>
3.7.1	Procesamiento de imágenes.	61
3.7.2	Comunicación pc-hardware.	63
3.7.3	Análisis de datos.	66
3.7.4	Complementos de la interfaz gráfica.	69
3.7.5	Librerías.	70
<b>3.8</b>	<b>HARDWARE PARA EL SISTEMA DE VISIÓN ARTIFICIAL.</b>	<b>72</b>
3.8.1	Tarjeta de adquisición de datos.	72
3.8.2	Etapas de potencia y aislamiento.	75
3.8.3	Encoder.	77
3.8.4	Sistema de toma de imágenes.	78
<b>3.9</b>	<b>PRUEBAS Y TRATAMIENTO DE DATOS OBTENIDOS CON EL MÓDULO DE VISIÓN ARTIFICIAL.</b>	<b>81</b>
3.9.1	Pruebas y tratamiento de datos para café crudo.	82
3.9.2	Pruebas y tratamiento de datos con café a un 20% del proceso de tostión.	90
3.9.3	Pruebas y tratamiento de datos con café a un 53.33% del proceso de tostión.	92
3.9.4	Pruebas y tratamiento de datos con café a un 100% del proceso de tostión.	94
3.9.5	Determinación de superficie de control.	96
<b>3.10</b>	<b>PROTOTIPO FINAL PARA TOSTIÓN DE CAFÉ.</b>	<b>98</b>
3.10.1	Hardware del prototipo final.	99
3.10.2	Firmware del prototipo final.	103
<b>4.</b>	<b>PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN.</b>	<b>110</b>
<b>5.</b>	<b>CONCLUSIONES.</b>	<b>116</b>
<b>6.</b>	<b>RECOMENDACIONES.</b>	<b>118</b>
<b>7.</b>	<b>REFERENCIAS.</b>	<b>119</b>



## ***TABLA DE FIGURAS.***

	pág.
<b>Figura 1.</b> Estructura interna de la cereza de café.....	<b>27</b>
<b>Figura 2.</b> Elementos de un sistema de visión artificial.....	<b>33</b>
<b>Figura 3.</b> Modelamiento en 3D del cilindro interno de la tolva.....	<b>40</b>
<b>Figura 4.</b> Vista de frente del modelo en 3D del cilindro interno.....	<b>40</b>
<b>Figura 5.</b> Vista exterior de la tolva modelada en 3D.....	<b>41</b>
<b>Figura 6.</b> Tapa del recipiente modelada en 3D.....	<b>42</b>
<b>Figura 7.</b> Modelamiento en 3D del dispositivo para la extracción del café.....	<b>42</b>
<b>Figura 8.</b> Tolva modelada en 3D completa.....	<b>43</b>
<b>Figura 9.</b> Vista trasera de la tolva de tostión modelada en 3D.....	<b>43</b>
<b>Figura 10.</b> Tolva de tostion provisional previa.....	<b>44</b>
<b>Figura 11.</b> Tolva de tostion provisional adecuada.....	<b>45</b>
<b>Figura 12.</b> Cilindro interno.....	<b>46</b>
<b>Figura 13.</b> Vista frontal del cilindro interno.....	<b>46</b>
<b>Figura 14.</b> Vista interior del cilindro interno.....	<b>47</b>
<b>Figura 15.</b> Vista frontal del cilindro externo.....	<b>48</b>
<b>Figura 16.</b> Tapa del recipiente de tostión.....	<b>48</b>
<b>Figura 17.</b> Vista interior del cilindro exterior.....	<b>49</b>
<b>Figura 18.</b> Agujero para la entrada de sensor.....	<b>49</b>
<b>Figura 19.</b> Vista trasera del dispositivo para la extracción de producto.....	<b>50</b>
<b>Figura 20.</b> Vista de perfil del dispositivo de extracción de café.....	<b>50</b>
<b>Figura 21.</b> Diagrama de flujo de sistema de comunicación microcontrolador-PC..	<b>55</b>

<b>Figura 22.</b> Diagrama de flujo de sistema de lectura de velocidad.....	<b>57</b>
<b>Figura 23.</b> Diagrama de flujo de sistema de determinación de cambio de velocidad de la etapa mecánica.....	<b>60</b>
<b>Figura 24.</b> Resultado de la aplicación del filtro a las imágenes capturadas.....	<b>62</b>
<b>Figura 25.</b> Parámetros de entrada y salidas del sistema de toma y filtrado de imágenes dentro del software CoffeeCam1.3.....	<b>63</b>
<b>Figura 26.</b> Interfaz gráfica primitiva. La gráfica ilustra el diseño de la interfaz gráfica primitiva donde se muestran los botones para el envío y recepción de datos.....	<b>64</b>
<b>Figura 27.</b> Parámetros de entrada y salida de la velocidad de la tolva dentro del software CoffeeCam1.3.....	<b>65</b>
<b>Figura 28.</b> Sección de reportes dentro del software CofeeCam1.3.....	<b>66</b>
<b>Figura 29.</b> Diagrama de flujo provisional del sistema de control de velocidad por medio de visión artificial.....	<b>67</b>
<b>Figura 30.</b> Diagrama de flujo definitivo del modulo de vision artificial para determinar la velocidad ideal.....	<b>68</b>
<b>Figura 31</b> Botón de Inicio-Mantener-Continuar dentro del software CoffeeCam1.3.....	<b>68</b>
<b>Figura 32.</b> Panel de reportes dentro del software CoffeeCam1.3.....	<b>70</b>
<b>Figura 33.</b> Diagrama de simulación en proteus del sistema de adquisición de datos.....	<b>74</b>
<b>Figura 34.</b> Tarjeta de adquisición de datos.....	<b>75</b>
<b>Figura 35.</b> Diagrama interno del optoacoplador 4N25.....	<b>76</b>
<b>Figura 36.</b> Diagrama de simulación en proteus de etapa de aislamiento y potencia.....	<b>77</b>
<b>Figura 37.</b> Módulo de aislamiento eléctrico y potencia.....	<b>77</b>
<b>Figura 38.</b> Encoder con el circuito de herradura.....	<b>78</b>
<b>Figura 39.</b> Vista frontal de la base para el sistema de toma de imágenes.....	<b>79</b>

<b>Figura 40.</b> Vista lateral de la base para el sistema de toma de imágenes.....	<b>79</b>
<b>Figura 41.</b> Diagrama de simulación en proteus del módulo de iluminación.....	<b>80</b>
<b>Figura 42.</b> Módulo de switcheo para iluminación.....	<b>80</b>
<b>Figura 43.</b> Reporte gráfico de velocidad de la tolva vs % área negra para 50gr de café crudo obtenido por el software CoffeeCam1.3.....	<b>83</b>
<b>Figura 44.</b> Curva de regresión aplicada a gráfico de velocidad de la tolva vs % área negra para 50gr de café crudo obtenido por el software CoffeeCam1.3.....	<b>84</b>
<b>Figura 45.</b> Reporte gráfico y su respectiva regresión aplicada a los datos de velocidad de la tolva vs %área negra para 500gr de café crudo. CoffeeCam1.3...	<b>84</b>
<b>Figura 46.</b> Reporte gráfico y su respectiva regresión aplicada a los datos de velocidad de la tolva vs %área negra para 1000gr de café crudo. CoffeeCam1.3.....	<b>85</b>
<b>Figura 47.</b> Reporte gráfico y su respectiva regresión aplicada a los datos de velocidad de la tolva vs %área negra para 1500gr de café crudo. CoffeeCam1.3.....	<b>86</b>
<b>Figura 48.</b> Grafica de velocidad ideal vs cantidad de café para café crudo.....	<b>88</b>
<b>Figura 49.</b> Grafica de ciclo de trabajo útil ideal vs cantidad de café para café crudo.....	<b>88</b>
<b>Figura 50.</b> Regresión lineal aplicada a datos de velocidad ideal vs cantidad de café para café crudo.....	<b>89</b>
<b>Figura 51.</b> Regresión exponencial aplicada a datos de ciclo de trabajo útil ideal vs cantidad de café para café crudo.....	<b>89</b>
<b>Figura 52.</b> Regresión polinómica de segundo orden aplicada a datos de velocidad ideal vs cantidad de café para café al 20% de tosti3n.....	<b>92</b>
<b>Figura 53.</b> Regresión polin3mica de tercer grado aplicada a datos de velocidad ideal vs cantidad de café para café al 53.3% de tosti3n.....	<b>94</b>
<b>Figura 54.</b> Regresión polinómica de tercer grado aplicada a datos de velocidad ideal vs cantidad de café para café tostado.....	<b>96</b>

<b>Figura 55.</b> Velocidad ideal de la tolva de tostión en función de la cantidad de café y su estado de tueste.....	<b>97</b>
<b>Figura 56.</b> Superficie de control de velocidad ideal de la tolva de tostión dependiendo de la cantidad de producto y el momento del proceso en que se encuentre.....	<b>98</b>
<b>Figura 57.</b> Diagrama de la simulación en proteus para el modulo final de adquisición de datos.....	<b>99</b>
<b>Figura 58.</b> Módulo de tarjeta de adquisición de datos final.....	<b>100</b>
<b>Figura 59.</b> Vista trasera del dispositivo final donde se observa el sistema de refrigeración y fusible de protección.....	<b>100</b>
<b>Figura 60.</b> Vista frontal del dispositivo final donde se observa salidas de potencia para el motor y sistema de iluminación, la entrada de información de encoder, el puerto para comunicación USB y botón de encendido y apagado.....	<b>101</b>
<b>Figura 61.</b> Vista superior del dispositivo final donde se observa la pantalla LCD 4x20, el teclado matricial 4x4, el potenciómetro de calibración de brillo de la pantalla, led RGB de aviso y pulsador de reinicio.....	<b>102</b>
<b>Figura 62.</b> Vista interna del prototipo final, donde se observa el módulo de adquisición de datos, la etapa de aislamiento y potencia para el motor, etapa de potencia para la iluminación y la fuente de alimentación.....	<b>102</b>
<b>Figura 63.</b> Diagrama de flujo del firmware para el dispositivo final de tostión de café.....	<b>109</b>
<b>Figura 64.</b> Diagrama de bloques del sistema de visión artificial desarrollado.....	<b>111</b>
<b>Figura 65.</b> Contraste entre café tostado mediante método tradicional y máquina sintonizada mediante visión artificial.....	<b>112</b>

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
<b>Tabla 1.</b> Resumen del proceso de tostión de café.....	<b>29</b>
<b>Tabla 2.</b> Densidad del café según su estado.....	<b>37</b>
<b>Tabla 3.</b> Características del motor de referencia ZD1632. ....	<b>51</b>
<b>Tabla 4.</b> Frecuencia de oscilación del pic18f4550 según el divisor previo del TMR2. ....	<b>59</b>
<b>Tabla 5.</b> Determinación de los límites por cada color para el filtro RGB de las imágenes. ....	<b>61</b>
<b>Tabla 6.</b> Configuración del oscilador para PIC18f4550. ....	<b>73</b>
<b>Tabla 7.</b> Base de datos obtenida para café crudo desde 50gr hasta 1500gr. ....	<b>87</b>
<b>Tabla 8.</b> Base de datos obtenida para café a 20% de tostión desde 50gr hasta 1500gr.....	<b>91</b>
<b>Tabla 9.</b> Base de datos obtenida para café a 53.3% de tostión desde 50gr hasta 1500gr.....	<b>93</b>
<b>Tabla 10.</b> Base de datos obtenida para café tostado desde 50gr hasta 1500gr....	<b>95</b>
<b>Tabla 11.</b> Cambio de constantes dependiendo del intervalo de tostión que se encuentre el producto. ....	<b>105</b>
<b>Tabla 12.</b> Ficha técnica del producto tostado #1. ....	<b>113</b>
<b>Tabla 13.</b> Ficha técnica del producto tostado #2. ....	<b>114</b>

## ***LISTA DE ANEXOS.***

Dentro del CD-ROM se encuentran los siguientes anexos.

**ANEXO A:** Planos cilindro interno.

**ANEXO B:** Planos cilindro externo.

**ANEXO C:** Planos de la cuchara.

**ANEXO D:** Código Pruebas.c.

**ANEXO E:** Archivo Netbeans Coffeecam 1.3.

**ANEXO F:** Datasheets.

**ANEXO G:** Script de Matlab Tratamiento Datos.

**ANEXO H:** Pruebas.

**ANEXO I:** PCBs para los circuitos impresos.

**ANEXO J:** Manual de usuario.

**ANEXO K:** Código CCS de Coffeecam 1.3.

## **GLOSARIO.**

**ACOPLE:** unir o encajar entre sí dos piezas o cuerpos de manera que se ajusten perfectamente.

**CCS COMPILER:** es el lenguaje C para microcontroladores.

**COFFEECAM:** software desarrollado para la realización de pruebas mediante un sistema de visión artificial.

**COMPLEMENTO A2:** este es un sistema que nos permite representar números binarios de forma negativa, en donde el MSB (Bit más Significativo) es el bit del signo.

**CSV:** son un tipo de documento en formato abierto sencillo para representar datos en forma de tabla, en las que las columnas se separan por comas (o punto y coma en donde la coma es el separador decimal: España, Francia, Italia...) y las filas por saltos de línea.

**DATASHEET:** es una superficie constituida por caminos o pistas de material conductor laminadas sobre una base no conductora. El circuito impreso se utiliza para conectar eléctricamente - a través de los caminos conductores, y sostener mecánicamente - por medio de la base, un conjunto de componentes electrónicos.

**DUTY:** es el porcentaje del ciclo de trabajo del PWM.

**ENCODER:** el encoder es un transductor rotativo, que mediante una señal eléctrica (normalmente un pulso o una señal senoidal) nos indica el ángulo girado.

**FILTRO:** un filtro es una ecuación matemática (denominada producto de convolución) que permite modificar el valor de un píxel según los valores de los píxeles contiguos, con coeficientes por cada píxel de la región a la que se lo aplica.

**FIRMWARE:** se conoce como firmware al conjunto de instrucciones de un programa informático que se encuentra registrado en una memoria ROM, flash o similar. Estas instrucciones fijan la lógica primaria que ejerce el control de los circuitos de alguna clase de artefacto.

**FRAME:** es una imagen particular dentro de una sucesión de imágenes que componen una animación. La continua sucesión de estos fotogramas producen a

la vista la sensación de movimiento, fenómeno dado por las pequeñas diferencias que hay entre cada uno de ellos.

**HARDWARE:** el hardware es la parte física de un ordenador o sistema informático, está formado por los componentes eléctricos, electrónicos, electromecánicos y mecánicos, tales como circuitos de cables y circuitos de luz, placas, utensilios, cadenas y cualquier otro material, en estado físico, que sea necesario para hacer que el equipo funcione.

**INTERFAZ DE USUARIO:** la interfaz de usuario es el espacio por medio del cual se pueden comunicar las personas con las máquinas para que así los usuarios puedan operar y controlar a la máquina, y que esta a su vez envíe retroalimentación para ayudar al operador a tomar decisiones y realizar tareas.

**JAVA:** es un lenguaje de programación de propósito general, concurrente, orientado a objetos y basado en clases que fue diseñado específicamente para tener tan pocas dependencias de implementación como fuera posible. Su intención es permitir que los desarrolladores de aplicaciones escriban el programa una vez y lo ejecuten en cualquier dispositivo, lo que quiere decir que el código que es ejecutado en una plataforma no tiene que ser recompilado para correr en otra.

**MATLAB:** es una herramienta de software matemático que ofrece un entorno (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M) y servicio de especie.

**MICROCONTROLADOR:** un microcontrolador es un circuito integrado o chip que incluye en su interior las tres unidades funcionales de una computadora: CPU, Memoria y Unidades de E/S, es decir, se trata de una computadora completa en un solo circuito integrado programable y se destina a gobernar una sola tarea con el programa que reside en su memoria. Sus líneas de entrada/salida soportan el conexionado de los sensores y actuadores del dispositivo a controlar.

**MÓDULO:** pieza o conjunto unitario de piezas que se repiten o encajan en una construcción de cualquier tipo.

**NETBEANS:** es un entorno de desarrollo integrado libre, hecho principalmente para el lenguaje de programación Java. Existe además un número importante de módulos para extenderlo. NetBeans IDE2 es un producto libre y gratuito sin restricciones de uso.



**PANEL:** en este caso, un panel de control es una herramienta que permite modificar diversos parámetros en la configuración de un software o de un hardware.

**PCB:** es una superficie constituida por caminos o pistas de material conductor laminadas sobre una base no conductora. El circuito impreso se utiliza para conectar eléctricamente - a través de los caminos conductores, y sostener mecánicamente - por medio de la base, un conjunto de componentes electrónicos.

**POLEA:** una polea es una rueda acanalada en todo su perímetro. Mediante un sistema formado por poleas y correas de transmisión se transmite movimiento entre diferentes ejes.

**PROTEUS:** es una compilación de programas de diseño y simulación electrónica, desarrollado por Labcenter Electronics que consta de los dos programas principales: Ares e Isis, y los módulos VSM y Electra.

**PWM:** es una técnica en la que se modifica el ciclo de trabajo de una señal periódica (una senoidal o una cuadrada, por ejemplo), ya sea para transmitir información a través de un canal de comunicaciones o para controlar la cantidad de energía que se envía a una carga.

**REGRESIÓN:** es un proceso estadístico para la estimación de relaciones entre variables. Incluye muchas técnicas para el modelado y análisis de diversas variables, cuando la atención se centra en la relación entre una variable dependiente y una o más variables independientes.

**RGB:** es la composición del color en términos de la intensidad de los colores primarios de la luz.

**SCRIPT:** archivo de órdenes o archivo de procesamiento por lotes, vulgarmente referidos con el barbarismo script (del latín scriptum, escrito), es un programa usualmente simple, que por lo regular se almacena en un archivo de texto plano. Los guiones son casi siempre interpretados, pero no todo programa interpretado es considerado un guion.

**SISTEMA DE CONTROL:** un sistema de control está definido como un conjunto de componentes que pueden regular su propia conducta o la de otro sistema con el fin de lograr un funcionamiento predeterminado, de modo que se reduzcan las probabilidades de fallos y se obtengan los resultados buscados.

**SLIDER:** un slider es un elemento de las interfaces gráficas que permiten seleccionar un valor moviendo un indicador o, en algunos casos, el usuario puede hacer clic sobre algún punto del slider para cambiar hacia ese valor.

**SOBRETOSTIÓN:** es un estado del café que ocurre cuando se le aplica de manera de forma excesiva una fuente de calor.

**SOFTWARE:** el software es el conjunto de instrucciones que las computadoras emplean para manipular datos.

**TOLVA:** se denomina tolva a un dispositivo similar a un embudo de gran tamaño destinado al depósito y canalización de materiales granulares o pulverizados, entre otros. En ocasiones, se monta sobre un chasis que permite el transporte.

**TORREFACCION:** la torrefacción es la operación en la cual son formados, bajo la acción del calor, los principios aromáticos que no existen previamente, en su mayoría, en la semilla del café. Consiste en calentar los granos a una temperatura que provoque modificaciones químicas, físicas y físico-químicas que hace que de éstos se pueda obtener una infusión cuyas cualidades sean satisfactorias.

**VISIÓN ARTIFICIAL:** también conocida como visión por computador (del inglés computer vision) o visión técnica, es un subcampo de la inteligencia artificial. El propósito de la visión artificial es programar un computador para que "entienda" una escena o las características de una imagen.

**WATCH DOG:** es un concepto de protección usado para volver a reiniciar el programa cuando éste "se pierde" o realiza una acción no prevista. Los watchdog existen físicos o por programa.

## ***RESUMEN.***

El proceso de tuestión de café, que es una de las etapas importantes que definen su calidad, dentro de la región nariñense no se aplica de manera correcta, debido a la existencia de pocos expertos en el tema, ya que dentro de esta fase es necesario controlar las variables físicas involucradas en el mismo, esta situación impide promover la competitividad de este producto no obstante catalogado como uno de los mejores del mundo.

Algunas de las tecnologías que se utilizan para el proceso de tuestión de café consisten en una tolva rotatoria en la cual se deposita el café verde para ser tostado por transferencia de calor a través de aire caliente directamente al grano. Es muy importante en esta forma de tostar café el control de velocidad del tambor rotatorio. En este documento se presentan los resultados de un sistema que controla la velocidad del tambor rotatorio haciendo un análisis de imágenes en las cuales se identifican unas variables que dan la pauta para controlar y optimizar esa variable.

Para determinar el método de diseño del dispositivo se realizaron diferentes prediseños y ensayos que permitieron establecer las características que debía tener el prototipo como son la forma, componentes y material del cual debía fabricarse la tolva de tuestión. Además de los métodos, algoritmos de control, acoples de señales eléctricas, microcontroladores, circuitos de potencia, etcétera que permitan garantizar el buen funcionamiento del dispositivo.

## ***ABSTRACT.***

The process of roasting coffee is one of the important steps that define its quality, in the department of Nariño not done properly because the physical variables involved in it are not controlled; this situation prevents to promote the competitiveness of however this product listed as one of the best in the world.

Some of the technologies used for coffee roasting process consist of a rotating hopper in which the crude coffee to be roasted by the heat transfer through hot air directly to the bead is deposited. It is very important in this way of roasting coffee speed control of the rotating drum. The results of a system that controls the speed of the rotary drum by image analysis in which some variables that set the tone for controlling and optimizing the variable identified are presented in this document.

To determine the design method and device different predesigned assays allowed to establish the characteristics that must have the prototype, such as how, components and equipment which was manufactured hopper roasting were performed. In addition to the methods, control algorithms, coupling of electrical signals, microcontrollers, power circuits, etc. that ensure the proper functioning of the device.

## **INTRODUCCIÓN.**

Este documento presenta de forma detallada la investigación, el desarrollo y la implementación de un sistema de control de velocidad de un recipiente de tostión con el objetivo de mejorar el proceso de torrefacción, lo que a su vez conduce a obtener un producto de mayor calidad contribuyendo a generar mayores oportunidades de explotación del producto y brindar una mejor calidad de vida para el sector cafetero de Nariño.

Como primera medida para cumplir este objetivo se hizo necesario realizar un estudio acerca de los sistemas tradicionales y los más utilizados actualmente en cuanto a tecnologías de tostión se refiere con el fin de realizar un diseño que permita aprovechar las ventajas que proporciona cada uno de estas. A partir de aquí se realiza un análisis de los aspectos técnicos como el material, las dimensiones, la forma, que debe cumplir el diseño, el cual es desarrollado mediante planos y modelado en 3D para su posterior fabricación. Para proporcionar movimiento al sistema fue necesario realizar un estudio de motores y de métodos de transmisión de movimiento con el fin de encontrar un conjunto que proporcionará la fuerza y velocidad requeridas para el desarrollo del proyecto.

Al tener el componente mecánico terminado, se desarrolla el firmware, es decir el código plasmado en el microcontrolador en el cual se tienen en cuenta aspectos de comunicación, lectura de velocidad y señal de control. Todo el firmware mencionado anteriormente encaminado al desarrollo del sistema de visión artificial, el cual está conformado por diferentes etapas. Como primera medida se encuentra el software en el cual se desarrolla un código que permite la interacción con el microcontrolador, una interfaz gráfica que realiza la toma, procesamiento y visualización de imágenes, además de una lectura y almacenamiento de datos. Otra de las etapas es el hardware en el cual se encuentran diferentes módulos, uno que proporciona la potencia a los actuadores, es decir al motor y la iluminación del sistema, otro que permite la adquisición de datos y por último uno que brinda la alimentación a todo el sistema en conjunto.

Con el sistema de visión artificial compuesto se realizan pruebas, a las cuales se les realiza su respectivo tratamiento y análisis para finalmente obtener un conjunto de ecuaciones, mediante las cuales se genera una superficie de control que describe los cambios de velocidad necesarios para obtener un movimiento ideal. A partir de aquí se describe el desarrollo de un prototipo para la tostión de café el cual está conformado por dos módulos, primero el de pruebas el cual permite realizar la calibración o sintonización de diferentes recipientes mediante visión artificial, y el segundo es el módulo de tostión el cual está diseñado para que dependiendo de la cantidad de producto que necesite tostar el usuario, este proporcione la velocidad ideal al sistema.

Finalmente dentro del documento se presentan los resultados que tuvo la investigación en cuanto a productos, beneficios y desventajas se refiere, además de realiza las debidas conclusiones y recomendaciones mediante las cuales se puede realizar mejoras al sistema.

## **1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.**

La obtención de café tostado de alta calidad se ha convertido en una oportunidad para el avance de la población cafetera. Colombia y específicamente Nariño, a pesar de ser una de las potencias en producción de café verde (crudo) con destacados atributos, en su gran mayoría no se han involucrado en el tratamiento de este fruto para sacar a flote sus excelentes propiedades por falta de oportunidades y capacitación, aun sabiendo que este proporcionaría un alto reconocimiento del departamento y fomentaría el desarrollo socio-económico de nuestra región. Dado que las tecnologías usadas actualmente son de difícil acceso para los cafeteros locales y los métodos tradicionales no proporcionan una solución completa a todas las necesidades requeridas para alcanzar altos estándares de calidad en el producto, no les ha sido posible involucrarse en este campo, perdiendo así la oportunidad de participar en el mercado de café procesado.

El desarrollo para la producción de café tostado, atraviesa varias etapas, desde la siembra y cosecha hasta el tueste y la molienda. Dentro de este proceso, la fase de torrefacción es una parte fundamental para obtener las características y propiedades, tales como el color, el aroma, el cuerpo y el sabor específico del grano. Para garantizar la calidad en la tostión del café, se debe tener en cuenta aspectos como las variaciones de temperaturas y el tiempo a las cuales estará sometido el producto, lo que se conoce como curvas de tostión[1]; otros de los aspectos a tener en cuenta es la uniformidad en el café tostado ya que el grano debe tostarse tanto exterior como interiormente, es decir una tostión homogénea. Día a día se buscan nuevas formas que permiten mejorar este proceso ya que la incorrecta aplicación de la etapa de torrefacción, causa un tueste disparejo de los granos de café, encontrando casos de café muy ligero, café crudo, café carbonizado, café horneado, tueste arrebatado (el grano de café sólo se tuesta en el exterior), etc.[2]

En gran medida los errores en el proceso de tostión se dan a causa de presencia de granos de tamaño y madurez irregulares, y principalmente la incorrecta aplicación de calor y la falta de movimiento del producto. Al adentrarse en el control de la etapa de tostión se hace necesario determinar la posibilidad de mejorar y optimizar este ciclo manipulando algunas variables físicas involucradas, es decir aspectos como la temperatura y tiempo de tostión, velocidad del recipiente de tueste y la distribución de calor, lo que permitiría garantizar la obtención de café de alta calidad. Por lo cual surge la siguiente inquietud ¿Cómo

es posible manipular la velocidad de giro del producto en una tolva de tuestión para lograr un tueste homogéneo del café?



## **1.1 OBJETIVOS.**

### **1.1.1 Objetivo general.**

Diseñar e implementar un sistema de control de la velocidad de giro del recipiente de tostión de granos de café sintonizado mediante visión artificial que permita mantener suspendidos la mayor cantidad de granos de café dentro de la tolva para obtener un tueste homogéneo.

### **1.1.2 Objetivos específicos.**

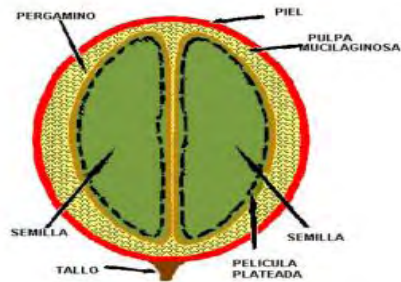
- Diseñar y elaborar un sistema mecánico, conformado por un motor acoplado a un tambor, para realizar el proceso de tostión de los granos de café.
- Diseñar y desarrollar el hardware y el software adecuado para el sistema de control de velocidad de giro del recipiente de tostión, que permita determinar el porcentaje de granos de café suspendido en el aire.
- obtener una base de datos donde se determine la velocidad ideal para diferentes cantidades de producto.

## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1 EL CAFÉ.**

El café es una semilla procedente del árbol del cafeto, perteneciente a la familia de las rubiáceas y género *coffea*. El café crece de manera apropiada en la zona tórrida en lugares que reúnen condiciones especiales de suelo, temperatura, altitud y radiación solar. Los suelos ricos en materia orgánica son ideales para el café. En general el suelo debe tener una profundidad de 80 cm para permitir la penetración de las raíces. El café se desarrolla en el curso de 32 semanas siguientes a la aparición de la flor en el cafeto; cambia desde el verde claro a rojo oscuro o a amarillo según la variedad, color en el cual ya se puede considerar maduro, para luego ser recolectado. La cereza del café, se forma en racimos unidos a las ramas por tallos muy cortos. El fruto del cafeto tiene la apariencia de una cereza pequeña. En el interior de cada cereza o drupa, hay dos semillas separadas por un surco y rodeadas de una pulpa amarilla. Son los granos de café. Los granos están protegidos por una película plateada y recubiertos por una pielecilla de color amarillo llamada tegumento o pergamino. La cereza o baya del café está formada por una piel, denominada exocarpio. El cambio en el color indica su grado de maduración. El exocarpio recubre la pulpa denominada mesocarpio, éste es de naturaleza mucilaginoso, que encierra en ella normalmente dos semillas, pegadas por su parte plana y recubiertas con una capa de coloración amarilla conocida como pergamino y finalmente está cubierto con una delgada membrana de tonalidad plateada como se observa en la Figura 1.[3]

Figura 1. Estructura interna de la cereza de café.



Fuente: Caracterización física de café semitostado, Yenni Alexandra Prieto Duarte [4]

## **2.2 PROCESO PARA LA PRODUCCIÓN DE CAFÉ.**

Dentro del proceso de producción del café existen diferentes aspectos que influyen de manera esencial en las características del producto final, empezando por la zona en donde se siembra, la cual debe estar apegada a distintos factores ambientales como son el suelo el cual es de mucha importancia ya que de éste depende la rapidez de crecimiento y el desarrollo de los árboles, el agua el cual es un componente vital para cualquier tipo de vida, el aire, la flora, la fauna e indispensablemente el clima que acoge todos los elementos antes mencionados. Para el pleno desarrollo de un cultivo de café es necesario tener en cuenta aspectos climáticos los cuales están definidos por la altitud y latitud de la zona y la temperatura a la cual normalmente se encuentra la zona.

Para llegar a producir un café de calidad hay que pasar por distintas etapas las cuales entre las cuales se encuentran; la recolección de café cereza, en la cual sólo deben cosecharse los cafés que hayan alcanzado el estado de madurez completa, es decir los granos que son de color rojo o amarillo, ya que si se recolectan granos de café verde el producto final, es decir la taza de café adquiere un mal sabor, actualmente este proceso en Colombia se realiza de forma manual. Otra de las etapas que hace parte del proceso de producción del café es el despulpado, este consiste en retirar la pulpa de la cereza y debe iniciarse inmediatamente después de que se cosechan los frutos, el retraso por más de 6 horas afecta la calidad de la bebida y puede generar el defecto llamando “fermento”. A partir de ahí el siguiente paso a llevar a cabo es la

fermentación, en el cual los granos deben estar en reposo para la extracción del mucílago y debe tenerse en cuenta el tiempo ya que de esto también depende la calidad en el sabor del café. Después están los procesos de lavado y secado en los cuales se eliminan todo el resto de la pulpa a partir de la abundante circulación de agua y se deja secar un tiempo aproximado de 30 horas para obtener el llamado grano de pergamino seco. Por último el proceso de trilla mediante el cual se elimina el pergamino y se obtiene finalmente el café verde[5].

### **2.3 PROCESO DE TOSTIÓN DE CAFÉ**

La tostión del café es un proceso en el cual intervienen mecanismos de transferencia de calor y de masa simultáneamente. Depende del tiempo y la temperatura, donde se inducen los cambios en el café verde produciendo los compuestos que originan el aroma característico, sabor, olor y cuerpo del café. Dentro del proceso de tostado se presentan cambios tanto físicos como químicos en el café verde, ya que cada grano aumenta su tamaño aproximadamente al doble y cambia tanto su color así como también su densidad. Su color pasa por distintas fases dependiendo de la absorción de calor, en primer lugar toma un color amarillo, después a un ligero color marrón y por último toma un color oscuro y aceitoso. Durante el proceso de tostión el grano pierde peso, alrededor de 15 y 20 por ciento, esto debido en su gran mayoría a la evaporación de su humedad y en menor medida a la pirolisis de algunos componentes. La composición química del grano sufre una importante transformación, tanto a nivel cuantitativo como a nivel cualitativo, azúcares, grasas, proteínas, sustancias nitrogenadas no proteicas y ácidos todo lo anterior sufre cambios debido a las altas temperaturas a las cuales se somete el grano. Normalmente el proceso de tostión debe realizarse en un recipiente cerrado con un agujero para la introducción del producto, este debe estar en continuo movimiento para evitar que los granos se quemen y así puedan afectar las propiedades organolépticas.

Dentro del proceso de tostión de café el producto debe pasar por las siguientes etapas.

- Desecación.
- Crecimiento.
- Disgregación.
- Tostado completo.

- Enfriamiento.

La desecación que es la primera fase, se presenta cuando el grano se encuentra aproximadamente a una temperatura de 100 grados centígrados en ese momento se desprende vapor de agua y comienza la volatilización. Cuando la temperatura alcanza los 120 o 130 grados centígrados el grano empieza a aumentar su volumen está es la etapa de crecimiento. Alrededor de los 180grados centígrados el olor comienza a ser característico y a causa de la pirolisis (descomposición de grandes estructuras químicas por medio de calor) aparecen productos gaseosos como vapor de agua, CO<sub>2</sub>, CO, compuestos volátiles por la descomposición de los carbohidratos, proteínas y grasas que son los causantes del aumento del volumen en el grano, el cual comienza a tomar una coloración marrón y la caramelización de azúcares. En este momento se inicia una fase de descomposición caracterizada por el rompimiento de la estructura celular de los granos debido a sobrepresiones internas (crepitación), producción de humo y la aparición del aroma del café, en éste instante las reacciones endotérmicas alcanzan su punto máximo. Cuando se alcanza la caramelización total de las azúcares del grano de café se puede decir que se alcanza la tostación completa en donde desciende el contenido de agua a valores que se encuentran entre el 1.5% y 3.5% en peso. El proceso de tuestión se lleva a cabo aplicando aire frio durante un cierto tiempo que varía según la cantidad de café y para mayor efectividad el producto debe estar en movimiento ya que los granos guardan mucho calor[6].

El proceso de tuestión se puede resumir en la siguiente tabla.

**Tabla 1. Resumen del proceso de tuestión de café.**

Temperatura del grano (°C)	Color	Volumen	Proceso
100	Amarillo		Desecación y pérdida de agua.
120-130	Castaño		Reacciones de reducción de azúcares y aminoácido.
130-180	Marrón	Aumenta	Caramelización de azúcares.
180-200	Marrón	Aumenta	Producción de CO <sub>2</sub> por pirogenación de carbohidratos,

			proteínas y grasas.
200-230	Marrón	Aumenta	Agrietamiento del grano (crepitación) y afloramiento del aceite en la superficie.
250	Negro sin brillo	Deja de Aumentar	Sobretostión, se carboniza y el aroma desaparece.

## 2.4 SISTEMAS DE TUESTE.

Dentro del proceso de tostión, el recipiente es una parte fundamental, el cual está sometido a los cambios que la evolución requiere. En un principio la herramienta usada para realizar este proceso constaba de una paila la cual se exponía directamente al fuego. Con el paso del tiempo, durante los siglos XV, XVI y XVII, se utilizaban sartenes agujeradas que se ponían sobre un lecho de carbón, también se utilizaban cilindros agujerados con un cigüeñal para el movimiento del producto. Durante el siglo XVIII y comienzos del XIX se utilizaban tambores verticales rotatorios fabricados con distintos metales como el hierro, el cobre y el latón lo que permitía mejor transmisión de temperatura y mayor resistencia y durabilidad.

Los primeros modelos de máquinas para el tueste de café se dividen en 4 diseños básicos que son:

- A. Bandejas y cajas de tostado: Las cuales se exponían directamente al fuego y se iba agitando para remover los granos.
- B. Artefactos de tipo sartén, con o sin tapa: Dispositivos de forma semiesférica, donde se movía el café a través de cucharones para la distribución relativamente homogénea del calor.
- C. Esferas: Para el perfeccionamiento de los sartenes se realizaron recipientes esféricos, los cuales incluían husos y un cigüeñal para facilitar el movimiento del producto además de permitir el ingreso de mayor cantidad de granos de café.

D. Cilindros: Son las máquinas que se manejan en la actualidad. Están constan de un eje el cual permite el movimiento mecánico. Estos se posicionaban sobre el fuego mediante unos soportes.

En el año 1920 una empresa italiana lanzó al mercado una tostadora con el cilindro perforado lo cual permitía una uniformidad en el tueste de café que no se había visto hasta el momento. Unos años más tarde un sistema que combinaba dos cilindros, uno interior que iba perforado y otro exterior sólido, este sistema permite la transmisión del calor entre el hueco que queda entre los dos y de esta forma se logra la conservación de energía.

En la actualidad existen métodos de tueste los cuales se dividen en dos grandes grupos que son las tostadoras por cargas y las tostadoras en continuo. Las tostadoras por tandas o cargas son el sistema más extendido y el procesos que se lleva a cabo dentro de la tolva tiene una duración de entre 12 y 18 minutos y el café se tuesta mediante aire caliente. En este sistema se consigue una gran uniformidad en el tostado tanto en el núcleo como en la superficie debido al reparto uniforme de calor y al movimiento constante del café dentro del bombo.

Las tostadoras continuas son un sistema para producciones rápidas, elevadas y continuadas, estas necesitan temperaturas muy elevadas y grandes caudales de aire, no existe calor por conducción solo por convección, el tiempo del proceso se encuentra entre los 5 y 6 minutos. Existen otro tipo de tostadoras, las cuales son las tostadoras para torrefacto, este utiliza un sistema de tueste esencialmente igual al tostado de café natural. Este tipo de tostadoras son una combinación de las de tipo tambor pero con un sistema de aportación de aire caliente. Por último se encuentra el tueste mixto el cual combina el tueste de tipo natural pero se le añade una etapa de enfriamiento.

## **2.5 VISIÓN ARTIFICIAL.**

La visión artificial es un campo de la inteligencia artificial que mediante la utilización de técnicas adecuadas, permite la obtención procesamiento y análisis de cualquier tipo de información a través de imágenes digitales. La visión artificial la componen un conjunto de procesos destinados a realizar el análisis de imágenes. Estos procesos son: captación de imágenes, memorización de la información, procesado e interpretación de los resultados.

Actualmente se usa en diversos procesos científicos y militares, extendiéndose su uso además, en un amplio rango de sectores industriales para la automatización de tareas anteriormente reservadas para la inspección visual humana. Este tipo de incremento en su utilización a nivel industrial es debido a que se trata de una tecnología especialmente útil en labores tanto de inspección así como también de supervisión, siendo cuantitativamente más objetivos y consistentes que la inspección humana. Un segundo aspecto complementario de estas técnicas es la automatización derivada de esta inspección y la posibilidad de actuar sobre el proceso de fabricación o inspección modificando parámetros de la máquina de producción. Las técnicas de visión artificial, como demuestra su gran uso en la industria, son particularmente apropiadas para la realización de trabajos visuales altamente repetitivos que sean fatigosos o difíciles de realizar para un operario, especialmente cuando este trabajo es ineficiente o costoso en términos económicos o temporales.

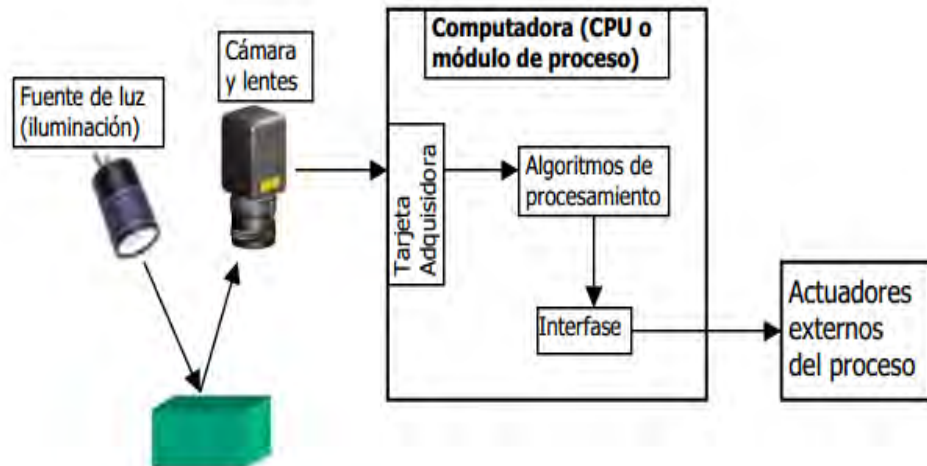
Un sistema de visión artificial se compone básicamente de los siguientes elementos:

- Fuente de luz: Es un aspecto de vital importancia ya que debe proporcionar unas condiciones de iluminación uniformes e independientes del entorno, facilitando además, si es posible, la extracción de los rasgos de interés para una determinada aplicación.
- Sensor de imagen: Es el encargado de recoger las características del objeto bajo estudio.
- Tarjeta de captura o adquisición de imágenes: Es la interfaz entre el sensor y la computadora o módulo de proceso que permite al mismo disponer de la información capturada por el sensor de imagen.
- Algoritmos de análisis de imagen: Es la parte inteligente del sistema. Su misión consiste en aplicar las transformaciones necesarias y extracciones de información de las imágenes capturadas, con el fin de obtener los resultados para los que haya sido diseñado.
- Computadora o módulo de proceso: Es el sistema que analiza las imágenes recibidas por el sensor para extraer la información de interés en cada uno de los casos implementando y ejecutando los algoritmos diseñados para la obtención de los objetivos.
- Sistema de respuesta en tiempo real: Con la información extraída, los sistemas de visión artificial pueden tomar decisiones que afecten el sistema productivo con el fin de mejorar la calidad global de producción.



Los elementos que forman un sistema de visión artificial se muestran en la Figura 2.

Figura 2. Elementos de un sistema de visión artificial.



Fuente: Apuntes de visión artificial, Anónimo[7]

### 2.5.1 Fuentes de luz.

Las fuentes de luz son de vital importancia en los sistemas de visión artificial y afectan de forma crucial a los algoritmos de visión que se vayan a utilizar bajo esas condiciones. Una iluminación arbitraria del entorno no suele ser aceptable ya que muy probablemente se obtengan imágenes con bajo contraste, reflexiones especulares, además de sombras y detalles falsos. Los objetivos de una iluminación adecuada son, básicamente, independizar las condiciones del entorno y resaltar los rasgos de interés de una determinada aplicación.

Existen varios tipos de iluminación que se usan frecuentemente dentro de los cuales se encuentran los siguientes:

- Iluminación posterior o backlight.
- Iluminación frontal oblicua y direccional.
- Iluminación frontal axial o difusa.
- Iluminación de día nublado (CDI).
- Iluminación de campo oscuro.
- Array de luces.

- Iluminación de campo claro o brillante.

### **2.5.2 Sensores de imagen.**

Los sensores de imagen son componentes sensibles a la luz que modifican su señal eléctrica en función de la intensidad luminosa que perciben. La tecnología más usada en este tipo de sensores es el CCD, el cual es un circuito integrado, el cual contiene un determinado número de condensadores acoplados o enlazados, un conjunto de compuertas lógicas, circuitería de control asociada y elementos fotosensibles. Bajo el control de un circuito interno, cada condensador puede transferir su carga eléctrica a uno o a varios de los condensadores que estén a su lado en el circuito impreso. Actualmente estos dispositivos se encuentran en la mayoría de cámaras fotográficas y de video digital siendo uno de los elementos principales dentro de estos[8].

### **2.5.3 Filtrado de imágenes.**

Cuando se adquiere una imagen mediante cualquier sistema de captura, por lo general esta no es directamente utilizable por el sistema de visión. La aparición de variaciones en intensidad debidas al ruido, por deficiencias en la iluminación o la obtención de imágenes de bajo contraste, se hace necesario un preprocesamiento de la imagen con el objetivo fundamental de corregir estos problemas, además de aplicar aquellas transformaciones a la imagen que acentúen las características que se deseen extraer de las mismas, de manera que se facilite las operaciones de las etapas posteriores. Las técnicas más utilizadas para realizar este proceso son:

- Conversión de los niveles de gris: El cual tiene como objetivo la mejora en la calidad de la imagen.
- Transformaciones geométricas: Los objetivos de esta son la corrección de la perspectiva y la reconstrucción tridimensional de los objetos de la escena.
- Transformación del histograma: Las transformaciones del histograma pueden facilitar la segmentación de objetos de la imagen, aunque habitualmente solo sirve para modificar el contraste de la imagen y el rango dinámico de los niveles de gris.
- Filtrado espacial y frecuencial: Dado que pueden suponer una importante modificación de la imagen original, generalmente solo se consideran filtrados aquellas operaciones realizadas en el dominio espacial o

frecuencial que suponen transformaciones pequeñas de la imagen original[9].

### **3. METODOLOGIA.**

En este apartado se describe el proceso para la implementación del sistema de control de velocidad de una máquina de tostión sintonizada por medio de visión artificial en la cual se tiene en cuenta aspectos mecánicos donde se menciona el desarrollo del recipiente de tostión y la forma de la cual se le proporciona movimiento. También se detalla las tarjetas electrónicas y un software que conforman la visión artificial, desarrolladas para la manipulación de los actuadores y la comunicación con la etapa mecánica. Finalmente se muestra un proceso de pruebas y resultados que se utilizan como base para la fabricación del dispositivo sintonizado, es decir totalmente independiente de comunicación con una unidad controladora.

#### **3.1 DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS PARA LA FABRICACIÓN DEL RECIPIENTE DE TOSTIÓN.**

Para la obtención de café de alta calidad es necesario tener en cuenta las técnicas más eficientes en cuanto al proceso de tostión se refiere, con un bajo consumo de energía para tener un producto competitivo, de buena calidad y a bajo precio, por esto se decide realizar un híbrido entre los métodos que se utilizan en los procedimientos de lecho fluido y convección, teniendo en cuenta características que permitan asegurar su resistencia y funcionamiento óptimo que brinde la capacidad adecuada para cantidades de producto establecidas[10].

##### **3.1.1 Forma.**

El dispositivo consta de un cilindro hueco rotatorio horizontal dentro del cual se trata de mantener el café en el aire, por lo cual se le añade unas aletas internas al tambor las cuales permiten una mayor movilidad del producto evitando que se adhieran a las paredes de la tolva, además este se encuentra perforado para que durante la torrefacción de los granos el polvillo generado por la cascarrilla sea expulsado, lo que evita la contaminación por gases de combustión. Además

cuenta con un eje el cual permite el acople con una etapa mecánica para el movimiento de este. También se le añade un tambor externo igualmente de forma cilíndrica que tiene como función proteger el producto de impurezas externas y mantener el calor, evitando así la pérdida de energía, el cual tiene un extremo abierto, para la entrada y salida de producto. También cuenta con tres orificios con la función de la introducción de aire, la salida del polvillo y uno de menor tamaño para el acople de sensores de temperatura. Además se le añade una tapa para mantener sellado el recipiente durante la torrefacción del producto.

Entre el tambor interno y externo se encuentran unos rodamientos los cuales permiten además de la movilidad, la estabilidad del cilindro interno. Como herramienta adicional una “cuchara” de forma semicilíndrica hueca, la cual se encarga de la introducción, la extracción ya sea del producto terminado o muestras de café mientras este se encuentra tostándose. Además al recipiente se le adaptara una base con el fin de mantener su estabilidad durante el proceso de torrefacción.

### **3.1.2 Material.**

Otro requerimiento a tener en cuenta es el material a utilizar, el cual debe cumplir con ciertas características tales como: alta resistencia a la temperatura y durabilidad, en este aspecto específicamente se necesita una resistencia a la corrosión y oxidación, lo que a su vez permite la higiene en el producto a tratar. El material que cumple estas especificaciones y se encuentra con facilidad en el mercado es el acero inoxidable, el cual es una aleación en la que el hierro es el componente principal, tiene un contenido de cromo superior del 12%, suele tener bajo contenido de carbono menor al 0.05%, contiene elementos como el níquel, cromo, molibdeno, niobio y titanio, los cuales poseen distintas características, que permiten el cumplimiento de los requerimientos ya mencionados [11].

Dentro de la gama de aceros inoxidables el más recomendable para la construcción de este tipo de dispositivos, relacionados con el procesamiento de alimentos, es el acero 304 el cual permite una fácil manipulación en cuanto al conformado y a la soldadura se refiere. La temperatura que resiste este material esta alrededor de los 870°C, y en servicio continuo soporta entre 425°C a 860°C antes de alterar sus propiedades [12]. Otro tipo de acero inoxidable viable para el desarrollo del recipiente es el 430, que brinda ventajas como mayor resistencia a la corrosión y a la temperatura además de tener un menor costo, una desventaja

importante respecto al acero inoxidable 304 es su manipulación al ser menos conformable y soldable [13].

### 3.1.3 Dimensiones.

Al tratarse de un prototipo para laboratorio de catación de café el dispositivo requiere un tamaño moderado para el tueste desde cantidades pequeñas alrededor de los 100gr hasta aproximadamente 2Kgr, para ello se requiere de un recipiente capaz de alojar estas cantidades. Teniendo en cuenta esto y que el grano de café varía su volumen y masa, es decir su densidad a lo largo del proceso de torrefacción como se observa en la Tabla 2, se realiza el cálculo aproximado del volumen necesario para el cilindro interno de la tolva[14].

**Tabla 2. Densidad del café según su estado.**

ESTADO DEL CAFÉ	DENSIDAD APARENTE (gr/cm <sup>3</sup> )
Café pergamino seco	0,38
Café verde, excelso	0,68
Café tostado en pepa	0,25-0,36

Para el cálculo de volumen se tiene en cuenta las diferentes densidades, y se opta por tomar la de menor valor ya que la relación entre densidad y volumen es inversamente proporcional de acuerdo a la ley física expresada por la ecuación 1:

$$\rho = m/V \quad (1)$$

Dónde:

- $\rho$  es densidad en gr/cm<sup>3</sup>.
- $m$  es masa en gr.
- $V$  es volumen en cm<sup>3</sup>.

Como se observa en la Tabla I el menor valor de la densidad es cuando el café se encuentra tostado es decir 0,25 gr/cm<sup>3</sup>, por lo cual es este el factor a utilizar; se debe tener en cuenta que la máxima cantidad de producto que se va a tostar es de 2Kgr es decir 2000gr. Por lo tanto el cálculo de volumen mínimo del recipiente se obtiene de la siguiente manera.

$$V_{\text{mínimo}} = \frac{m_{\text{max}}}{\rho_{\text{min}}} \quad (2)$$

Operando se tiene que.

$$V_{\text{mínimo}} = 8000 \text{ cm}^3 \quad (3)$$

Ya que la forma del recipiente es cilíndrica se debe tener en cuenta la siguiente ecuación para el volumen.

$$V_{\text{cilindro}} = \pi * h * r^2 \quad (4)$$

Dónde.

- $V_{\text{cilindro}}$  es volumen en  $\text{cm}^3$ .
- $h$  es altura en cm.
- $r$  es radio en cm.

Por lo tanto las medidas de altura ( $h$ ) y radio ( $r$ ) deben escogerse de tal manera que el valor del volumen sea mayor al valor establecido en la ecuación 4 (volumen mínimo), además de que conserven una proporción adecuada en la forma.

La herramienta de extracción e introducción de productos y la toma de muestras al ser de forma semicilíndrica deben tener dimensiones menores a los de altura y radio del cilindro interno sin embargo deben estar cercanas a las escogidas para dichos valores.

### **3.2 MODELAMIENTO DEL SÓLIDO EN 3D.**

Para el desarrollo del recipiente de tostión es necesario elaborar un boceto que cumpla con las características ya establecidas y sirva como guía durante el proceso de fabricación, para esto se requiere de una herramienta informática que permita realizar un diseño en 3D, así como también la posibilidad de visualizar el objeto en 2D para la fabricación de planos. El programa que brinda estas utilidades y se adecua a lo necesitado es el software llamado AutoDesk Inventor el cual permite el modelado paramétrico de sólidos en 3D, dentro de este paquete se pueden diseñar piezas las cuales se pueden combinar en ensamblajes, donde influyen tres factores fundamentales que son la geometría, las dimensiones y el

material lo que permite construir con exactitud prototipos para la industria y la ingeniería.

La tolva de tostión está formada por varias piezas que pueden modelarse individualmente como son:

- Recipiente interno: esta pieza tiene forma cilíndrica con un extremo abierto para la introducción y extracción del producto, con un eje acoplado al otro extremo donde se genera el movimiento rotacional, con superficie perforada para la circulación de aire y la expulsión del polvillo generado en el proceso de tostión, aletas internas de aproximadamente 3cms de alto y se prolongan a lo largo del cilindro permitiendo la movilidad del producto y rodamientos externos que sirven como soporte, generando estabilidad. Las medidas escogidas para guardar proporción entre las dimensiones del cilindro y superar el volumen mínimo establecido se determinaron de la siguiente manera:

Se tomó como referencia para el volumen una capacidad de  $10.000 \text{ cm}^3$ . A partir de esto se procede a realizar los cálculos de radio y altura teniendo en cuenta la ecuación 5. Al tener dos variables con una sola ecuación es necesario determinar un valor, y con esto encontrar la otra medida. En este caso se estableció el valor del radio, con un valor de 10 cm. Aplicando la ecuación 6 se obtiene el valor de la altura.

$$h = \frac{V_{cilindro}}{\pi * r^2} \quad (5)$$

Reemplazando los valores que se determinaron se tiene que.

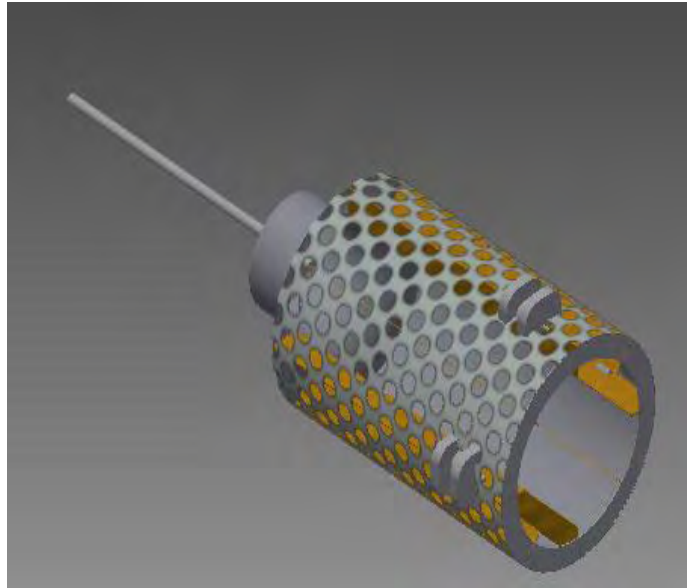
$$h = \frac{10000 \text{ cm}^3}{\pi * (10 \text{ cm})^2} \quad (6)$$

Entonces.

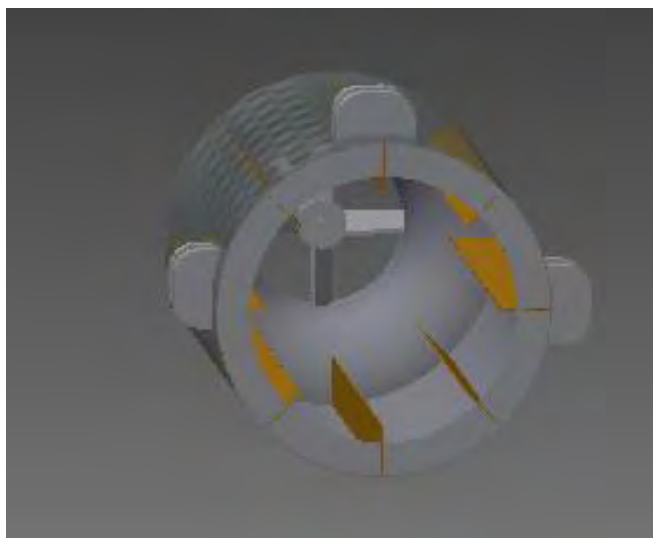
$$h = 31.83 \text{ cm} \quad (7)$$

Con estas características y dimensiones del cilindro interno se procede a realizar el diseño del sólido en 3D, además de los planos incluidos en el CD-ROM en la carpeta de ANEXO A, obteniendo los resultados que se pueden visualizar en la Figura 3 y Figura 4.

**Figura 3.** Modelamiento en 3D del cilindro interno de la tolva.



**Figura 4.** Vista de frente del modelo en 3D del cilindro interno.

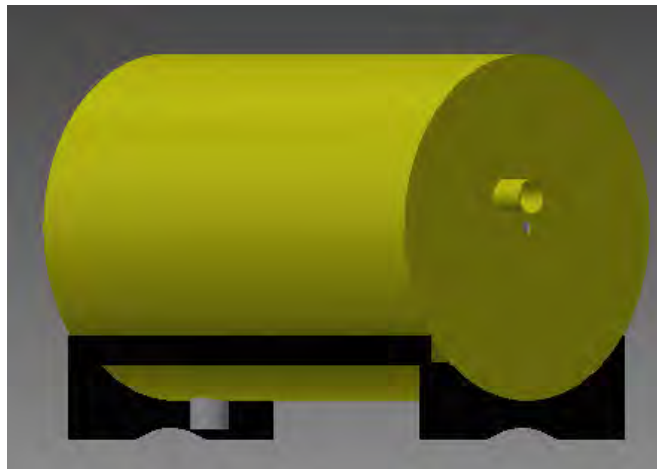




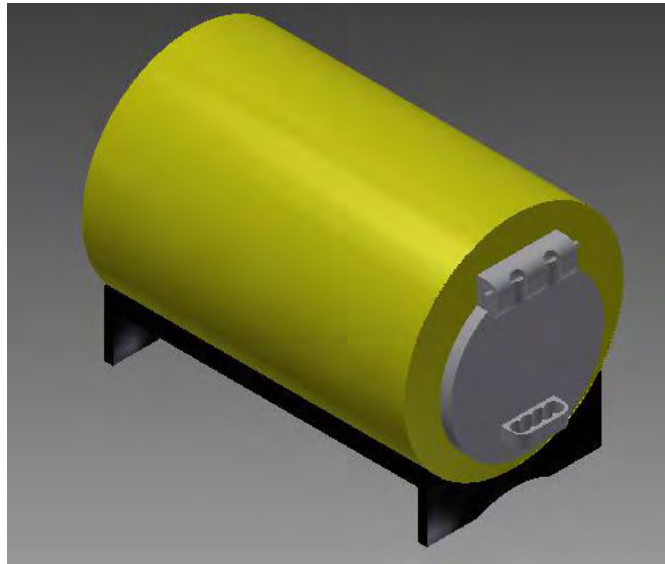
- Recipiente externo: esta pieza al igual que el recipiente interno tiene una forma cilíndrica con el fin de proteger el producto contra impurezas y conservar la energía; las dimensiones deben ser mayores a la del cilindro interno por lo cual la altura y radio que se han tomado son de 38.86cms y 26.41cms respectivamente cumpliendo la condición requerida. Consta de 3 orificios los cuales tienen como función la entrada y salida para el aire con un diámetro de 1" y uno de menor tamaño para la introducción de un sensor de temperatura. En uno de los extremos, donde se realiza la introducción y extracción del producto tiene un sistema de sellado que permite tener un dispositivo hermético. Todo lo mencionado anteriormente se soporta en una base sencilla que permita su estabilidad.

Con estas características y dimensiones del cilindro externo se procede a realizar el diseño del sólido en 3D además de los planos incluidos en el CD-ROM en la carpeta de ANEXO B, obteniendo los resultados que se pueden visualizar en la Figura 5 y Figura 6.

**Figura 5.** Vista exterior de la tolva modelada en 3D.



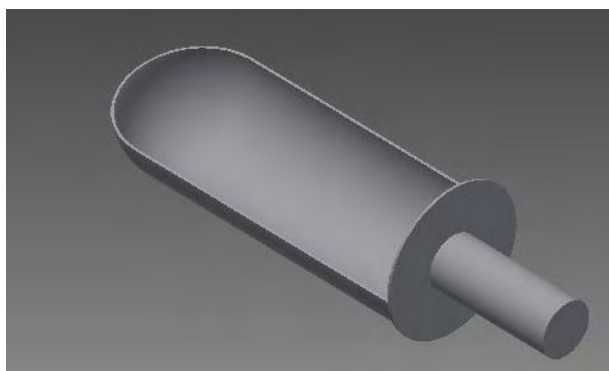
**Figura 6.** Tapa del recipiente modelada en 3D.



- Dispositivo de introducción y extracción del producto: esta pieza tiene una forma semicilíndrica con un largo y radio de 30,22cm y 18cm respectivamente, siendo un poco inferiores a las dimensiones del cilindro interno, esto acoplado a un mango de 12,95cm que permite su manipulación.

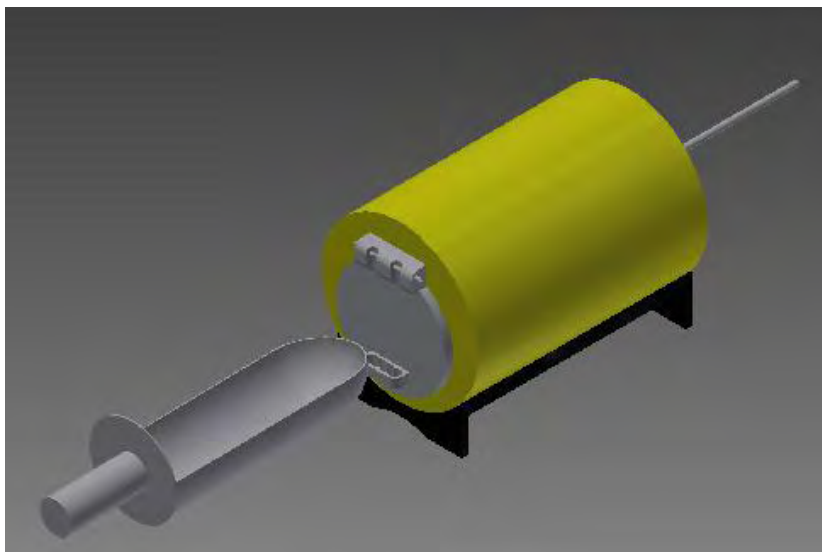
Con estas características y dimensiones del dispositivo de introducción y extracción del producto se procede a realizar el diseño del sólido en 3D además de los planos incluidos en el CD-ROM en la carpeta de ANEXO C, obteniendo los resultados que se pueden visualizar en la Figura 7.

**Figura 7.** Modelamiento en 3D del dispositivo para la extracción del café.

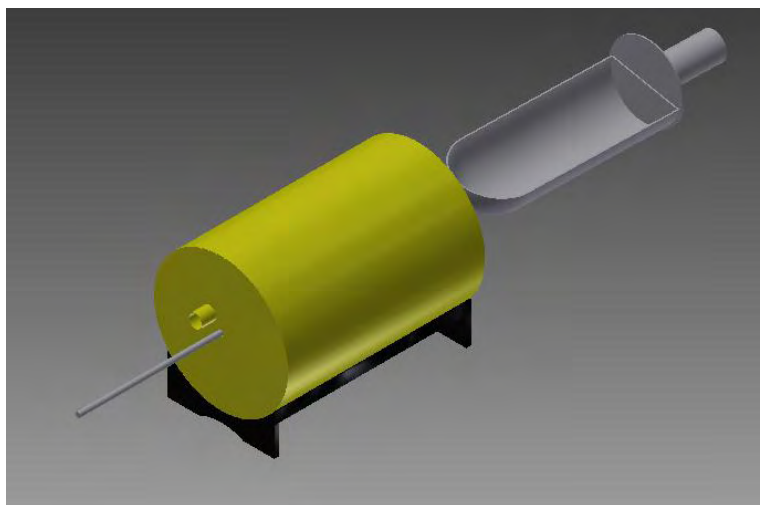


El modelo del sólido en 3D con todas sus piezas en conjunto se lo puede observar en las Figura 8 y Figura 9.

**Figura 8.** Tolva modelada en 3D completa.



**Figura 9.** Vista trasera de la tolva de tostión modelada en 3D.



### 3.3 RECIPIENTE PROVISIONAL.

Ya que la fabricación de la tolva de tostión requirió de presupuesto, además de un tiempo considerable para su construcción se hizo necesaria la elaboración de un recipiente provisional con características similares en cuanto a medidas y forma del recipiente interno para la realización de pruebas. Para desarrollar este recipiente se utilizó un contenedor metálico pequeño de pintura ya que este tiene medidas similares a la del cilindro interno del diseño original, para representar las paletas ilustradas en el diseño del tambor interno se tomaron trozos metálicos de aproximadamente 30 centímetros de largo y 6 centímetros de ancho, a partir de estos se procedió a adherirlas a la parte interna del tambor como se observa en la Figura 10. También se realizó el acople a la parte mecánica sin la necesidad de engranajes, piñones o poleas ya que se hizo directamente al motor. El motor que se utilizó para este prototipo previo fue el modelo YA-030 el cual es un motor DC que funciona con 30 voltios. Para estabilizar y darle una mejor movilidad al recipiente se hizo necesario articular una balinera a la parte delantera, además se fijaron 2 soportes a los costados para que el cilindro mantuviera su movimiento en torno a su eje.

Figura 10. Tolva de tostion provisional previa.



Para hacerse una idea del movimiento del producto dentro del recipiente para establecer las características que debe tener el posterior sistema de visión artificial se reemplazó la tapa por una capa plástica transparente, además se le dio un

color blanco a la parte interna con el fin de diferenciar más fácilmente el café suspendido dentro de este como se observa en la Figura 11.

**Figura 11.** Tolva de tostion provisional adecuada.



A partir de este dispositivo se procede a avanzar en aspectos como la lectura de velocidad y el hardware necesario para la manipulación del actuador.

Con el fin de avanzar en aspectos como la manipulación del actuador y poder sensar su velocidad se decide hacerlo por medio de un algoritmo que realiza conteos por medio de un encoder con 50 orificios que proporciona mayor exactitud, además se utilizó un sensor óptico de referencia IA51HR tipo herradura, que funciona a 5 voltios.

### **3.4 TOLVA PARA TOSTIÓN DE CAFÉ.**

A partir del diseño de la tolva de tosti3n en 3D y de las características f3sicas establecidas en los apartados 3.1 y 3.2, se procede a la fabricaci3n de las tres piezas principales comenzando por el cilindro interno, que result3 con dimensiones de 10cm de radio y 32cm de altura con aletas internas de 3cm, todo esto acoplado a un eje de 10cm. Respecto al dise1o original no se presentaron cambios significativos en cuanto a sus medidas, sin embargo el soporte del eje ha cambiado su forma c3nica por una plana, por facilidad y econom3a en material. Las perforaciones en la superficie lateral son de 1mm de diámetro con una separaci3n de 5mm para evitar p3rdidas de calor en el momento de aplicarle aire caliente. En el extremo abierto tiene un anillo de 3,2cm de ancho, adem3s en el extremo cerrado tiene una malla que permita la libre circulaci3n del aire caliente y mantiene el producto dentro de la tolva. El resultado obtenido se puede observar en las Figura 12, Figura 13 y Figura 14.

**Figura 12.** Cilindro interno.



**Figura 13.** Vista frontal del cilindro interno.



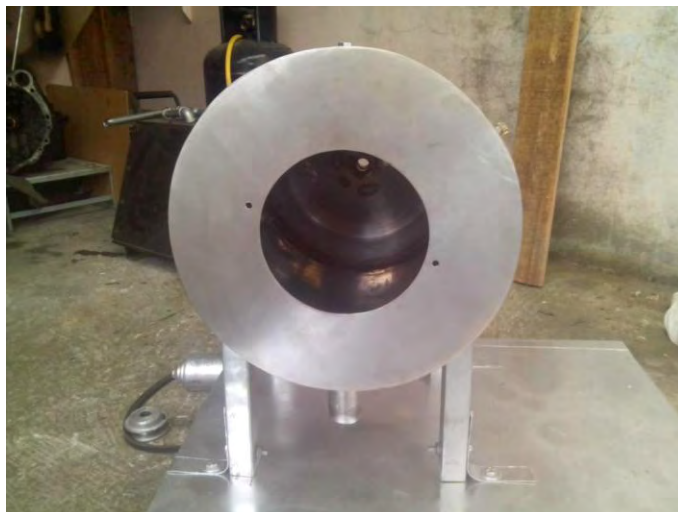


**Figura 14.** Vista interior del cilindro interno.



La siguiente pieza que se procede a construir es el cilindro externo, que es una camisa de acero inoxidable como se había especificado anteriormente, con medidas de 32,5cm de altura, 14,5cm de radio. También consta de un anillo que se acopla al extremo abierto del cilindro de 7,7cm de ancho, con una tapa separada construida con el mismo material que tiene un radio de 17,5cm, en su extremo cerrado tiene 2 orificios, uno de ellos acoplado a un buje de bronce para disminuir la fricción de 5/8 de pulgada por donde pasa el eje, el otro con un diámetro de 1 pulgada, por donde se conecta la entrada de aire. A un lado se encuentra una perforación de 1cm de diámetro por donde se introduce un sensor de temperatura. En su parte inferior se encuentra una abertura de 1 pulgada de diámetro por donde saldrán las impurezas durante el proceso de tostión como gases de combustión y basurillas. En la pared interior se fijó tres rodamientos de acero inoxidable con la función de movilidad y estabilidad. Todo esto adherido a una base simple que consta de cuatro patas de 20cm de largo. El resultado obtenido se puede observar en las Figura 15, Figura 16, Figura 17 y Figura 18.

**Figura 15.** Vista frontal del cilindro externo.



**Figura 16.** Tapa del recipiente de tostión.





**Figura 17.** Vista interior del cilindro exterior.



**Figura 18.** Agujero para la entrada de sensor.



Por último la tercera pieza que es la encargada de la introducción y extracción del producto y muestras, la cual tiene una forma semicilíndrica de 8cms de radio y 32cms de largo, con un agujero de diámetro 5/8 de pulgada que se adapta al eje que esta acoplado al cilindro interno para permitir la estabilidad en el momento de la extracción del producto en movimiento. Esto acoplado a una lámina circular de 8,7cms de radio que sirve como tapa de la tolva de tostión, todo esto adherido a un mango de 13,5cms de largo que facilita su manipulación. El resultado obtenido se puede observar en las Figura 19 y Figura 20.

**Figura 19.** Vista trasera del dispositivo para la extracción de producto.



**Figura 20.** Vista de perfil del dispositivo de extracción de café.



### **3.5 MÓDULO MECÁNICO.**

Para permitir la rotación al cilindro interno de la tolva de tostión es necesario acoplarle un sistema integrado que proporcione la transmisión del movimiento con la fuerza y velocidad adecuadas, ya que el motor utilizado en el prototipo provisional no genera la fuerza requerida para la rotación del cilindro final, debido

a que este tiene mayor peso y genera fricción. Para ello se hace necesario realizar un estudio de las diferentes clases de motores y escoger el que mejor se ajuste a las condiciones requeridas. Debido a que se necesita un ahorro en el consumo de energía, menor costo y una mayor facilidad en el control electrónico se escoge un motor DC, aquel que cumple las necesidades para el desarrollo del sistema y además se encuentra con facilidad en el mercado, es un motor de limpiaparabrisas de automóvil de referencia ZD1632, que tiene las siguientes características:

**Tabla 3. Características del motor de referencia ZD1632.**

REFERENCIA	ZD1632
POTENCIA	80 W
VOLTAJE	12 V
CORRIENTE	6 A
FUERZA DE TORSIÓN(TORQUE)	50N.m
VELOCIDAD MAX.	50 rpm

Fuente: Productos motor.

Debido a que el motor utilizado posee el torque necesario para el sistema, pero una baja velocidad se hace necesario implementar un sistema de poleas que permita acoplarse mejor a este objetivo. Para esto se utiliza el modelo de ganancia de velocidad, donde se usan dos poleas de diferentes dimensiones, donde la de mayor diámetro se la coloca en el eje conductor y la de menor diámetro en el eje conducido. Para el sistema se hace necesario que la velocidad de la polea conducida se encuentre entre el doble y el triple de la velocidad de la polea conductora, es decir que la relación entre las poleas entregue un factor de ganancia de velocidad de 2 a 3. Se estableció el diámetro de la polea conducida con una medida de 2.5pulg a partir de la cual se procede a calcular el diámetro de la polea conductora para factores de ganancia de 2 y 3 mediante la ecuación 9.

$$i_{12} = \frac{D_2}{D_1} = \frac{v_2}{v_1} \quad (8).$$

Dónde:

- $i_{12}$  es el factor de ganancia de velocidad entre la polea conductora y conducida.

- $D_1$  es el diámetro de la polea conducida en cm.
- $D_2$  es el diámetro de la polea conductora en cm.
- $v_1$  es la velocidad de la polea conducida en rpm.
- $v_2$  es la velocidad de la polea conductora en rpm.

De la ecuación 10 se procede a despejar el diámetro de la polea conductora de donde se tiene que:

$$D_2 = i_{12} * D_1 \quad (9)$$

Reemplazando valores con factor de ganancia 2 se tiene que.

$$D_2 = 5pulg \quad (10).$$

Ahora reemplazando valores con factor de ganancia 3 se tiene.

$$D_2 = 7.5pulg \quad (11).$$

Se ha establecido que el diámetro de la polea conductora debe estar entre 5 y 7.5 pulgadas, por lo tanto para esto se ha escogido una polea de 7 pulgadas de diámetro por motivos comerciales, por lo cual el factor de ganancia del sistema lo podemos calcular con la ecuación 8, de donde se tiene que.

$$i_{12} = 2.8 \quad (12)$$

Con esta ganancia, y teniendo en cuenta la velocidad máxima del motor establecida en la tabla 3, la velocidad de giro que puede alcanzar el recipiente interno teniendo en cuenta la ecuación 13 es.

$$v_2 = v_1 * i_{12} \quad (13)$$

Entonces.

$$v_2 = 140rpm \quad (14)$$

Esta velocidad se adecua a lo requerido por el sistema en diferentes cantidades del producto, ya que las velocidades ideales se estima que estarán por debajo de esta.

### **3.6 FIRMWARE PARA EL SISTEMA DE VISIÓN ARTIFICIAL.**

Es un bloque de instrucciones para propósitos específicos grabado en un dispositivo, en este caso un microcontrolador que establece la lógica de más bajo nivel que controla los circuitos electrónicos de un dispositivo de cualquier tipo[16]. Básicamente un firmware es un software que controla físicamente al hardware. El firmware para este sistema está dividido en 3 bloques principales los cuales son la comunicación con la unidad controladora (PC), lectura de velocidad de la tolva y la determinación de cambio de velocidad.

Los sistemas de comunicación más comunes en cuanto a envío y recepción de datos se refiere son el puerto paralelo que es de fácil manipulación pero es obsoleto, el puerto serial que es más actual al puerto antes mencionado pero a su vez maneja una menor velocidad, además de que poco a poco ha ido disminuyendo su uso, la comunicación por I<sup>2</sup>C que permite la transferencia de datos entre microcontroladores y periféricos pero no permite la conexión directa entre este y el computador además de otros como Ethernet que son frecuentemente usados para conexiones a internet, CAN (controler area network) que se usan para realizar el cableado en automóviles y por último se tiene el puerto USB que permite una conexión directa con el computador, brinda una velocidad adecuada y es de fácil manipulación; Por lo cual este último es el usado para el desarrollo del proyecto. Por esta razón se hace necesario realizar la escogencia de un microcontrolador capaz de soportar este protocolo de comunicación. Debido a esto el PIC18f4550 es el adecuado para esta aplicación

ya que hace parte de la familia Microchip siendo altamente comercial, de bajo costo, además de tener todo lo requerido por el proyecto.

Para el desarrollo del código se utiliza el programa CCS Compiler, que es un compilador en lenguaje C, para programación de microcontroladores Pic de Microchip que Incluye una biblioteca muy completa de funciones precompiladas para el acceso al hardware de los dispositivos.

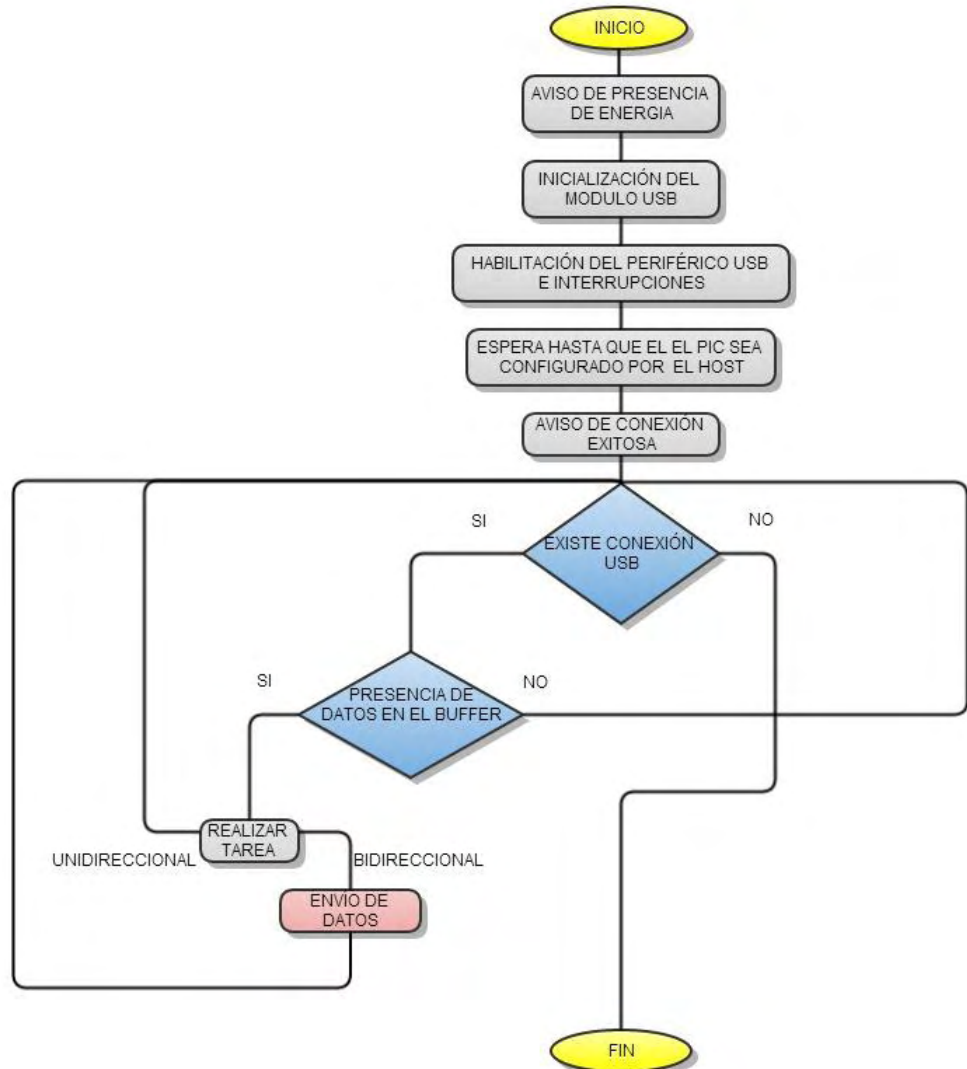
### **3.6.1 Comunicación microcontrolador-pc.**

Dentro del código lo primero que se realiza es establecer las librerías, drivers, fuses, variables y características con los cuales va a trabajar el PIC; dentro de estos se establece el tipo de transmisión y recepción de datos a utilizar, en este caso se utiliza formato Bulk o masiva que se utiliza cuando se precisa una transferencia de datos grande a una alta velocidad[17].

Lo que el firmware realiza como primera medida es que en el momento de conectar el dispositivo, el programa pone en alto una de las salidas del microcontrolador que indica presencia de energía, en ese instante se realiza la inicialización del módulo USB, luego habilita periféricos USB e interrupciones a continuación espera hasta que el PIC sea configurado por el host y finalmente cuando todo esto se cumple se pone en alto otra de las salidas indicando que se realizó la conexión exitosamente. A partir de este punto se puede iniciar la transmisión y recepción de datos, la cual se realiza de la siguiente manera: Entra en un bucle infinito donde cada vez se pide la confirmación de la conexión, si esto es verdadero entonces se procede a leer el buffer de entrada, dependiendo de la información leída el código procede a realizar la tarea asignada que puede ser bidireccional es decir al terminarla envía una serie de datos, o unidireccional donde simplemente recibe los datos y en ambos casos se pone nuevamente a la confirmación de conexión y espera de recepción de datos. Teniendo en cuenta que dentro del envío y recepción de datos hay parámetros a tener en cuenta tales como el número de bytes a recibir las variables donde se guarda la información datos a enviar y un comando de confirmación de que el dato fue enviado.

A continuación se muestra un diagrama que representa todo lo descrito anteriormente.

**Figura 21.** Diagrama de flujo de sistema de comunicación microcontrolador-PC.



### **3.6.2 Lectura de velocidad de la tolva de tosti3n.**

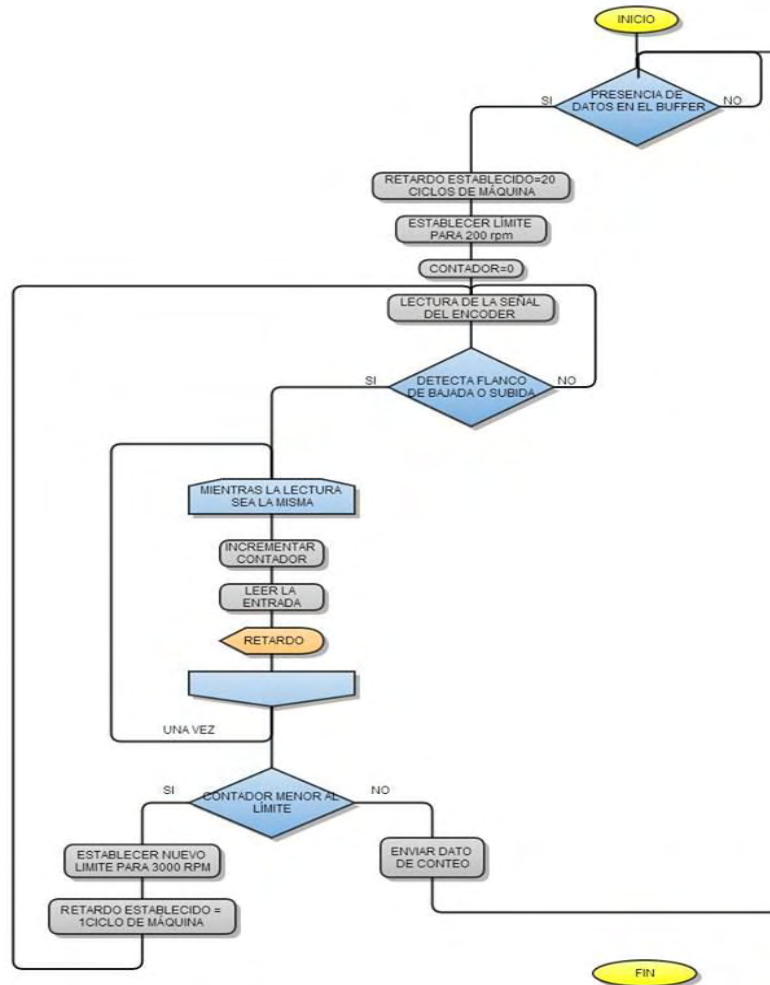
Ya que la base del proyecto es encontrar la velocidad ideal de la tolva de tosti3n es necesario crear un m3todo para poder medirla. El m3todo usado est3 conformado por un circuito sencillo de herradura y encoder acoplado al eje del motor en cuanto a hardware se refiere. Dentro del c3digo se incluye una tarea bidireccional, donde el dato de entrada ordena que se inicie varios procesos de

conteo y el dato de salida es el resultado de los conteos. Como la señal que genera el circuito es de onda cuadrada lo que se realiza es un cálculo de ciclos de maquina durante un periodo de la señal, para esto el código hace una espera hasta que detecta un flanco ya sea de subida o de bajada, a partir de esto se inicia el conteo donde cada incremento tiene un retardo de 20 ciclos de máquina, se toma este valor ya que permite obtener un dato moderado con un error despreciable para velocidades que se encuentran entre 0.2 y 200rpm en el motor y de 0.56 a 560rpm para la tolva de tosti3n. Para que el sistema en conjunto pueda utilizarse en m3s aplicaciones se decide ampliar el rango de velocidad, por lo cual se establece que si la velocidad del motor supera las 200rpm habilite una bandera y cambie el retardo por cada incremento a 1 ciclo de máquina, permitiendo que el rango incremente hasta velocidades pr3ximas a las 3000rpm.

A continuaci3n se muestra un diagrama que representa todo lo descrito anteriormente.



Figura 22. Diagrama de flujo de sistema de lectura de velocidad.



### 3.6.3 Determinación de cambio de velocidad.

El método más sencillo y eficaz para realizar el control de la variación de velocidad del motor DC es por medio de modulación de ancho de pulso (PWM). El microcontrolador a utilizar brinda la posibilidad de utilizar un módulo de captura, comparación y PWM (CCP). Este módulo consta de un registro de 16bits CCPx que puede operar como registro de captura de datos, comparación de datos o como registro para fijar el ciclo de trabajo de una señal PWM. El pic18F4550 dispone de dos módulos denominados CCP1 y CCP2 asociados a los registros CCPR1 y CCPR2 pines RC2 (CCP1) y RC1/RB3 (CCP2).

El módulo en modo PWM utiliza el Timer2 para generar un tren de pulsos de amplitud y ciclo de trabajo variable. El parámetro fundamental de una modulación PWM es la frecuencia o su inverso el periodo de modulación. En los PIC dicha frecuencia es programable con ciertas limitaciones en base a varias variables como la frecuencia del oscilador principal ( $F_{osc}$ ), el pre-scaler (PRE) o divisor previo del timer (TMR2) que puede tomar los valores 1:1, 1:4 o 1:16 y el registro PR2 (0-255) o (0-1023) asociado al timer TMR2[18]. La frecuencia PWM responde a la fórmula:

$$F_{pwm} = F_{osc} / [4 * PRE * (PR2 + 1)] \quad (15)$$

O lo que es lo mismo, el periodo del PWM será el inverso de dicha frecuencia:

$$T_{pwm} = [(PR2 + 1) * 4 * PRE] * T_{osc} \quad (16)$$

El valor máximo del divisor previo PRE es 16, el de PR2 es 255 y la frecuencia de oscilación del Pic  $F_{osc}$  es de 48MHz ya que a esta frecuencia permite la transferencia de datos a full-speed por medio del puerto USB (1.5Mbytes/s) que es compatible con el estándar 2.0 siendo este el más usado en la actualidad. Por lo tanto la frecuencia PWM más baja posible será:

$$F_{mpwm} = 48MHz / [4 * 16 * (255 + 1)] \quad (17)$$

Entonces.

$$F_{mpwm} = \frac{48MHz}{[4 * 16 * (255 + 1)]} \quad (18)$$

$$F_{mpwm} = 2929,69 \text{ Hz} \quad (19)$$

Ya que la única variable que se puede modificar es el divisor previo PRE podemos obtener las siguientes frecuencias.

**Tabla 4. Frecuencia de oscilación del pic18f4550 según el divisor previo del TMR2.**

REGISTRO PR2	PRE(Divisor previo del Timer TMR2)	F <sub>pwm</sub> (KHz)
255	1	46.87
255	4	11.72
255	16	2.93

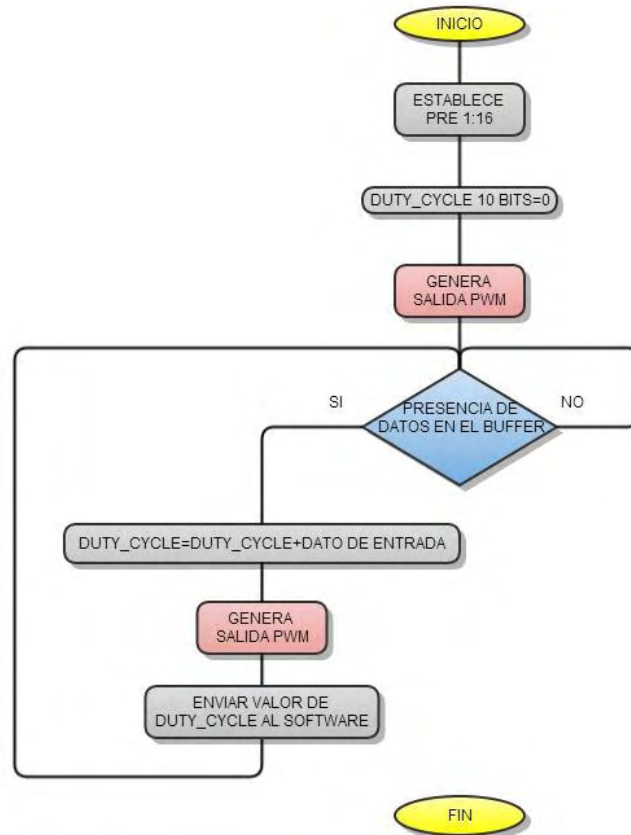
Fuente: [en línea]. <http://picfernalía.blogspot.com/2012/06/modulacion-pwm-pulse-width-modulation.html>

La forma de controlar ciclo de trabajo es por medio de algunos códigos que hacen parte del módulo PWM donde se puede modificar el ancho de pulso, por medio de una variable que puede ser de 8 o 10 bits, en el primer caso con 256 niveles ya que el valor que puede tomar varía de 0 que corresponde a 0% de ciclo de trabajo hasta 255 que corresponde al 100%; en el segundo caso tiene 1024 niveles donde el valor mínimo que es 0 corresponde al 0% del ciclo de trabajo y el valor máximo que es 1023 corresponde a 100%.

Para el desarrollo del proyecto se utilizó 1:16 para el divisor previo del Timer, es decir la menor frecuencia, esto con el objetivo de evitar conflictos con el hardware y la variable encargada de modificar el ancho de pulso (duty), se estableció de 10 bits para una mayor resolución. En el algoritmo desarrollado el cambio de velocidad se establece modificando el valor esta variable dependiendo de la recepción de un dato proveniente del software donde el valor recibido se suma a su valor previo y este dato lo envía al software para su posterior análisis.

A continuación se muestra un diagrama que representa todo lo descrito anteriormente.

**Figura 23.** Diagrama de flujo de sistema de determinación de cambio de velocidad de la etapa mecánica.



En conjunto el código se adjunta en la carpeta ANEXO D dentro de la carpeta ANEXOS del CD-ROM.

### **3.7 SOFTWARE PARA EL SISTEMA DE VISIÓN ARTIFICIAL.**

Para el desarrollo del software de control, la herramienta informática utilizada es NetBeans IDE 7.4, el cual es un entorno de desarrollo integrado libre hecho para el lenguaje de programación Java. El principal motivo por el cual se utilizó es por ser un producto libre y gratuito sin restricciones de uso, lo que permite que el software diseñado pueda ser implementado en cualquier entidad sin necesidad de adquirir ningún tipo de licencia. Por otro lado al ver la complejidad del desarrollador de JAVA fue de mucha importancia investigar acerca del funcionamiento y de cómo se puede conformar un algoritmo dentro de este, ya

que se pueden utilizar clases, métodos, librerías, etcétera, y hay que saber cómo se diferencian uno del otro para desarrollar cualquier proyecto[19].

Para realizar el control de la velocidad se diseña un programa que consta de 3 etapas fundamentales que son el procesamiento de imágenes, la comunicación pc-hardware y análisis de datos todo esto implementado en una interfaz gráfica para la fácil manipulación por los usuarios.

### **3.7.1 Procesamiento de imágenes.**

El algoritmo desarrollado dentro de la interfaz para esta parte está conformado por un streaming que muestra en tiempo real el movimiento de los granos de café dentro de la tolva de tostión, además de una captura de la zona a estudiar, es decir el espacio en el cual los granos de café se encuentran en el aire. Para esto se realiza un corte circular a la imagen donde se desprecia las paredes y las aletas de la tolva para disminuir el error en cuanto al procesamiento de la imagen. También tiene un slider que permite modificar el brillo de la imagen con el objetivo de brindar facilidad al usuario en cuanto a la aplicación del filtro[20].

La imagen que se desea tratar está en un formato RGB que se representa por 3 matrices correspondientes a los 3 planos R (Red), G (Green), B (Blue) donde cada pixel puede tomar valores desde 0 hasta 255 para cada color. Para el cálculo de los granos que están en el aire es necesario la aplicación de un filtro, en este caso se realizó un filtro de umbral personalizado donde en primera medida se estableció los rangos de los componentes RGB en los que se encuentran los granos de café, los datos que se establecieron se puede observar en la tabla 5.

**Tabla 5. Determinación de los límites por cada color para el filtro RGB de las imágenes.**

COLOR	LIMITE INFERIOR	LIMITE SUPERIOR
ROJO	40	150
VERDE	30	130
AZUL	20	120

Con esta información se procede a analizar pixel por pixel y si está dentro del rango establecido se toma el pixel como negro y se incrementa un contador y en caso contrario se lo toma como blanco e incrementa otro contador. Para poder

establecer el porcentaje de área ocupada por el café se realiza el siguiente calculo.

$$PA_{negro} = \frac{C_{negro}}{C_{negro} + C_{blanco}} * 100\% \quad (20)$$

Dónde:

- $PA_{negro}$  es el porcentaje de área negra.
- $C_{negro}$  es el valor del contador para pixeles que se encuentran dentro del rango establecido.
- $C_{blanco}$  es el valor del contador para pixeles que se encuentran fuera del rango establecido.

Los resultados que se obtuvieron a partir de la aplicación del filtro fueron los mostrados en la Figura 24.

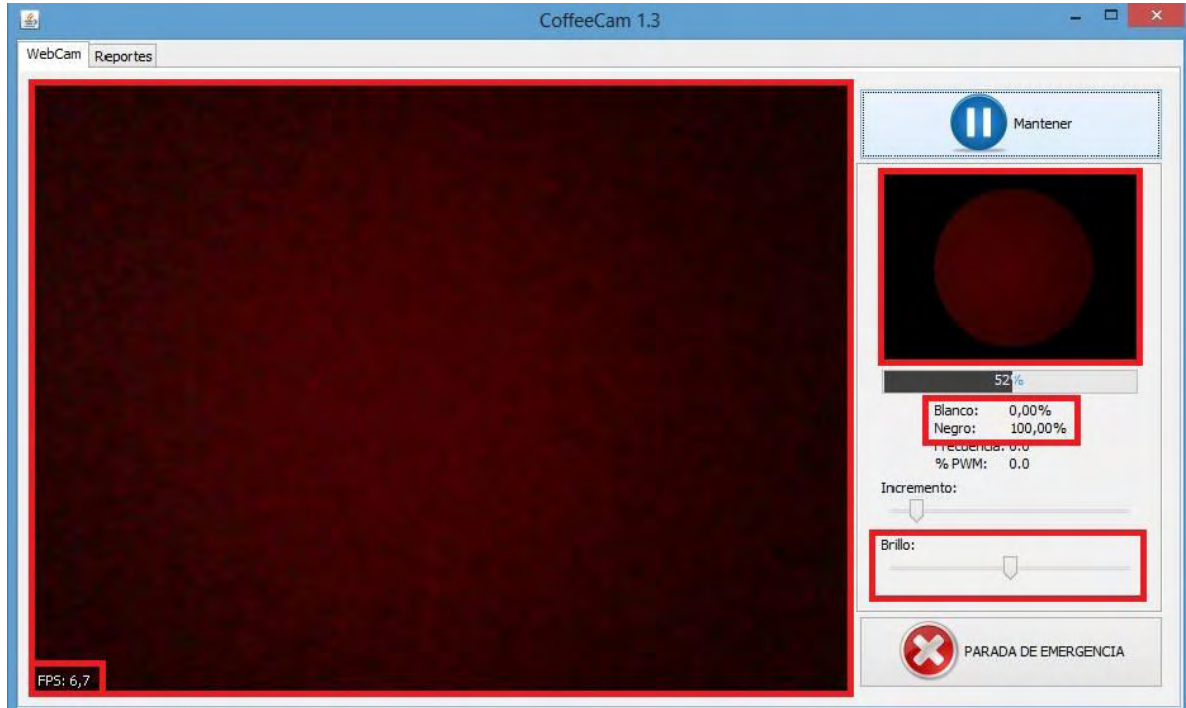
**Figura 24.** Resultado de la aplicación del filtro a las imágenes capturadas.



En la figura se puede observar que se toman la mayoría de granos de café que se encuentran en el aire despreciando los que están en contacto con las paredes y las aletas.

Dentro de la interfaz gráfica se muestra los datos de porcentaje de área negra, área blanca y los frames por segundo (FPS) junto con los aspectos ya mencionados como se muestra en la Figura 25.

**Figura 25.** Parámetros de entrada y salidas del sistema de toma y filtrado de imágenes dentro del software CoffeeCam1.3.



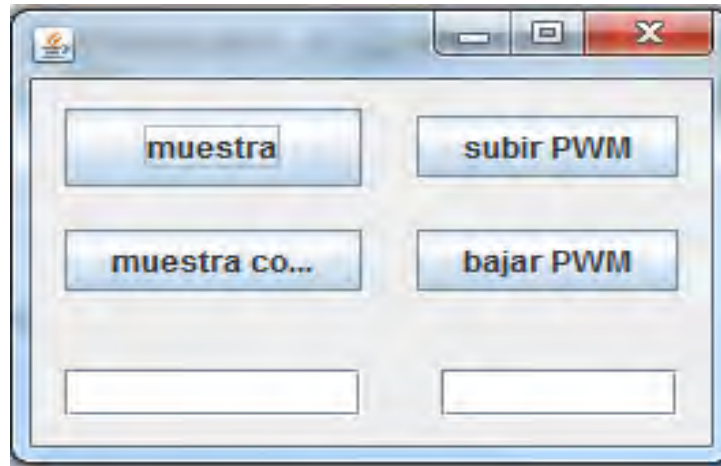
### **3.7.2 Comunicación pc-hardware.**

En primer lugar se realizó la comunicación entre el Microcontrolador y el algoritmo de JAVA, para esto se hizo necesario utilizar la librería llamada JPicUsb en su versión 1.1.1[21], la cual es la más actualizada y permite realizar el envío y la recepción de datos hacia el Microcontrolador por medio del puerto USB, a partir de aquí se desarrolló el código donde se establecieron aspectos como la cantidad de bytes a enviar o recibir, que pueden ir de 1 a 64 por cada transmisión, posición de inicio para la recepción de los datos y el tiempo de espera para la lectura en el buffer del puerto.

Después de esto se procede a realizar lo mismo pero a través de una interfaz gráfica, en la cual hay que adoptar una clase diferente llamada JFrame, donde igualmente hay que programarle la tarea que se desea realizar en cada mando, y a cada área de texto que se hacen necesarias. Dentro de la interfaz lo que se realizó en sus inicios fue crear un área de texto y dos botones, uno para enviar información al Microcontrolador y otro para recibir información del mismo, el área

de texto es el sitio donde se imprime la información recibida por parte del 18F4550, y en los pines de salida en el puerto B se muestra lo enviado desde JAVA, todo esto a modo de prueba como se muestra en la Figura 26.

**Figura 26.** Interfaz gráfica primitiva. La gráfica ilustra el diseño de la interfaz gráfica primitiva donde se muestran los botones para el envío y recepción de datos.



A partir de esta base se procede a desarrollar dentro del algoritmo el envío de una orden al microcontrolador para iniciar el conteo que establece la velocidad a la que gira la tolva de tostión otro dato a enviarse es el porcentaje de área negra por medio de 2 bytes. Como se había visto anteriormente en el firmware lo que envía el microcontrolador son 32 bytes conformados por 30 bytes de frecuencia que corresponde a 10 datos de 3 bytes 2 de ellos del dato de conteo y el tercero una bandera para frecuencias altas, es decir que dependiendo del estado de la bandera se debe realizar diferentes operaciones, y por ultimo 2 bytes destinados para el dato de ciclo útil; debido a que Netbeans recibe el dato en COMPLEMENTO A 2 lo primero que se debe hacer es su transformación a dato ENTERO posteriormente se realiza el procedimiento para unir los dos bytes del conteo a un solo valor para cada dato de frecuencia y el valor del ciclo útil. Para los datos de frecuencia se debe realizar una conversión como se muestra a continuación.

Si la bandera para frecuencias altas esta deshabilitada entonces.

$$V_{tolva} = \frac{80766}{D_{entrada}} [rpm] \quad (21)$$

Si la bandera para frecuencias altas está habilitada entonces.



$$V_{tolva} = \frac{61845}{D_{entrada}} [rpm] \quad (22)$$

Dónde:

- $V_{tolva}$  es la velocidad de la tolva en rpm
- $D_{entrada}$  es el valor del dato que recibe el software.

Para el dato de ciclo útil se debe realizar el siguiente cálculo.

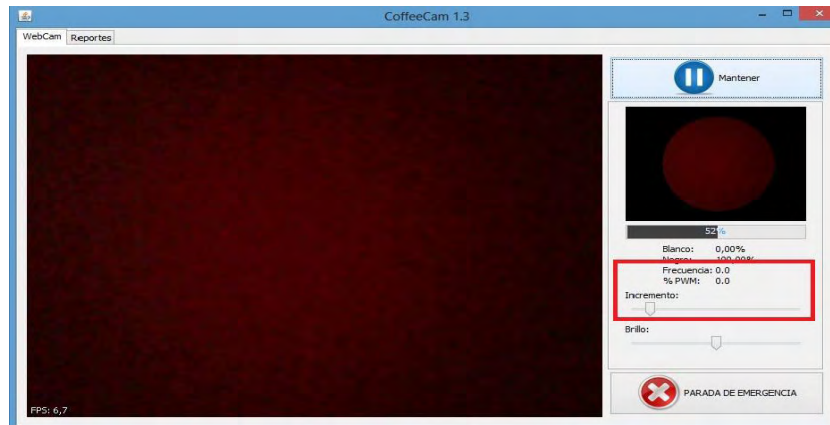
$$P_{pwm} = \frac{duty}{1023} * 100\% \quad (23)$$

Dónde:

- $P_{pwm}$  es el porcentaje de tiempo en alto de PWM.
- Duty es la variable que se define en el firmware que toma datos desde 0 hasta 1023.

Dentro de la interfaz gráfica se muestran los datos mencionados anteriormente (velocidad y %PWM) además de un slider que permite modificar el valor de incremento o decremento de PWM como se observa en la Figura 27.

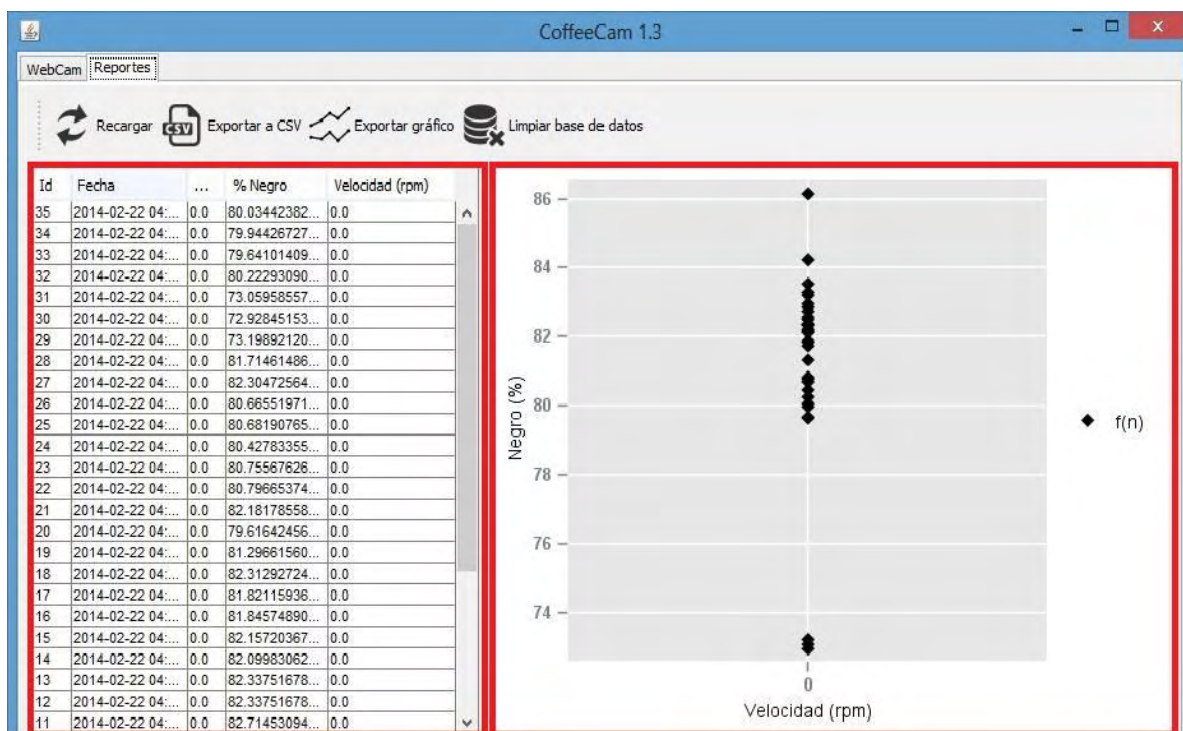
**Figura 27.** Parámetros de entrada y salida de la velocidad de la tolva dentro del software CoffeeCam1.3.



### 3.7.3 Análisis de datos.

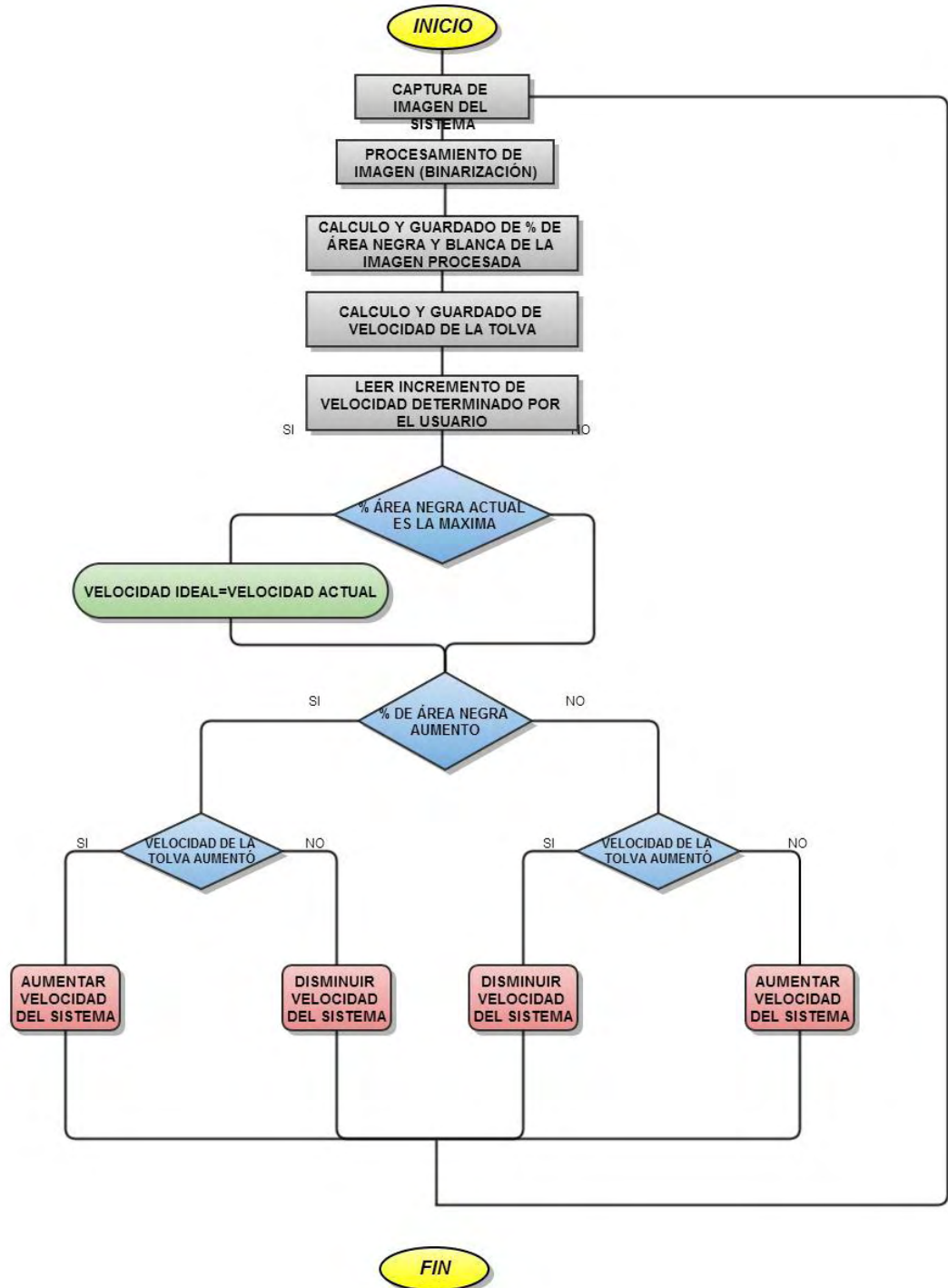
Los datos obtenidos a partir del software se los guarda en una tabla que está compuesta por el número del dato, fecha y hora de su toma, velocidad de la tolva, porcentaje de área negra y porcentaje de PWM. Dentro de la interfaz gráfica hay una pestaña en la cual se encuentra lo anteriormente mencionado junto a una gráfica que relaciona la velocidad de la tolva y el porcentaje de área negra como se observa en la Figura 28.

Figura 28. Sección de reportes dentro del software CofeeCam1.3.



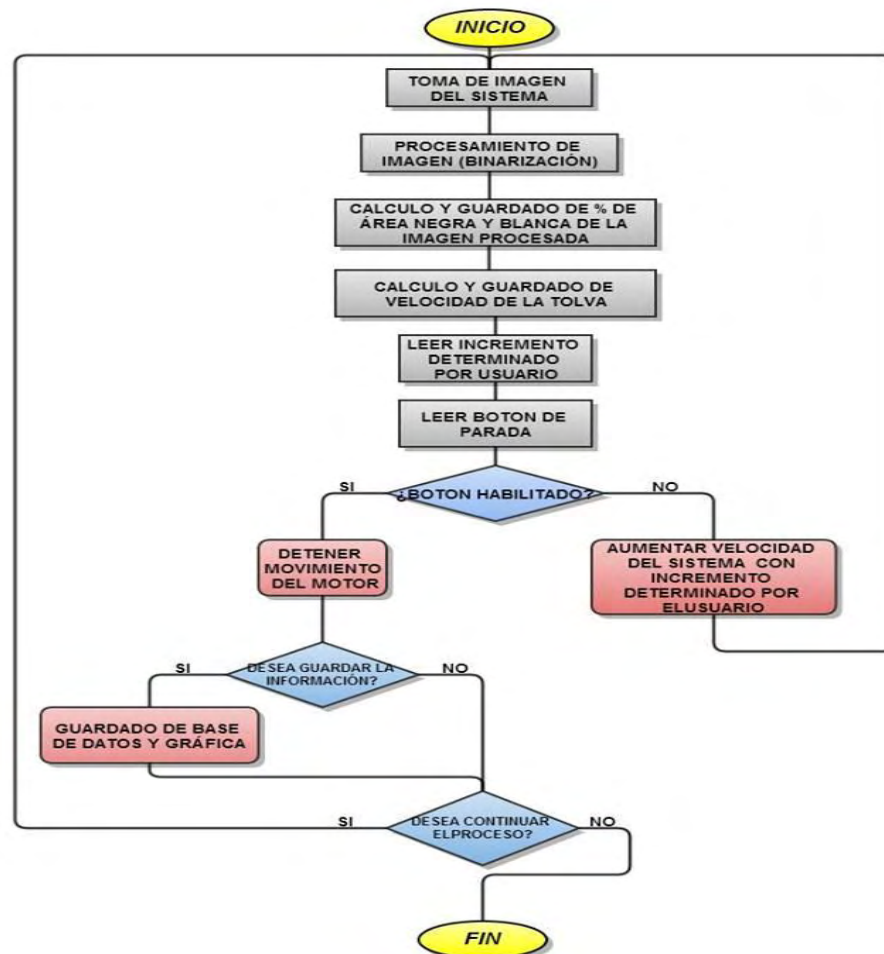
Finalmente un diagrama que puede representar fácilmente las funciones del proceso interno que realiza el software se muestra en la Figura 29.

Figura 29. Diagrama de flujo provisional del sistema de control de velocidad por medio de visión artificial.



Debido a que al utilizar la lógica del diagrama anterior se presentan problemas respecto a la lectura de la velocidad por motivos mecánicos ya que el giro de la tolva presenta inconvenientes en un tramo de cada vuelta, por este motivo se decide implementar un sistema en el cual solo se tome la imagen y se calcule la velocidad en ese instante, este incremento se hará cíclicamente y podrá ser manipulado por el usuario, con esto se obtendrá una gráfica a la cual se le tendrá que hacer su respectivo análisis, el diagrama que representa la lógica del sistema se puede observar en la Figura 30.

**Figura 30.** Diagrama de flujo definitivo del modulo de vision artificial para determinar la velocidad ideal.



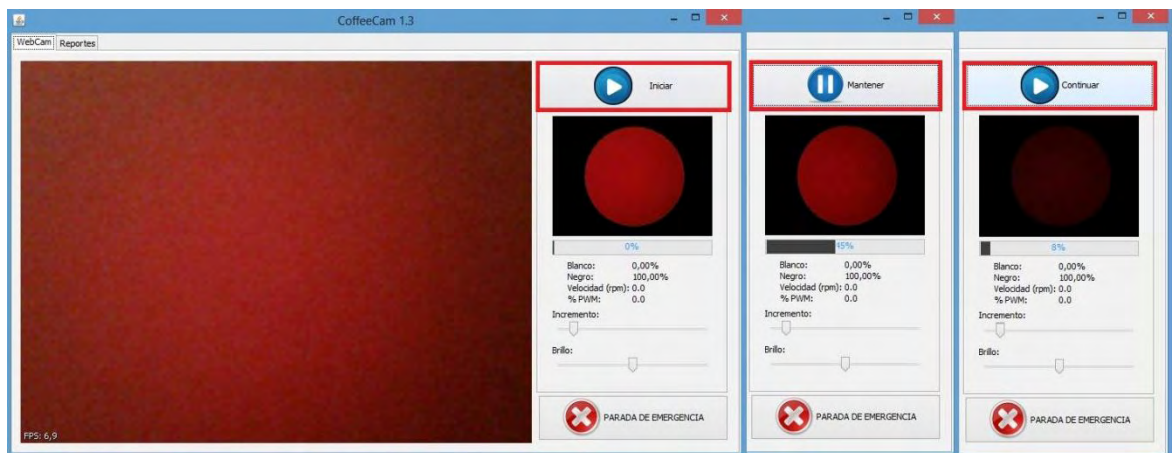
### 3.7.4 Complementos de la interfaz gráfica.

En este apartado se describirá la función de cada una de los botones, los cuales son inicio-mantener, parada de emergencia, recargar, Exportar CSV, exportar gráfica y limpiar base de datos.

- Inicio-mantener.

La función principal de este botón es el inicio del proceso, es decir envía la orden que empiece por la toma y procesamiento de imágenes, lectura de velocidad de la tolva y PWM actual además de la modificación del ancho de pulso. Este proceso se realiza continuamente hasta cuando se desea mantener una velocidad por el usuario, esta tarea es posible hacerla con el mismo botón, ya que cambia a un estado de “mantener” al dar inicio al proceso y también da la posibilidad de continuar la tarea ya que cambia a un estado de “continuar” al mantenerlo. Todo lo anteriormente mencionado se lo observa en la 0.

**Figura 31.** Botón de Inicio-Mantener-Continuar dentro del software CoffeeCam1.3.



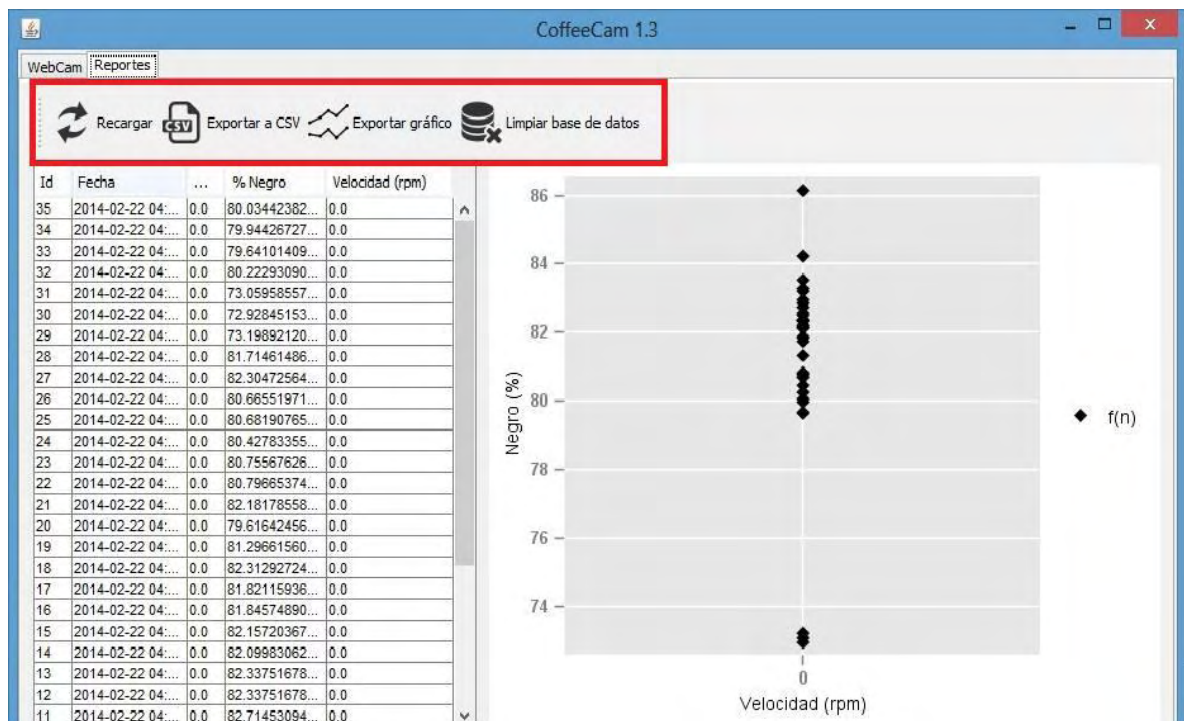
- Parada de emergencia.

Esta es una herramienta que permite al usuario parar el proceso en caso de cualquier inconveniente o imprevistos en el hardware, la función que realiza este botón es enviar una orden donde se establece el ciclo de trabajo con cero dando una parada total al sistema. Como se observa en la figura este botón se ubica en la parte inferior derecha que esta simbolizada con una equis(X).

- Panel de reportes.

Dentro de este panel se encuentran los botones de recargar, exportar a CSV (comma-separated values), exportar gráfico y limpiar base de datos. El primero de ellos lo que hace es actualizar la información insertando los datos en la tabla de datos y en la gráfica, el boto Exportar a CSV genera un archivo en formato CSV es decir base de datos toda la información obtenida hasta el momento de activar la función. El botón Exportar gráfico genera un archivo de imagen de extensión .PNG con el grafico que se tiene hasta terminar el proceso. Por último el botón Limpiar base de datos el cual tiene como función borrar la información obtenida al momento de su activación. Este panel se puede observar en la Figura 32.

Figura 32. Panel de reportes dentro del software CoffeeCam1.3.



En conjunto el código del software CofeeCam1.3 se adjunta en la carpeta ANEXO E dentro de la carpeta de ANEXOS del CD-ROM.

### 3.7.5 Librerías.

Dentro del proyecto fue necesario utilizar un grupo de librerías que permiten el desarrollo del mismo en diversos aspectos. Las librerías que se usaron fueron.



- SQLite.

Específicamente se utilizó SQLite-jdbc-3.7.2 que es una pequeña librería en C que contiene en ella un completo sistema de gestión de base de datos, que no inician un servicio en nuestra máquina independiente de la aplicación, pudiéndose enlazar directamente a nuestro código fuente o bien utilizarse en forma de librería (include)" que da una gran facilidad de manipulación de los datos, además de que es Software Libre por lo tanto el código fuente es del dominio público y licencia GPL. Dentro del proyecto es utilizada para crear una base de datos donde se guarda los datos ya mencionados[22].

- Slf4j.

Específicamente se utilizó slf4j-api- 1.7.2 que es una librería que proporciona una API (Interfaz de programación de aplicaciones) de registro Java a través de un simple patrón de fachada sencilla. Dentro del proyecto es utilizada para registrar una clase dentro de la lectura que se hace del microcontrolador[23].

- Xchart.

Específicamente se utilizó xchart-2.2.1 que es una librería de Java para la construcción de gráficas es decir visualizaciones impulsadas por datos y personalizadas, esta librería está diseñada para ser dinámica, fluida y abierta a integraciones y personalizaciones. Dentro del proyecto es utilizada para la generación de la gráfica de porcentaje de área negra vs velocidad de giro de la tolva[24].

- Webcam-capture.

Específicamente se utilizó webcam-capture-0.3.10-RC4 que es una librería de Java que permite la manipulación de las funciones de webcams conectadas al equipo. Dentro del proyecto se usó para la inicialización del dispositivo manipulando la resolución, permitiendo la visualización en tiempo real de la imagen (Streaming) y la toma de imágenes devolviendo una matriz con sus propiedades RGB[25].

- JPicUSB.

Específicamente se utilizó jpicusb1.1.1 que es una librería que utilizando interfaces nativas, permite a una aplicación Java hacer llamados a una librería dinámica, en este caso jpicusb.dll. Esta es una librería que implementa todas las funciones de la API USB de Microchip, con la diferencia de que está especialmente recompilada para permitir a la clase JPicUSB que se haga llamado a sus funciones. Dentro del proyecto es utilizada para la realizar la comunicación entre el microcontrolador y la unidad controladora (PC).

- Bridj.

Específicamente bridj-0.7-20130703.103049-42 que es una librería de Java que permite la manipulación y procesamiento de imágenes. Dentro del proyecto es utilizada para aplicar filtros y recorte de zonas[26].

- Mpusbapi.

Esta es una librería de enlace Dinámico. Esta librería puede ser cargada y ejecutada en cualquier proceso en ejecución que permite la transmisión de datos en modo Bulk transfer. Dentro del sistema permite la manipulación como dispositivo del microcontrolador desde la unidad controladora (PC)[27].

### **3.8 HARDWARE PARA EL SISTEMA DE VISIÓN ARTIFICIAL.**

Para el desarrollo del proyecto se hizo necesario el diseño y fabricación de diferentes módulos que permiten la comunicación y el control de los actuadores por medio del software. A continuación se describe los diseños y prototipos realizados.

#### **3.8.1 Tarjeta de adquisición de datos.**

Esta tarjeta es el encargado de recibir y enviar la información proveniente del software y del actuador utilizado en la etapa mecánica, esto lo hace mediante el firmware descrito en el capítulo 3. Este circuito está compuesto por elementos como el microcontrolador en este caso el pic18f4550 que es la base fundamental



de la tarjeta, hay que tener en cuenta que los microcontroladores de la familia 18F utilizan dos fuentes de reloj, para el módulo USB se utiliza el oscilador primario y para el resto del PIC se puede utilizar cualquier otra fuente. Dependiendo de si utilizamos USB de baja velocidad o de velocidad completa, la señal de reloj del módulo USB deberá ser de 6 MHz o de 48 MHz, respectivamente. Pese a la poca velocidad necesaria, nuestro dispositivo trabajará a velocidad completa es decir que el reloj del módulo USB será de 48Mhz , de esta manera si fuera necesario manejar datos a gran velocidad, solo sería necesario modificar el código de los programas firmware y software. El modo de funcionamiento utilizado es el HSPLL que tiene como características la alta velocidad del cristal resonador, PLL siempre está habilitado que permite generar el nuevo reloj interno y el cristal se conectara entre los pines RA6 y RA7. Según el Datasheet del microcontrolador, los valores de los condensadores que acompañan al cristal dependen del mismo como se observa en la tabla 6.

**Tabla 6. Configuración del oscilador para PIC18f4550.**

Tipo oscilador	Frecuencia cristal	Valores de Capacitores	
		C18	C19
HS	4 MHz	33pF	33pF
	8 MHz	27pF	27pF
	16 MHz	22pF	22pF
	20 MHz	15pF	15pF

Fuente:[Anexo F, Dateheet18F4550].

Ya que oscilador que se utilizó es de 20 MHz los condensadores que se acoplan están entre los valores de 15pF a 22pF. Otro factor para el buen funcionamiento del módulo USB es el condensador que se conecta al pin 18 es decir el pin  $V_{USB}$  que tiene un valor de 4.7uF.

En los microcontroladores existe un pin de Reset que permite reiniciar el funcionamiento del sistema cuando sea necesario, ya sea por una falla que se presente o porque así se haya diseñado el sistema. El pin de Reset en los PICs es llamado "Master Clear" el cual está el pin E3 para el microcontrolador 18F4550. El PIC utilizado admite diferentes tipos de Reset entre los que se encuentran, al encendido (Power On Reset), pulso en el pin Master Clear durante operación normal, Pulso en el pin Master Clear durante el modo de bajo consumo (modo sleep), El rebase del conteo del circuito de vigilancia (Watchdog) durante operación normal entre otros. Para este caso se utilizó el Reset tipo pulso en el pin

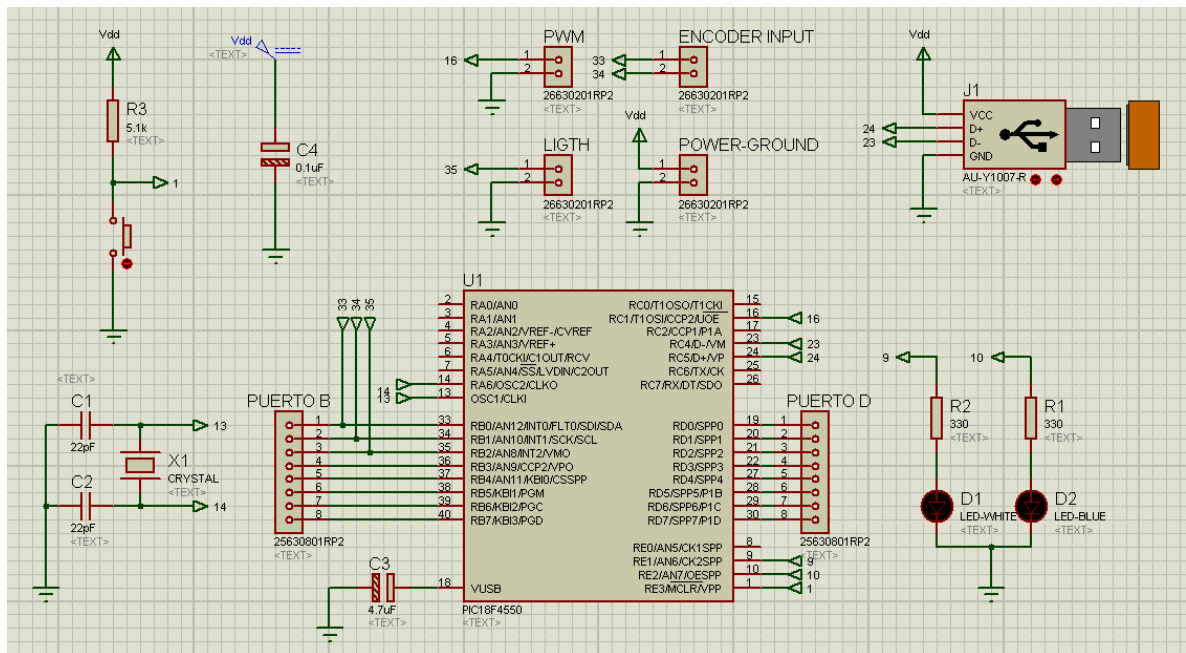
Master Clear durante operación normal el cual utiliza una configuración pull up el cual entrega un uno normalmente y cuando se activa el switch cambia a un cero.

La tarjeta ya que requiere una conexión USB se diseñó con un conector que permita la comunicación con la unidad controladora específicamente se escogió el conector USB tipo B el cual lleva conexiones de transmisión de datos D- y D+ que se ubican en los pines 23 y 24 es decir RC4 y RC5 respectivamente y además conexiones de alimentación  $V_{DD}$  y  $V_{SS}$  que van a los pines 11 o 32 y 12 o 31 es decir voltaje y tierra respectivamente.

Para realizar los avisos de presencia de energía y conexión USB exitosa se conectaron a los pines E1 y E2 un par de LEDs con su respectiva resistencia de protección con la configuración mencionada en el apartado referente a firmware. También a algunos puertos además de la tierra y alimentación se adaptaron “pin heads” para que el diseño de la tarjeta pueda ser utilizada en cualquier aplicación de comunicación USB es decir otórgale una mayor versatilidad al diseño.

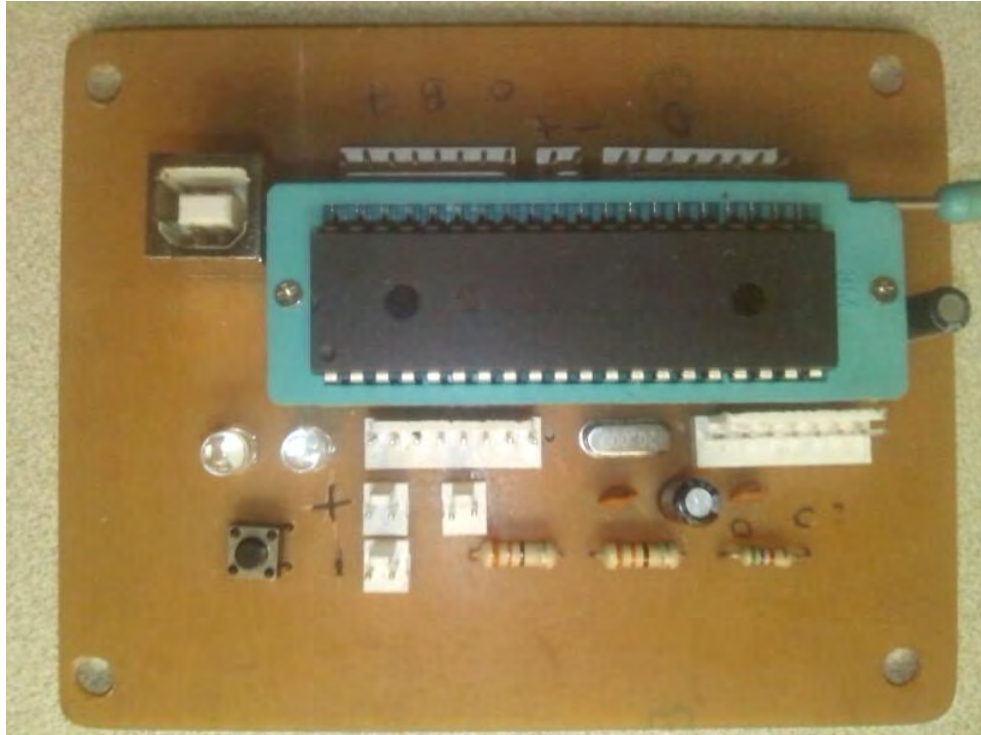
Finalmente el diseño de la tarjeta de adquisición de datos se puede observar en la Figura 33.

**Figura 33.** Diagrama de simulación en proteus del sistema de adquisición de datos.



El resultado obtenido después de su montaje puede observarse en la Figura 34.

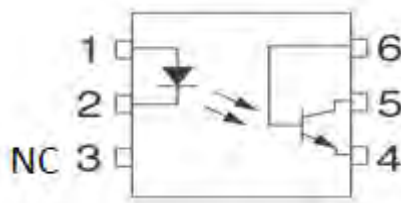
**Figura 34.** Tarjeta de adquisición de datos.



### **3.8.2 Etapa de potencia y aislamiento.**

Ya que dentro del proyecto se trabaja con un motor de 12 V y 80W es decir un actuador inductivo de potencia moderada que puede generar corrientes parasitas es necesario para poder realizar su control implementar una etapa de aislamiento electrónico para proteger a la tarjeta de adquisición de datos. Dentro de los métodos de protección existen 3 sistemas que son, los inductivos, capacitivos y ópticos , de los cuales se decidió utilizar el método óptico que es capaz de modular una señal luminosa partiendo de una señal eléctrica para luego convertirla otra vez en señal eléctrica, de esta forma, establecen un aislamiento galvánico entre los circuitos de entrada y salida. El optoacoplador utilizado es el 4N25 de 6 pines que a la entrada tiene un diodo infrarrojo y a la salida un fototransistor tipo NPN como se observa en la Figura 35.

Figura 35. Diagrama interno del optoacoplador 4N25.



Fuente: [ANEXO F DATASHEET4N25]

Donde el pin 1 es el ánodo del diodo, el pin 2 es el cátodo del diodo, el pin 3 no tiene función por lo cual no debe conectarse (NC), el pin 4, 5 y 6 son el emisor, colector y base del fototransistor respectivamente.

A la salida del opto acoplador se aplica una configuración de pull-up con el fin de obtener un señal de alto o bajo, es decir de 5 o 0 voltios, para su posterior amplificación y generar la señal de potencia para el motor.

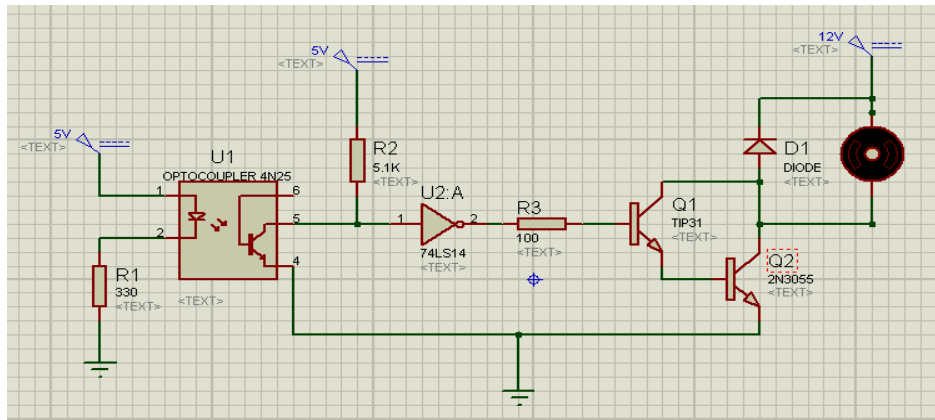
Ya que a la salida del optoacoplador se puede presentar ruido en la señal se decidió acoplarle una compuerta negadora schmitt trigger, para este caso la compuerta utilizada será la 74ls14 que permite evitar falsos cambios de estado si los niveles de referencia y entrada son aproximados entre sí.

El módulo que contiene la etapa de potencia cuenta con la facilidad de poder cambiar el optoacoplador y la compuerta ya que estos están montados sobre bases las cuales están directamente acopladas a la tarjeta, además de disipadores para cada uno de los transistores evitando un sobrecalentamiento del circuito. La tarjeta cuenta con pin heads para la entrada de la señal controladora y la fuente, y salidas para la conexión del motor.

La configuración utilizada para la etapa de potencia fue la Darlington que permite una gran ganancia de potencia con señales de activación pequeñas. Para esta configuración se utilizó los transistores TIP31 y 3055, el primero que permite su saturación con una corriente baja y el segundo que soporta grandes potencias.

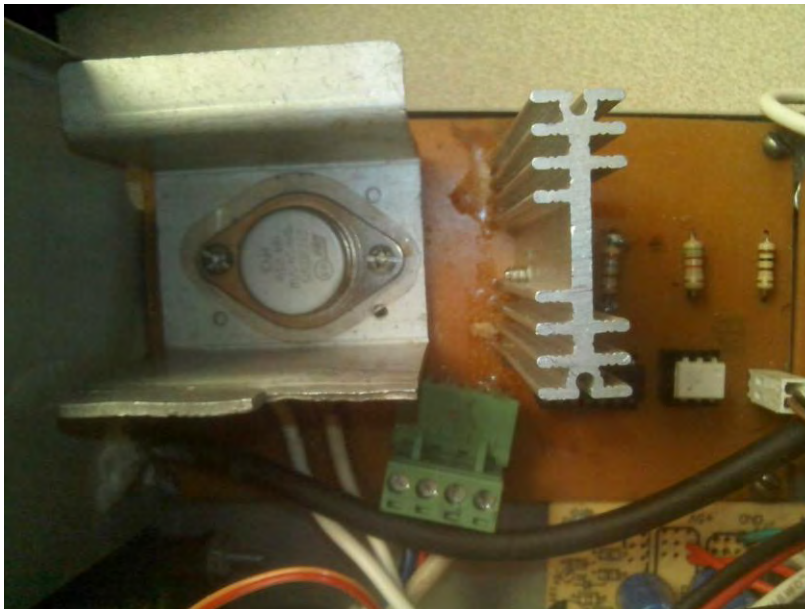
Lo descrito anteriormente se muestra en diseño de la Figura 36.

Figura 36. Diagrama de simulación en proteus de etapa de aislamiento y potencia.



El resultado obtenido después de su montaje puede observarse en la Figura 37.

Figura 37. Módulo de aislamiento eléctrico y potencia.

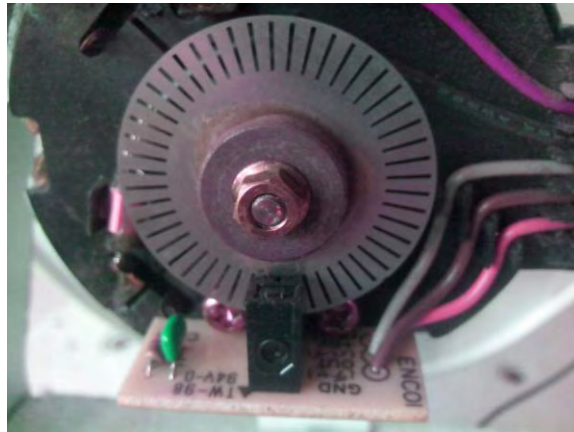


### 3.8.3 Encoder.

Es un módulo sencillo que está compuesta por una herradura de referencia IA51HR, por donde pasa una lámina circular perforada con 100 ranuras donde al

alimentarlo genera un tren de pulsos y dependiendo de su velocidad cambia su frecuencia. El circuito puede observarse en la Figura 38.

**Figura 38.** Encoder con el circuito de herradura.



#### **3.8.4 Sistema de toma de imágenes.**

Este sistema está conformado por una cámara Web de referencia J&R C-031 ubicada al borde de la tolva de tosti3n que permite tomar en tiempo real im3genes del procesos que se lleva a cabo, ya que los frames por segundo o fotos por segundo depende directamente de la iluminaci3n del ambiente y el cilindro interno al estar recubierto es necesario apoyarse con un sistema de iluminaci3n. Para poder tener mayor estabilidad en la toma de im3genes se dise1n3 una base que consta de dos cajas met3licas, la primera de ellas de 20cm de alto y 38cm de largo que se utiliza como la base de la c3mara web, y la segunda de 10cm de alto y largo donde se ubica la fuente de iluminaci3n y se sobre la anterior base permite su movilidad, para as3 poder modificar la intensidad de luz lo descrito anteriormente puede ser observado en las Figura 39 y Figura 40.



**Figura 39.** Vista frontal de la base para el sistema de toma de imágenes.



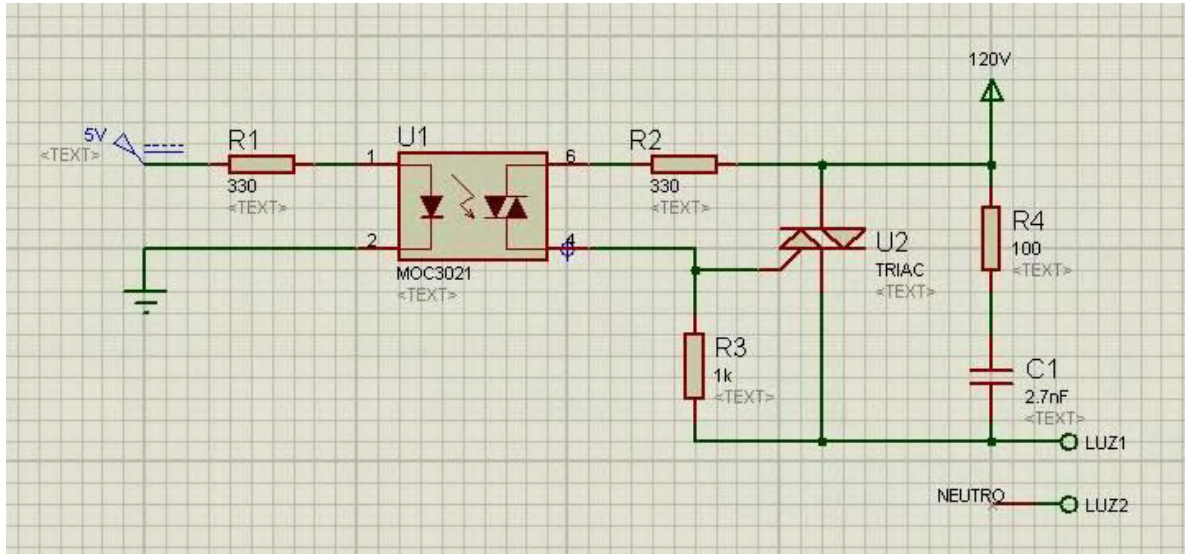
**Figura 40.** Vista lateral de la base para el sistema de toma de imágenes.



Para el dispositivo se diseñó una etapa de conmutación que por medio de la tarjeta de adquisición de datos se activa mientras se realiza el proceso de pruebas y/o torrefacción. El sistema de conmutación está conformado por un optoacoplador moc3010 que aísla eléctricamente la tarjeta de adquisición de datos con la alimentación AC de la iluminación, además tiene un SCR BTA08 que permite el

paso de corriente alterna al activar su gate. Lo descrito anteriormente se puede observar en el diseño mostrado en la Figura 41.

**Figura 41.** Diagrama de simulación en proteus del módulo de iluminación.



El resultado obtenido después de su montaje puede observarse en la Figura 42.

**Figura 42.** Módulo de switcheo para iluminación.





### **3.9 PRUEBAS Y TRATAMIENTO DE DATOS OBTENIDOS CON EL MÓDULO DE VISIÓN ARTIFICIAL.**

Con el fin de encontrar la velocidad ideal para una cantidad determinada de café el sistema para la realización de pruebas funciona de la siguiente manera, se introduce una cantidad determinada de café, se posiciona cámara Web e iluminación, se pone en marcha el sistema por medio del hardware y software donde la interfaz gráfica aplica un incremento de PWM manual que permite evaluar el comportamiento de los granos de café a diferentes estados de PWM, es decir a diferentes velocidades de la tolva. El incremento para el ciclo útil escogido para la realización de pruebas es de 2 unidades a partir del cual podemos obtener su incremento porcentual mediante la siguiente ecuación.

$$P_{inc} = \frac{INC * 100\%}{1024} \quad (24)$$

Dónde:

- $P_{inc}$  es el incremento porcentual
- INC es el incremento para el ciclo útil
- 1024 es el número de estados que puede tomar el ciclo útil.

Entonces:

$$P_{inc} = \frac{2 * 100\%}{1024} \quad (25)$$

Es decir:

$$P_{inc} = 0.195\% \quad (26)$$

Con este incremento porcentual se puede asegurar una mayor precisión para la obtención de la velocidad ideal.

Las cantidades usadas para la realización de pruebas van desde los 50gr hasta los 1500gr con intervalos de 50gr, esto debido a que a cantidades mayores la toma de imágenes se dificulta ya que los granos de café no se mueven libremente,

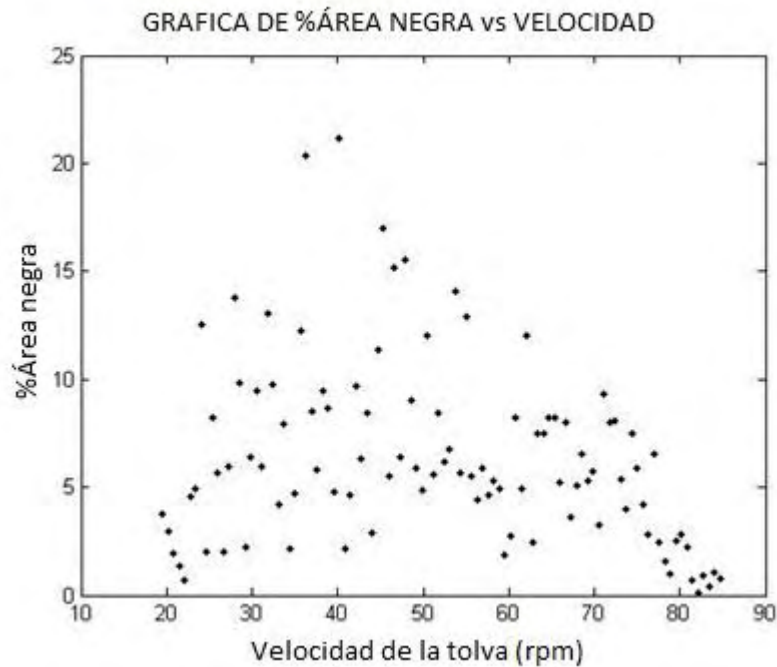
pero con estos datos ya es posible realizar una tendencia para cualquier cantidad de café. Ya que el software permite exportar una base de datos se puede realizar un tratamiento a los mismos para poder tener una mayor fidelidad en el resultado, es decir aplicarles procesos de regresión, para esto se utilizó la herramienta informática MATLAB en la cual se desarrolló un script que permite ingresar la base de datos donde aplica un filtro para eliminar los datos parásitos y una regresión que permite adaptar los datos a una función conocida este Script puede verse en la carpeta de ANEXO G dentro de la carpeta de ANEXOS del CD-ROM.

Las pruebas se realizaron con 4 estados de café en sus diferentes etapas de tostión, empezando por el café verde es decir crudo y terminando en café tostado en intervalos de 0 a 20 por ciento, de 20 a 53.33 por ciento y de 53 a 100 por ciento de proceso de su torrefacción. Las pruebas se realizaron con el café en estos estados ya que durante el proceso de tostión las propiedades físicas como su forma, volumen y masa varían lo que a su vez implica realizar un nuevo estudio para encontrar su nueva velocidad ideal [28]. Los resultados de las pruebas realizadas pueden verse en la carpeta ANEXO H dentro de la carpeta de ANEXOS del CD-ROM.

### ***3.9.1 Pruebas y tratamiento de datos para café crudo.***

Ya establecido los protocolos para la realización de pruebas se procede a introducir la cantidad mínima de producto y poner en marcha en conjunto todo el sistema, donde al final del proceso se obtiene una gráfica y una base de datos como se observa en la Figura 43.

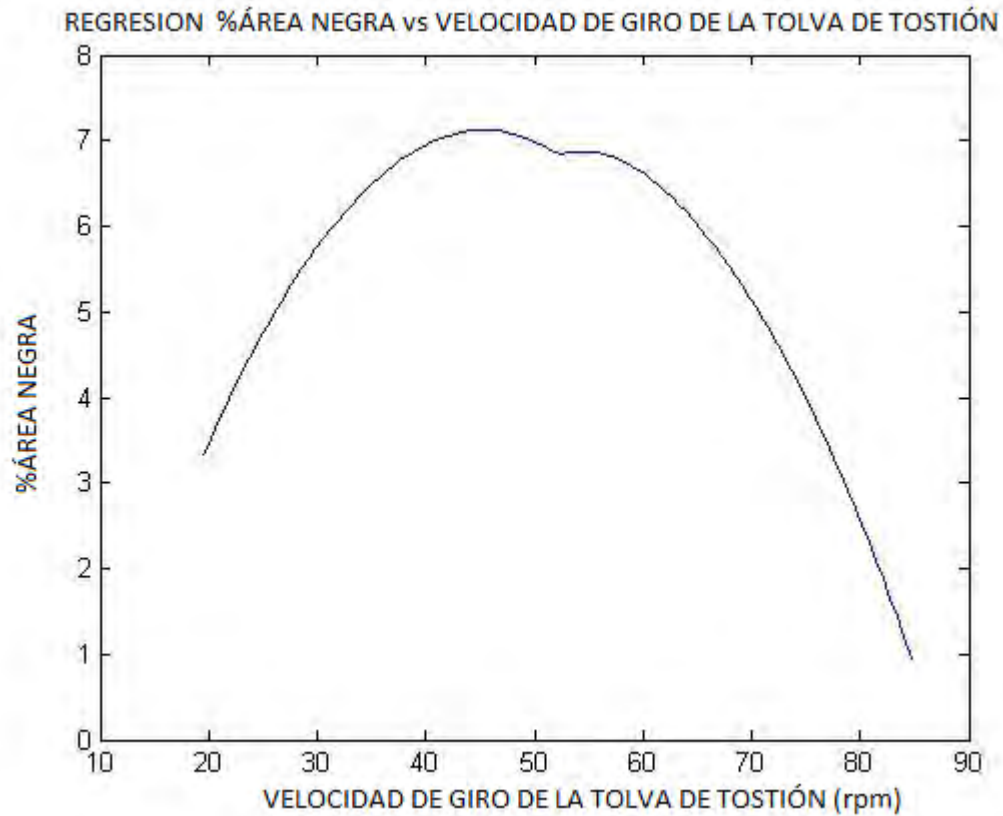
Figura 43. Reporte gráfico de velocidad de la tolva vs % área negra para 50gr de café crudo obtenido por el software CoffeeCam1.3.



En la Figura 43 se observa que los datos se encuentran muy dispersos, esto se debe a que la cantidad de producto a analizar es muy pequeña, produciendo que el tratamiento y procesamiento de imágenes sea muy similar entre las tomas de imágenes, a pesar de esto la gráfica tiene un comportamiento a una tendencia central es decir alcanza su mejor comportamiento a datos intermedios específicamente en este caso a velocidades intermedias, y disminuye su rendimiento a medida que se aleja de la tendencia.

Para poder observar de una mejor manera la ya mencionada tendencia se le aplica una regresión a los datos, donde se obtiene una gráfica que sigue una curva aproximadamente gaussiana como se observa en la Figura 44.

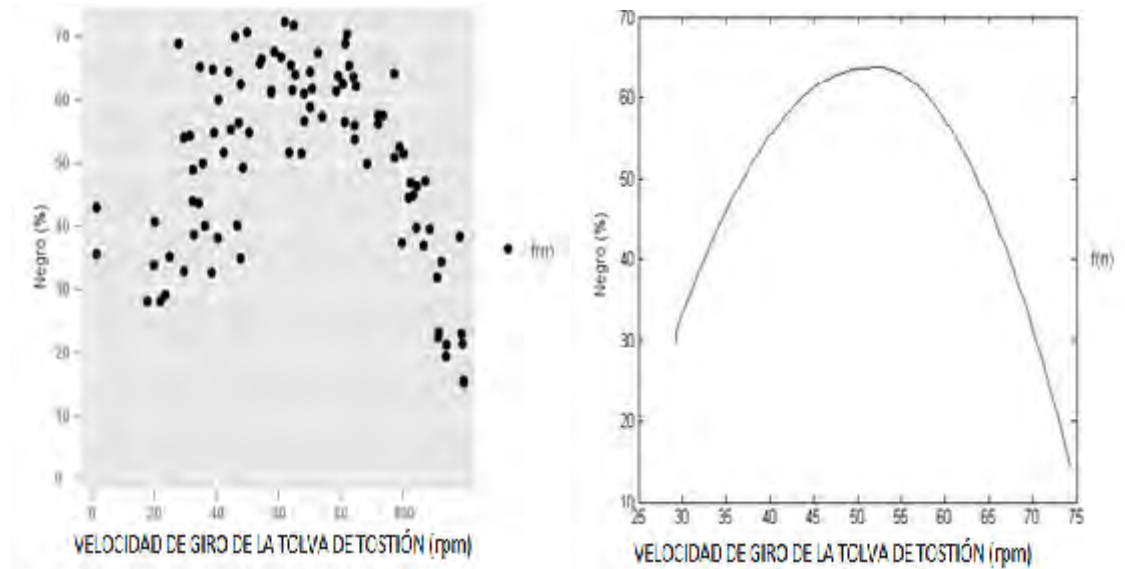
**Figura 44.** Curva de regresión aplicada a gráfico de velocidad de la tolva vs % área negra para 50gr de café crudo obtenido por el software CoffeeCam1.3.



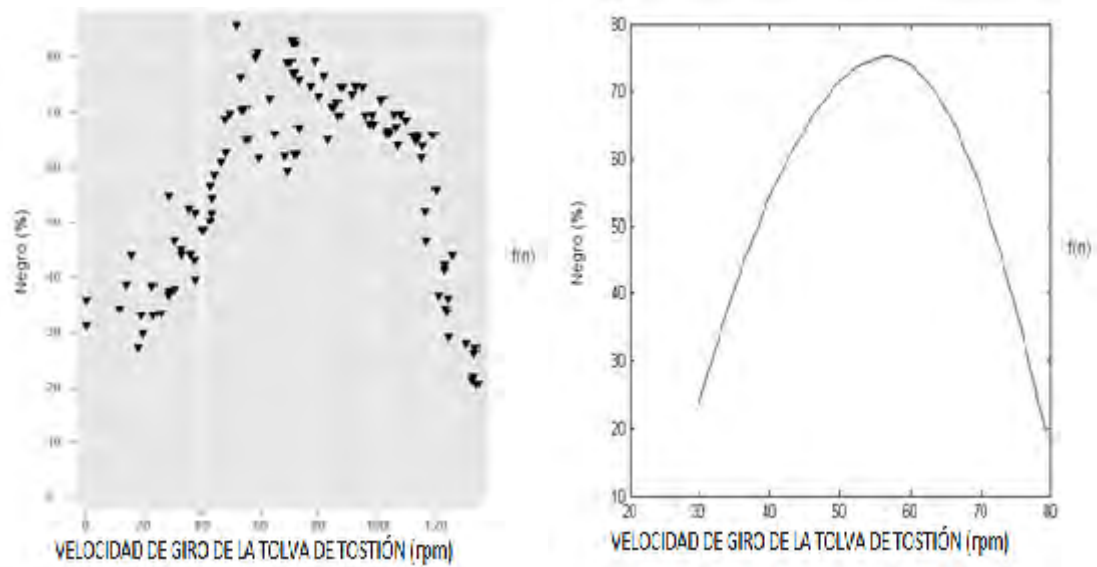
De las Figura 43 y 44 se tiene que para la cantidad de 50grs La velocidad ideal de la tolva de tuestión es de 39.52rpm además se estableció el porcentaje de PWM con la que se obtuvo esa velocidad, en este caso es 30.30% además del porcentaje de área negra en la imagen el cual fue de 27.43%.

A medida que aumenta la cantidad de café la adquisición de los datos son más precisos, ya que se facilita para el software el cálculo del área negra, para poder observar la evolución del proceso se muestra el comportamiento y respectiva regresión para 500gr, 1000gr y 1500gr como se observa en las figuras 0, Figura 46 y Figura 47.

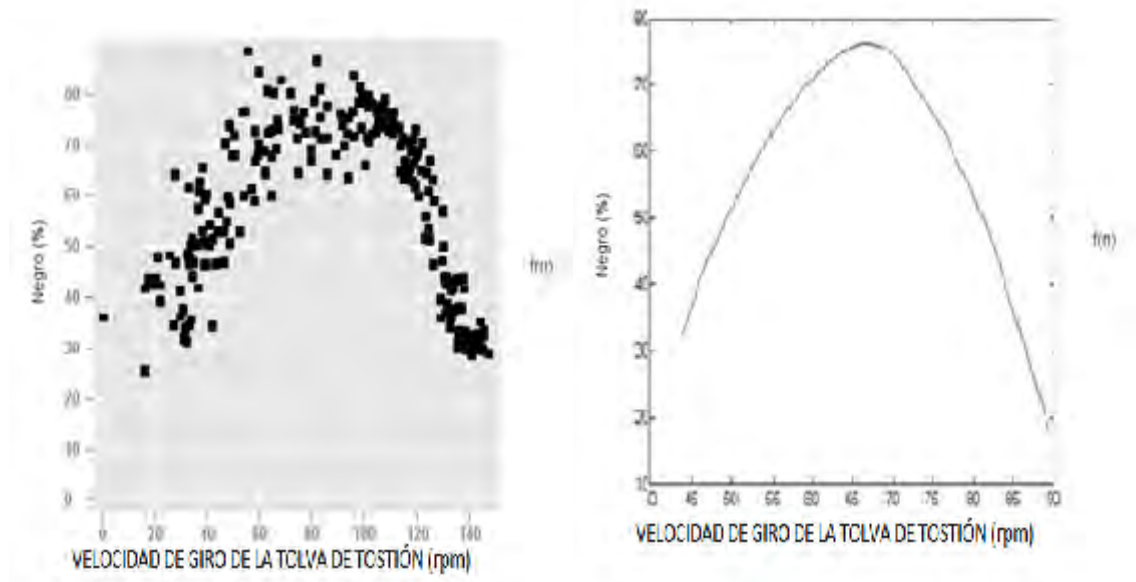
**Figura 45.** Reporte gráfico y su respectiva regresión aplicada a los datos de velocidad de la tolva vs %área negra para 500gr de café crudo. CoffeeCam1.3.



**Figura 46.** Reporte gráfico y su respectiva regresión aplicada a los datos de velocidad de la tolva vs %área negra para 1000gr de café crudo. CoffeeCam1.3.



**Figura 47.** Reporte gráfico y su respectiva regresión aplicada a los datos de velocidad de la tolva vs %área negra para 1500gr de café crudo. CoffeeCam1.3.



Respecto al comportamiento con la cantidad de 50gr se observa una evolución en la tendencia de la gráfica, siendo más evidente la velocidad de giro que requiere la tolva de tosti6n.

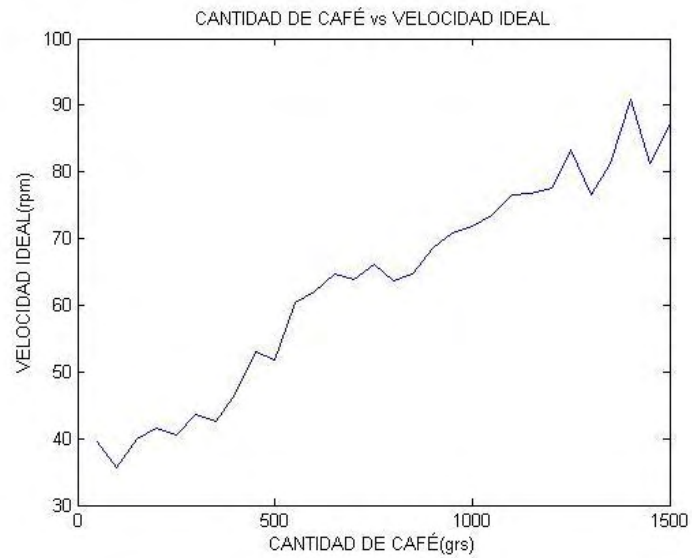
Con la posibilidad de obtener todos estos datos se procede a realizar el mismo proceso para las cantidades correspondientes obteniendo los datos que se observan en la tabla 7.

**Tabla 7. Base de datos obtenida para café crudo desde 50gr hasta 1500gr.**

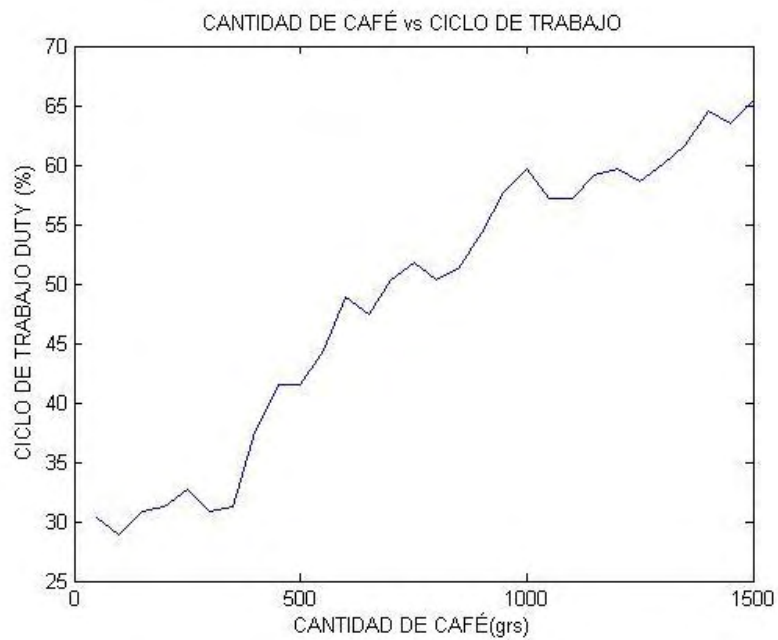
PESO INICIAL DE CAFÉ(gramos)	CANTIDAD REAL DE CAFÉ (gramos)	ÁREA NEGRA (%)	VELOCIDAD IDEAL (rpm)	CICLO DE TRABAJO (%)
50	50	27.43	39.52	30.30
100	100	41.9	35.71	28.83
150	150	48.63	39.89	30.79
200	200	56.51	41.58	31.28
250	250	63.4	40.59	32.74
300	300	64.85	43.61	30.79
350	350	67.42	42.66	31.28
400	400	68.74	46.61	37.63
450	450	74.42	52.95	41.54
500	500	73.34	51.77	41.54
550	550	75.24	60.36	44.47
600	600	79.54	62.05	48.87
650	650	82.38	64.66	47.41
700	700	82.23	63.80	50.34
750	750	85.12	66.22	51.81
800	800	86.57	63.68	50.34
850	850	86.51	64.78	51.31
900	900	89.05	68.48	54.25
950	950	91.8	70.77	57.67
1000	1000	91.12	71.82	59.63
1050	1050	98.18	73.56	57.18
1100	1100	98.65	76.66	57.18
1150	1150	98.7	76.74	59.14
1200	1200	90.96	77.58	59.62
1250	1250	90.48	83.33	58.65
1300	1300	94.97	76.56	60.11
1350	1350	91.47	81.26	61.58
1400	1400	94.05	90.99	64.51
1450	1450	93.72	81.25	63.53
1500	1500	96.25	87.13	65.49

Se puede observar que a medida que aumenta la cantidad de producto, la velocidad que requiere la tolva y por ende el ciclo de trabajo aumenta como se observa en las Figura 48 y Figura 49.

**Figura 48.** Grafica de velocidad ideal vs cantidad de café para café crudo.



**Figura 49.** Grafica de ciclo de trabajo útil ideal vs cantidad de café para café crudo.

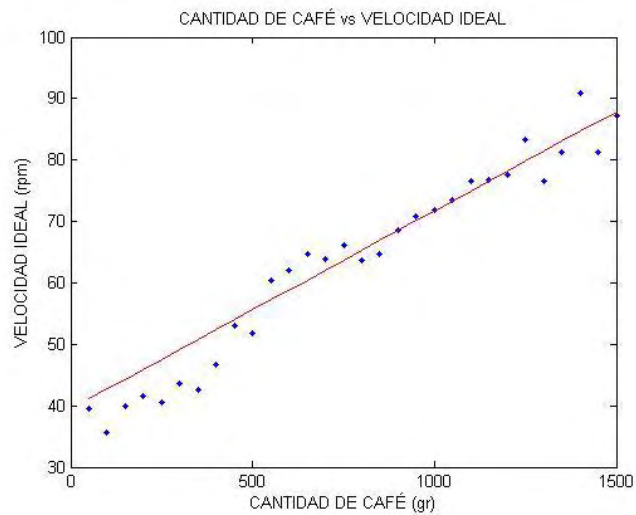


Para tener un control en la cantidad de café en el aire es necesario controlar una de estas dos variables, ya que el ciclo de trabajo puede verse afectado tanto por

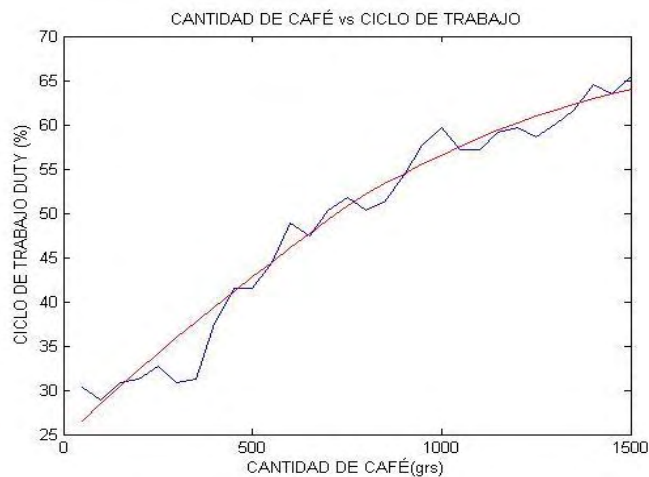


aspectos electrónicos como físicos y mecánicos la hace una variable más complicado de manipular, por lo cual es preferible manejar la velocidad ideal de giro a pesar de la dificultad de su lectura. Partiendo de esto observamos la tendencia de comportamiento de estas variables dependiendo de la cantidad de café como se observa en la Figura 50 y Figura 51.

**Figura 50.** Regresión lineal aplicada a datos de velocidad ideal vs cantidad de café para café crudo.



**Figura 51.** Regresión exponencial aplicada a datos de ciclo de trabajo útil ideal vs cantidad de café para café crudo.



Como se observa en las Figura 50 y Figura 51 El comportamiento de la velocidad es lineal a diferencia de la del ciclo de trabajo la cual tiene un comportamiento exponencial, lo cual es una razón más por la cual se decide trabajar como variable dependiente a la velocidad ideal de giro.

Ya establecida la variable a manejar y el tipo de curva que esta tiene se procede a encontrar la ecuación de la recta, la cual es del tipo.

$$v_{ideal} = K_1 * C_{café} + K_2 \quad (27)$$

Dónde:

- $V_{ideal}$  es la velocidad ideal de giro de la tolva en rpm.
- $K_1$  es la contante de proporcionalidad de la recta.
- $C_{café}$  es la cantidad de café que se ingresa a la tolva en gr.
- $K_2$  es la constante de condición inicial.

Para este caso específico se han establecido los valores de las constantes obteniendo la ecuación.

$$v_{ideal} = 0.03228 * C_{café} + 39.47 \quad (28)$$

### **3.9.2 Pruebas y tratamiento de datos con café a un 20% del proceso de tostión.**

Dentro de la tostión de café hay ciertas etapas importantes ya que dentro de estas se presentan cambios físicos y químicos, por esto es importante tener en cuenta que la velocidad ideal de la tolva está sujeta a cambios durante el proceso, para este caso cuando el café llega a un 20% del proceso de tostión sufre una pérdida de líquidos que se refleja en la disminución de su masa inicial por lo cual se procedió a realizar nuevas pruebas con café en esta fase de tostión, obteniendo los resultados mostrados en la tabla 8.

**Tabla 8. Base de datos obtenida para café a 20% de tostión desde 50gr hasta 1500gr.**

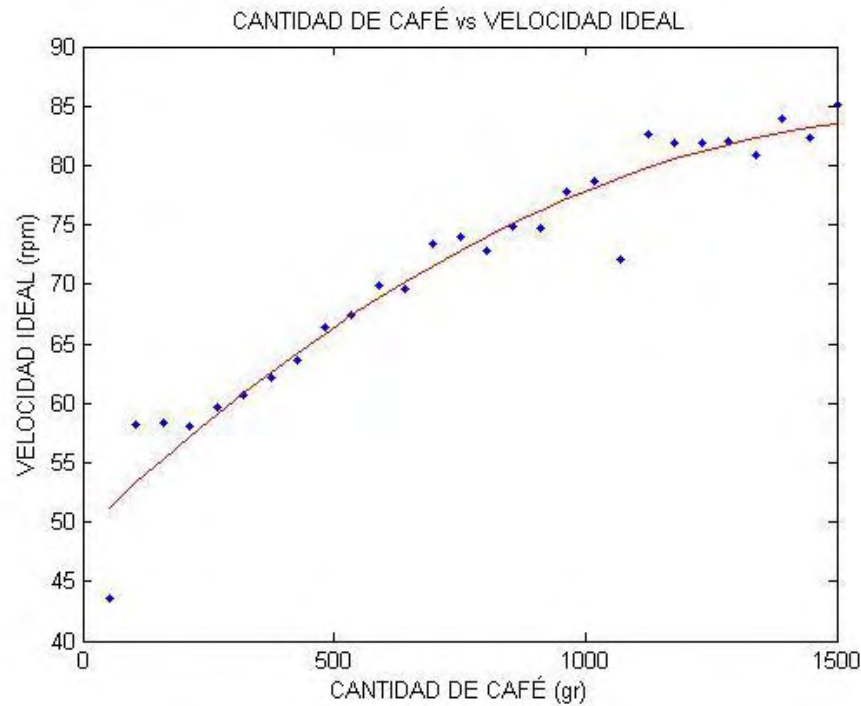
PESO INICIAL DE CAFÉ (gramos)	PESO REAL DE CAFÉ (gramos)	ÁREA NEGRA (%)	VELOCIDAD IDEAL (rpm)	CICLO DE TRABAJO (%)
53,57	50	27.64	43.52	42.81
107,14	100	37.04	58.15	46.72
160,71	150	44.64	58.32	47.31
214,29	200	44.84	58.06	47.50
267,86	250	53.92	59.61	48.09
321,43	300	57.32	60.63	48.68
375,00	350	61.31	62.22	49.26
428,57	400	61.32	63.60	50.24
482,14	450	63.72	66.39	52
535,71	500	69.26	67.39	52
589,29	550	64.89	69.88	53.17
642,86	600	67.81	69.58	53.56
696,43	650	66.08	73.46	55.13
750,00	700	65.28	74.00	55.91
803,57	750	68.35	72.83	57.08
857,14	800	67.99	74.91	59.23
910,71	850	67.26	74.76	58.84
964,29	900	67.4	77.73	58.26
1017,86	950	66.51	78.61	58.65
1071,43	1000	63.05	72.04	57.18
1125,00	1050	66.25	82.59	60.21
1178,57	1100	65.32	81.83	60.80
1232,14	1150	81.87	81.87	61.1
1285,71	1200	68.74	82.01	61.19
1339,29	1250	64.43	80.79	60.98
1392,86	1300	66.95	83.87	62.95
1446,43	1350	66.63	82.38	62.95
1500,00	1400	70.47	85.15	63.14

Con estos datos se procede a encontrar una ecuación mediante regresión polinómica como se realizó en el apartado anterior, pero de mayor orden obteniendo como resultado la ecuación.

$$v_{ideal} = -1.155 * 10^{-5} * C_{café}^2 + 0.04026 * C_{café} + 49.15 \quad (29)$$

A partir de la ecuación se procede a realizar una comparación entre los valores reales obtenidos y la regresión aplicada como se observa en la Figura 52.

**Figura 52.** Regresión polinómica de segundo orden aplicada a datos de velocidad ideal vs cantidad de café para café al 20% de tostión.



### **3.9.3 Pruebas y tratamiento de datos con café a un 53.33% del proceso de tosti3n.**

En esta fase hay que tener en cuenta que el caf3 al estar sometido al calor aumenta su volumen y sigue perdiendo masa, esta etapa es un punto clave ya que se produce el primer crujido por lo cual se procedi3 a realizar nuevas pruebas con caf3 en esta fase de tosti3n, obteniendo los resultados mostrados en la tabla 9.

**Tabla 9. Base de datos obtenida para café a 53.3% de tostión desde 50gr hasta 1500gr.**

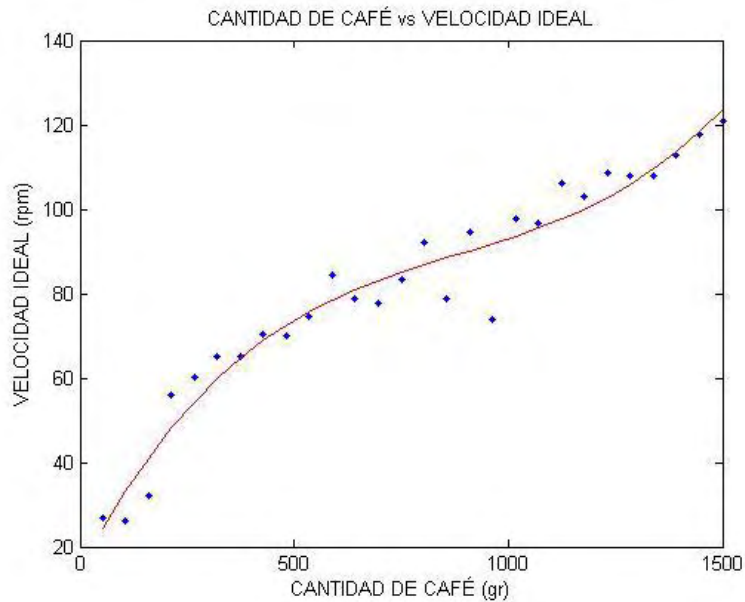
PESO INICIAL DE CAFÉ(gramos )	PESO REAL DE CAFÉ (gramos)	ÁREA NEGRA (%)	VELOCIDAD IDEAL (rpm)	CICLO DE TRABAJO (%)
53,57	48	50.57	26.99	30.5
107,14	98	55.25	26.05	29.91
160,71	148	52.95	32.28	32.26
214,29	198	58.51	56.13	41.25
267,86	248	68.8	60.27	43.2
321,43	298	76.98	65.1	45.55
375,00	348	81.99	65.17	45.55
428,57	398	83	70.27	46.72
482,14	448	86.8	70.02	47.7
535,71	498	83.35	74.4	50.63
589,29	548	80.48	84.29	55.13
642,86	598	83.94	78.92	54.15
696,43	648	86.96	77.67	56.1
750,00	698	86.59	83.4	56.7
803,57	748	77.67	92.12	60.21
857,14	798	87.12	78.67	52.78
910,71	848	80.54	94.46	60.21
964,29	898	84.93	73.94	51.8
1017,86	948	85.1	97.73	62.17
1071,43	998	85.36	96.78	61.38
1125,00	1048	76.76	106.04	65.49
1178,57	1098	84.31	102.91	62.76
1232,14	1148	84.29	108.44	66.67
1285,71	1198	90.38	107.74	65.88
1339,29	1248	86.54	107.73	67.25
1392,86	1298	86.37	112.72	68.42
1446,43	1348	86.15	117.6	71.16
1500,00	1398	84.18	120.94	72.33

Con estos datos se procede a encontrar una ecuación mediante regresión polinómica como se realizó en el apartado anterior obteniendo como resultado la ecuación 38.

$$v_{ideal} = 6.805 * 10^{-8} * C_{café}^3 - 0.0001811 * C_{café}^2 + 0.1912 * C_{café} + 14.81 \quad (30)$$

A partir de la ecuación se procede a realizar una comparación entre los valores reales obtenidos y la regresión aplicada como se observa en la Figura 53.

**Figura 53.** Regresión polinómica de tercer grado aplicada a datos de velocidad ideal vs cantidad de café para café al 53.3% de tosti3n.



#### **3.9.4 Pruebas y tratamiento de datos con café a un 100% del proceso de tosti3n.**

Al finalizar el proceso de tosti3n se producen cambios qu3micos dentro del grano de café tales como la liberaci3n de aceites y azucares y su caramelizaci3n debido a esto y a que sigue perdiendo masa se procedi3 a realizar nuevas pruebas con café en la fase final de torrefacci3n, obteniendo los resultados mostrados en la tabla 10.

**Tabla 10. Base de datos obtenida para café tostado desde 50gr hasta 1500gr.**

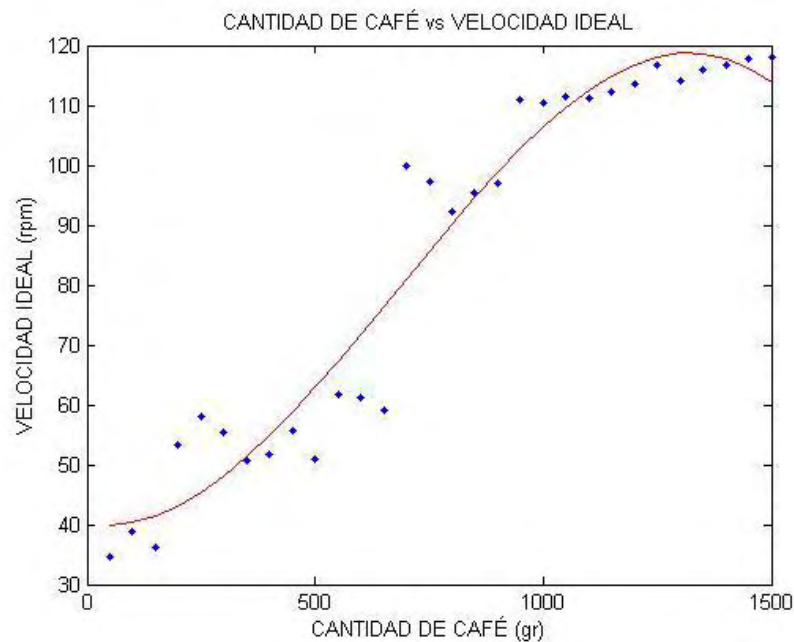
PESO INICIAL DE CAFÉ (gramos)	PESO REAL DE CAFÉ(gramos)	ÁREA NEGRA (%)	VELOCIDAD IDEAL (rpm)	CICLO DE TRABAJO (%)
50	43,33	57.94	34.68	33.63
100	86,67	58.17	38.94	32.45
150	130,00	63.2	36.16	29.91
200	173,33	64.49	53.33	39.1
250	216,67	72.13	57.91	40.86
300	260,00	75.19	55.41	40.86
350	303,33	78.44	50.71	38.91
400	346,67	83.26	51.58	40.27
450	390,00	84.31	55.70	42.82
500	433,33	88.22	51.01	39.01
550	476,67	86.24	61.82	46.53
600	520,00	89.28	61.1	47.51
650	563,33	90.68	58.99	46.92
700	606,67	88.79	99.74	63.93
750	650,00	86.67	97.14	61.97
800	693,33	93.12	92.14	61.58
850	736,67	87.15	95.46	62.95
900	780,00	87.15	96.92	63.54
950	823,33	83.49	110.94	70.94
1000	866,67	80.39	110.31	71.55
1050	910,00	79.08	111.57	71.55
1100	953,33	84.71	111.22	71.36
1150	996,67	84.21	112.15	71.94
1200	1040,00	89.44	113.60	74.10
1250	1083,33	88.40	116.71	75.46
1300	1126,67	83.25	114.07	74.88
1350	1170,00	79.65	115.94	75.07
1400	1213,33	85.62	116.67	76.02
1450	1256,67	86.03	117.76	78.09
1500	1300,00	89.92	117.95	80.2

Con estos datos se procede a encontrar una ecuación mediante regresión polinómica como se realizó en el apartado anterior obteniendo como resultado la ecuación 39.

$$v_{ideal} = -7.567 * 10^{-8} * C_{café}^3 + 0.0001547 * C_{café}^2 - 0.0128 * C_{café} + 40.09 \quad (31)$$

A partir de la ecuación se procede a realizar una comparación entre los valores reales obtenidos y la regresión aplicada como se observa en la Figura 54.

**Figura 54.** Regresión polinómica de tercer grado aplicada a datos de velocidad ideal vs cantidad de café para café tostado.



### 3.9.5 Determinación de superficie de control.

Ya obtenidos los resultados de las pruebas de diversas cantidades de café en sus diferentes estados durante el proceso de torrefacción se observó que la velocidad ideal de la tolva dependía de estas dos variables tanto la cantidad de café que se desea tostar como el momento del proceso en la que se encuentra el producto.

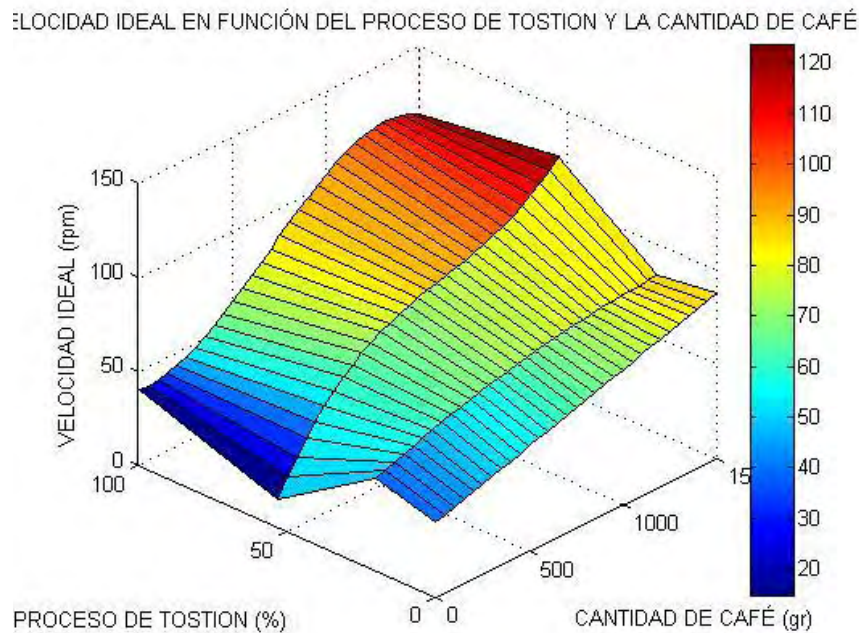
Se observa la dependencia directa de la cantidad de producto, además de los cambios de pendiente cuando alcanza diferentes puntos de tosti3n, cuando pasa de estar crudo a un 20% de proceso, es decir cuando el grano pierde la gran mayoría de líquidos se observa que la tendencia de la recta es a ser menos inclinada, es decir tiene una menor pendiente lo que se refleja en una disminuci3n



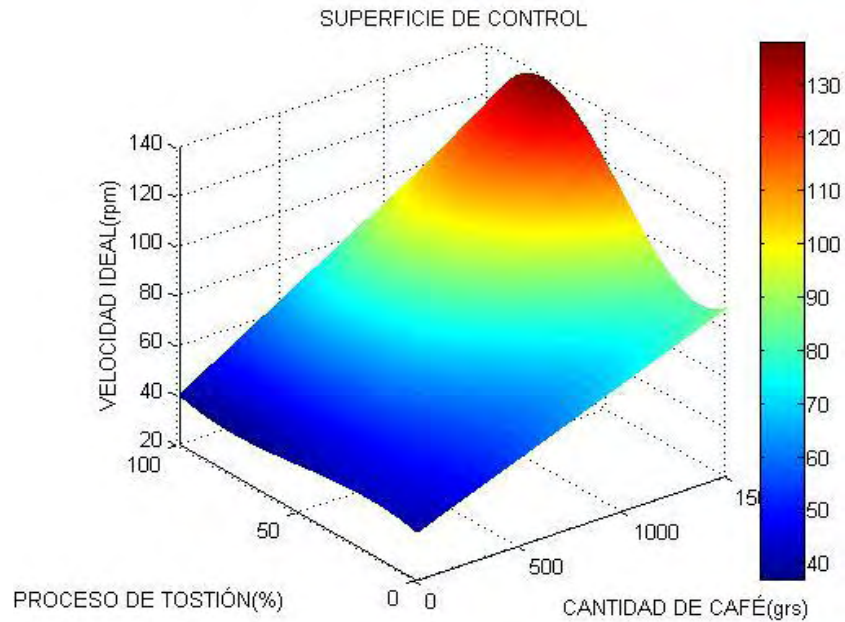
de velocidad, después de esto ocurre un aumento en el volumen del producto hasta que llega a un 53.3% del proceso para esta etapa se presenta el cambio más drástico respecto a la recta obtenida, ya que cambia a casi el doble el valor de la pendiente respecto a la información anterior y finalmente desde este punto hasta el final del proceso, es decir donde se conlleva sobretodo procesos químicos, y se observa que el cambio de velocidad es mínimo respecto a la anterior recta. Con esta información se puede decir de forma general que la velocidad depende directamente de la cantidad de producto y del volumen del mismo, e inversamente a la masa que este tenga.

Con esta información y con las ecuaciones obtenidas en los apartados anteriores se procedió a definir una superficie de control. Ya que se establecieron cuatro puntos importantes dentro del proceso de tuestión se cuenta con cuatro ecuaciones lo cual limita la determinación de la velocidad ideal en cualquier momento como se observa en la Figura 55, por lo tanto se realizó una interpolación a los datos obteniendo una información completa respecto a la velocidad que deberá tener la tolva de tuestión en cualquier instante dentro del proceso de tuestión. El resultado de la interpolación de los datos se puede observar en la Figura 56.

**Figura 55.** Velocidad ideal de la tolva de tuestión en función de la cantidad de café y su estado de tueste.



**Figura 56.** Superficie de control de velocidad ideal de la tolva de tuestión dependiendo de la cantidad de producto y el momento del proceso en que se encuentre.



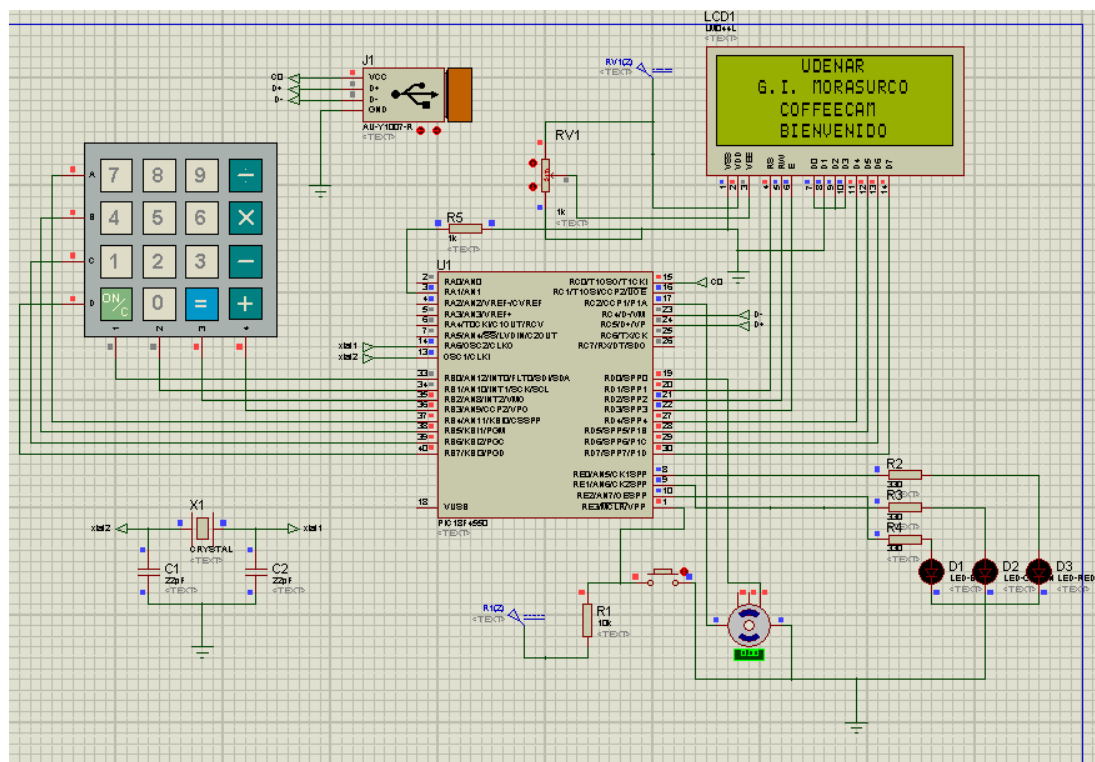
### **3.10 PROTOTIPO FINAL PARA TOSTIÓN DE CAFÉ.**

Con el objetivo de obtener un dispositivo portátil y versátil se hace necesario compactar en un solo prototipo un sistema capaz de realizar diferentes tareas, específicamente el módulo de realización de pruebas con ayuda del Software CoffeeCam1.3 y un módulo automático el cual debe estar sintonizado a partir de los datos obtenidos mediante la superficie de control adquirida gracias a las pruebas realizadas en el apartado anterior, para garantizar una torrefacción homogénea del café, donde es necesario establecer las variables de entrada para su funcionamiento ideal. Respecto a lo establecido en los apartados de hardware y firmware de visión artificial, se procede a realizar mejoras para la adaptación del sistema en conjunto.

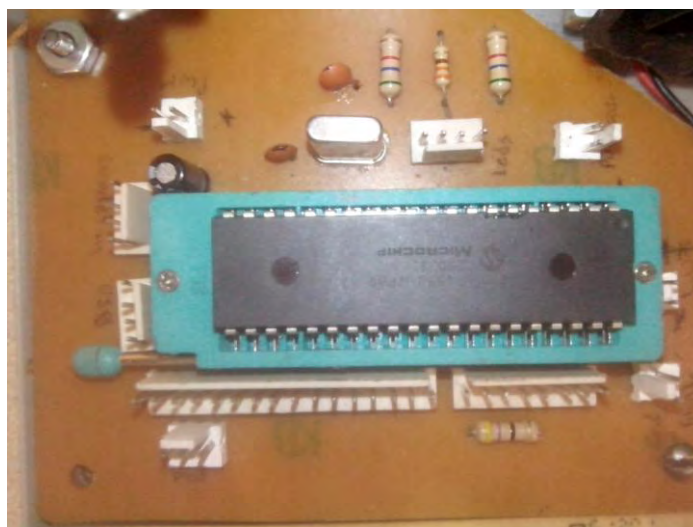
### 3.10.1 Hardware del prototipo final.

El nuevo sistema está compuesto por la tarjeta de adquisición de datos adaptada para algunos cambios, se conserva la etapa de potencia y se agregan 2 dispositivos que permiten la manipulación y visualización de algunas características del proceso los cuales son una pantalla LCD de 4x20 que necesita un potenciómetro para regular la intensidad de iluminación de los caracteres de esta y además un teclado matricial de 4x4 [29]. El diseño se modifica para tener 3 leds de aviso que se consolidan en un solo led tipo RGB, todos los cambios descritos en la nueva tarjeta de adquisición de datos pueden observarse en las Figura 57 y Figura 58.

Figura 57. Diagrama de la simulación en proteus para el modulo final de adquisición de datos.



**Figura 58.** Módulo de tarjeta de adquisición de datos final.



Todo el sistema alimentado mediante una fuente de computador adecuada que genera los 12v DC con una buena potencia para la alimentación del motor y 5v DC para la alimentación de microcontrolador y demás circuitos que consta de un fusible de protección y para evitar el sobrecalentamiento se instala un ventilador de refrigeración como se observa en la Figura 59.

**Figura 59.** Vista trasera del dispositivo final donde se observa el sistema de refrigeración y fusible de protección.



Con el fin de organizar todo el sistema en un solo compartimiento se fabricaron módulos por separado para obtener un sistema más robusto. Dentro del compartimiento se instalaron pequeñas tarjetas que permite la interacción con la máquina y el usuario, dentro de estas se encuentran una tarjeta para el conector USB, las salidas de potencia para el motor y la luz, un puerto para obtener la información que proporciona el encoder y un botón que permite el reinicio del dispositivo además de componentes ya mencionados como el teclado matricial 4x4, la pantalla LCD 4x20, potenciómetro para la calibración de la pantalla y el led RGB de aviso. Todos estos aspectos pueden observarse en las Figura 60, Figura 61 y Figura 62.

**Figura 60.** Vista frontal del dispositivo final donde se observa salidas de potencia para el motor y sistema de iluminación, la entrada de información de encoder, el puerto para comunicación USB y botón de encendido y apagado.

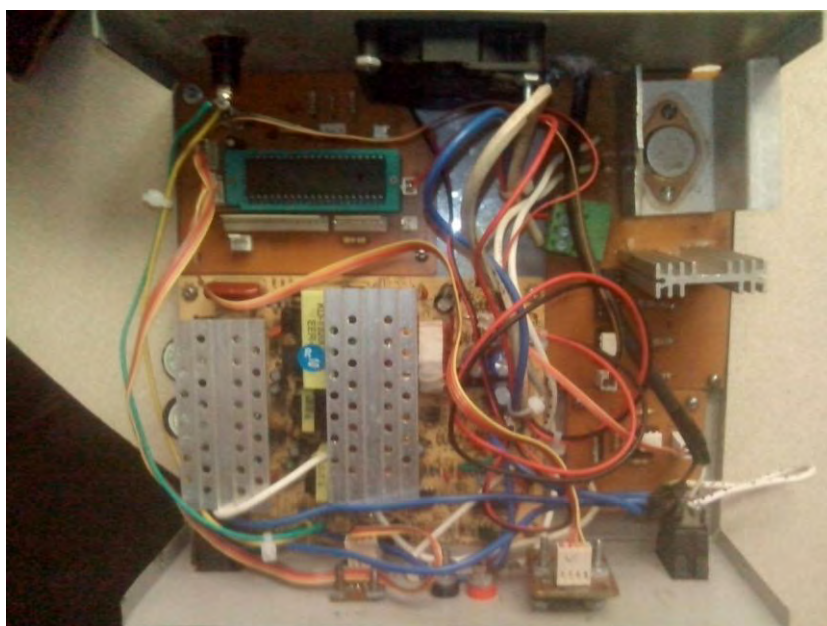




**Figura 61.** Vista superior del dispositivo final donde se observa la pantalla LCD 4x20, el teclado matricial 4x4, el potenciómetro de calibración de brillo de la pantalla, led RGB de aviso y pulsador de reinicio.



**Figura 62.** Vista interna del prototipo final, donde se observa el módulo de adquisición de datos, la etapa de aislamiento y potencia para el motor, etapa de potencia para la iluminación y la fuente de alimentación.



Las PCB'S para la realización de los circuitos impresos fueron diseñadas en el software EAGLE 5.1 y Los archivos obtenidos pueden verse en la carpeta ANEXO I dentro de la carpeta de ANEXOS del CD-ROM.

Además el uso del prototipo es explicando en el manual de usuario el cual puede verse en la carpeta ANEXO J que se encuentra dentro de la carpeta de ANEXOS del CD-ROM.

### **3.10.2 Firmware del prototipo final.**

Dentro del firmware que se desarrolló inicialmente se presenta una pantalla de bienvenida al usuario, a partir de aquí se presenta un menú de opciones, donde se puede escoger entre el módulo de pruebas y el módulos de tosti3n, en este momento es donde el teclado se encarga de dar las 3rdenes seg3n el usuario requiera, cuando se escoge la opci3n 1, es decir el m3dulo de pruebas se muestra en la pantalla un mensaje de cargando, el cual da la espera para que el usuario conecte el cable USB al dispositivo, a partir de este momento todo el desarrollo queda en manos del software CoffeCam1.3 ya mencionado (v3ase en Software). En caso de seleccionar la opci3n n3mero 2 el firmware permite la introducci3n en el m3dulo de tosti3n en este momento se muestra en la pantalla la pregunta de, 3cu3al es la cantidad que desea tostar?, en este caso hay que escoger la cantidad mediante el teclado teniendo la opci3n de borrar para una mayor facilidad al usuario, al tener la cantidad deseada se debe presionar la tecla asterisco(\*) para iniciar el proceso, dentro de este se ordena al motor rotar con un 50% de ciclo de trabajo, despu3s de esto se busca la velocidad ideal que se establece por la cantidad de caf3 ingresada y por la etapa de tosti3n en que se encuentre, todos estos datos teniendo en cuenta los resultados de las pruebas ya realizadas (v3ase en pruebas y resultados), en esta etapa del c3digo es necesario realizar intervalos del momento en el que se encuentra la torrefacci3n, ya que esta representa cambios no predefinibles bajo reglas manipulables de una manera sencilla dentro de la programaci3n, por lo cual se define la velocidad ideal en cada intervalo dependiendo de la cantidad de producto que se desea tostar y del momento de tosti3n que se encuentra dentro del mismo intervalo. Ya que todas las ecuaciones que se establecieron en el apartado de pruebas y resultados se puede manejar con buena fidelidad de los datos de la siguiente forma.

$$v_{ideal} = K_1 * C_{caf3} + K_2 \quad (32)$$

Dónde:

- $V_{ideal}$  es la velocidad ideal de giro de la tolva.
- $K_1$  es la constante de proporcionalidad de la recta.
- $C_{café}$  es la cantidad de café que se ingresa a la tolva.
- $K_2$  es el intercepto con el eje y.

Donde se puede identificar que la velocidad ideal depende de la cantidad de café y de las constantes establecidas. Ya que estas constantes cambian en cada ecuación encontrada para los diferentes estados del café en su proceso de tostión, se puede decir que las constantes cambian según en el momento del proceso en la que se encuentre el producto, por lo cual estas van a comportarse de forma variable dentro de cada intervalo y ya que se tienen dos puntos establecidos dentro del intervalo, el inicial y el final, se procede a encontrar la variación de estas llamada ahora factores de cambio. Teniendo que.

$$K_1 = c_1 * M_{t1} + c_2 \quad (33)$$

$$K_2 = c_3 * M_{t2} + c_4 \quad (34)$$

Dónde:

- $K_1$  y  $K_2$  son factores de cambio que determinan la velocidad ideal dentro de cada intervalo.
- $C_1$  y  $C_3$  son constantes de proporcionalidad.
- $C_3$  y  $C_4$  son constantes de condiciones iniciales.
- $M_{t1}$  y  $M_{t2}$  son el momento en la que se encuentra el proceso que puede tomar valores de 0 a 20 para el primer intervalo, de 20 a 53,3 para el segundo intervalo y de 53,3 a 100 para el tercer intervalo.

Como se mencionó anteriormente se establecerá el valor de las constantes con la ecuación de una recta dependiendo del intervalo en el que se encuentre, obteniendo los siguientes resultados.



**Tabla 11. Cambio de constantes dependiendo del intervalo de tostión que se encuentre el producto.**

INTERVALO DE PROCESO DE TOSION	C1	C2	C3	C4
0%-20%	-0.0001775	0.03228	0.1235	39.47
20%-53.3%	0.0007791	0.01315	-0.0927	43.79
53.3%-100%	-0.0001097	0.06055	0.02079	37.74

Por lo cual se establece que la velocidad ideal será.

$$v_{ideal} = K_1 * C_{café} + K_2 \quad (35)$$

Dónde.

$$K_1 = c_1 * M_{t1} + c_2 \quad (36)$$

$$K_2 = c_3 * M_{t2} + c_4 \quad (37)$$

Y cuando el producto finalice el proceso de tostión aparecerá un mensaje en la pantalla mostrando “proceso finalizado” y a partir de este punto mantendrá la última velocidad que se haya establecido ya que esta corresponde a la velocidad ideal para el producto finalizado, y donde el giro de la tolva solamente se detendrá cuando el usuario desee retirar el producto presionando la tecla de parada, para evitar la sobre tostión con las paredes internas del recipiente.

Para la lectura de la velocidad se utiliza el mismo algoritmo utilizado para la realización de pruebas (véase en LECTURA DE VELOCIDAD DE LA TOLVA DE TOSTION.), con la diferencia que se realiza 100 veces este análisis, para tener una mayor fiabilidad en los datos obtenidos, la búsqueda de la velocidad lo hace mediante un control sencillo, donde si la velocidad real del tambor supera a la velocidad ideal, se disminuye proporcionalmente a la diferencia y viceversa como se indica en la ecuación.

$$C_v = \frac{\left(\frac{V_i}{V_r} - 1\right) * duty}{3} \quad (38)$$

Dónde:

- $C_v$  es el cambio de velocidad, es decir el aumento o disminución de velocidad.
- $V_i$  es la velocidad ideal del sistema en rpm.
- $V_r$  es la velocidad real del sistema en rpm.
- Duty es el ciclo de trabajo del motor.

En la ecuación se observa que si la velocidad real está por encima de la velocidad ideal el cambio de velocidad que se realizará será negativo, obteniendo su reducción, y si por el contrario la velocidad real está por debajo de la ideal se obtendrá un valor positivo en el cambio, con lo cual se logra un aumento de la velocidad de rotación del motor. Este cambio se lo divide entre 3 ya que inicialmente se obtenían cambios drásticos, por lo cual era necesario amortiguarlos, lo que describe un control proporcional.

Dentro del código se establecieron condiciones de frontera que establecen que si se ha alcanzado la velocidad máxima del motor no se incremente más el ciclo de trabajo, ya que si esto sucede se desbordara el valor que se establece para PWM es decir el motor tendría un ciclo de trabajo del 0%, otra condición establece que si el decremento de velocidad que debe realizarse al motor es mayor a la velocidad que este tiene, se haga un decremento inferior al que se obtiene, ya que si esto no se hace se desbordara por abajo el valor que se establece a PWM obteniendo un ciclo de trabajo cerca del 100%.

Dentro de este módulo en la pantalla se mostraran datos como velocidad ideal, velocidad real y tiempo de tosti3n. Adem3s se tiene 2 teclas adicionales, una de ellas para parar el proceso, es decir detener el giro del motor, donde para seguir con el proceso se deber3 presionar la tecla continuar y otra tecla permite reiniciar el proceso.

Dentro del c3digo del Firmware para poder establecer el tiempo que lleva el proceso es necesario a3adir un reloj, para el cual se utiliza una interrupci3n aplicada por un Timer que se activa cada segundo teniendo en cuenta los c3lculos que se establecen en la ecuaci3n.

$$Interrupt_{TMR0} = 4 * \frac{1}{F.Oscilador} * (65536 - ValorTMR0) * Prescaler \quad (39)$$

Dónde:

- $Interrupt_{TMR0}$  es el tiempo que tarda para activarse la interrupción.
- F.Oscilador es la frecuencia de oscilación con la que trabaja el microcontrolador.
- ValorTMR0 es el valor modificable que puede variar entre 0 y 65536.
- Prescaler es un factor que me permite dividir la frecuencia de conteo.

Dentro de esta ecuación los valores que se puede variar con el fin de modificar el valor del tiempo de la interrupción son el Prescaler y valorTMR0 para el primer caso solo se pueden asignar valores correspondientes a potencia de 2, desde 1:1 hasta 1:256, y valorTMR0 valores entre 0 y 65536, en el código se ha escogido un Prescaler de 1:256 lo que permite tener la menor frecuencia, y para establecer el tiempo más cercano a 1 segundo se procede a encontrar el valorTMR0 con la siguiente ecuación.

$$ValorTMR0 = 65536 - \left( \frac{Interrupt_{TMR0} * F.Oscilador}{4 * prescaler} \right) \quad (40)$$

Donde el valor de  $Interrupt_{TMR0}$  equivale a 1 que es correspondiente a un segundo, el valor de F.Oscilador es de 48Mhz ya que es la frecuencia con la que trabaja el microcontrolador, el valor de Prescaler es de 1:256 porque me proporciona el mínimo valor de frecuencia y por ende el máximo tiempo que se puede trabajar como se ha mencionado anteriormente. Con lo cual se tiene que.

$$ValorTMR0 = 65536 - \left( \frac{1 * 48000000}{4 * 256} \right) \quad (41)$$

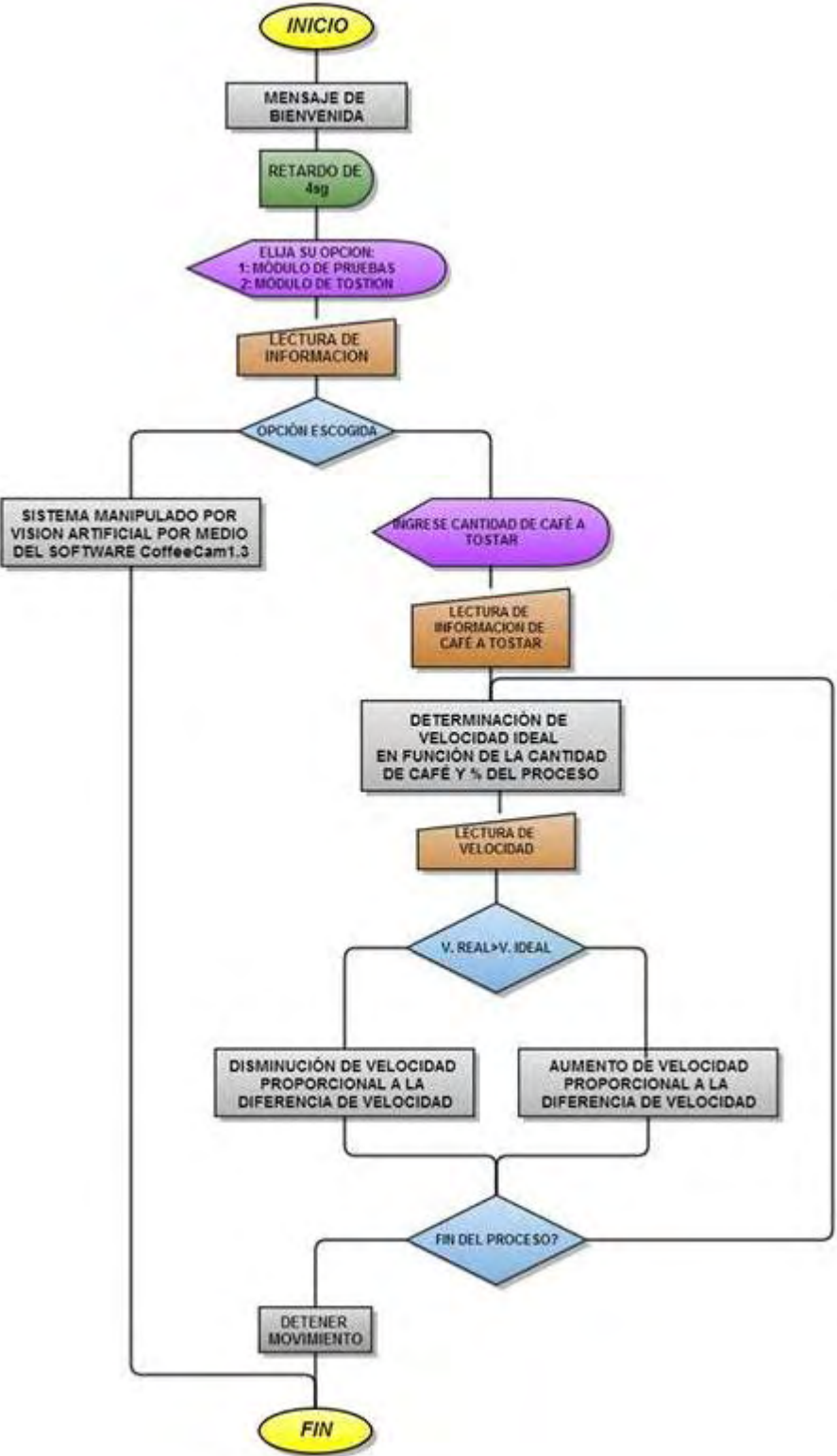
Teniendo que.

$$ValorTMR0 = 18661 \quad (42)$$

El valor que se establece para el TIMER 0 es de 18661, con el cual se tiene exactamente su activación cada segundo.

Dentro de esta interrupción también se analiza la entrada USB y se comprueba si existe una conexión exitosa, por lo cual se manipula el led RGB dependiendo de su estado de la siguiente manera; si el dispositivo no tiene conexión USB se activara el color verde, si el dispositivo está conectado vía USB pero no realiza una comunicación con la unidad controladora se activa el color rojo, y por ultimo si el dispositivo se conecta vía USB y además hay una conexión exitosa se activa el color azul. El firmware del dispositivo final para la tostión de café se resume en el diagrama de flujo mostrado en la Figura 63.

Figura 63. Diagrama de flujo del firmware para el dispositivo final de tostión de café.



#### **4. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN.**

Los resultados obtenidos dentro del proyecto se los puede dividir en 3 aspectos: el aspecto físico, el aspecto lógico, es decir la parte de programación y los efectos en el producto final.

Dentro de los resultados tangibles se puede destacar varios módulos, tales como tarjetas de adquisición de datos, módulos de potencia AC y DC y de aislamiento que se adapta a los requerimientos del proyecto y todas estas al tener su simulación y su respectiva PCB son circuitos duplicables que pueden ser utilizados en diversos sistemas ya que brinda un rango de funcionabilidad amplio en caso de ser necesitado para otra aplicación, pero tiene un limitantes, por ejemplo la etapa de potencia DC resiste trabajar hasta con una potencia de aproximadamente 1000 watts y a una frecuencia de operación de 5 KHz, dentro del módulo de potencia AC, se puede decir que trabaja hasta con una potencia de 5KWatts, teniendo en cuenta que se deben adaptar los disipadores necesarios, también se puede destacar que se puede variar o aumentar la potencia de operación realizando cambios de componentes. En cuanto a la TAD es necesario acoplar una etapa de aislamiento eléctrico para adaptar cualquier tipo de actuador, ya que en caso de que se presenten corrientes inversas pueden causar la pérdida del microcontrolador.

Además de obtuvo una tolva de tosti3n que esta soportado en planos los cuales permiten realizar su fabricaci3n si es necesario; ya que el dise1o para la tolva de tosti3n propuesto en el proyecto es ideal, en la realidad se presentaron inconvenientes ya que el cilindro interno presenta una desviaci3n y al girar presenta un movimiento indeseado durante un tramo de cada giro provocando cambios inesperados en la lectura de la velocidad, perdiendo a su vez uniformidad en la toma de los datos obtenidos. Otro de los resultados tangibles es una base adecuada para la toma de im1genes con iluminaci3n que presenta el inconveniente de tener un rango relativamente peque1o en cuanto a la distancia de separaci3n entre la iluminaci3n y el tambor interno.

Dentro de los resultados de programaci3n se encuentra el desarrollo de c3digo para microcontroladores, as3 como tambi3n una aplicaci3n en plataforma java. Dentro del c3digo del microcontrolador se destacan funciones como la lectura de frecuencia de un tren de pulsos los cuales se adapta a las condiciones propuestas por el sistema, adem1s tiene un rango mayor en caso de que se necesite en otras aplicaciones, pero est1 limitado inferiormente hasta un valor de 200mHz y en el l3mite superior por 5Khz. Ademas permite la manipulaci3n de una pantalla de 4x20



a un prototipo compacto que manipula la velocidad de giro de la tolva sintonizado mediante visión artificial a través del software CoffeeCam1.3. El dispositivo permite la realización de nuevas pruebas para la calibración del sistema o para la sintonización de diferentes recipientes.

En términos generales al entrar en el proceso de la torrefacción de café por medio de la inyección de aire caliente y poner en funcionamiento el sistema sintonizado se obtuvo un tueste uniforme, evitado en gran parte los problemas que se presentan con los tuestes tradicionales de la región, es decir un tueste sin movimiento o un tueste con una velocidad aleatoria, que genera sobretostión y tueste disparejo, lo que se ve reflejado en una disminución considerable en la calidad del café, el café tostado en la máquina diseñada en contraste con uno tostado de forma tradicional se muestra en la Figura 65.

**Figura 65.** Contraste entre café tostado mediante método tradicional y máquina sintonizada mediante visión artificial.





En la figura de la izquierda se muestra el café tostado de manera tradicional en el cual se puede distinguir un desarrollo menor del grano de café además de un tueste arrebatado y puntas disparejas.

Se realizaron análisis del tostado de café con ayuda del catador Q-GRADER profesional Evelio Lasso donde se obtuvieron fichas técnicas para 2 pruebas de 250gr obteniendo los resultados mostrados en las tablas 11 y 12.

**Tabla 12. Ficha técnica del producto tostado #1.**

CURVA DE TOSTION #1 UDENAR		
FICHA TÉCNICA DEL PRODUCTO TOSTADO		
CODIGO: 001.		
Fecha de Catación:	17/05/2014	Laboratorio: UDENAR
Fecha de muestreo:	16/05/2014	Catador: EVELIO LASSO
Presentación de muestra:	TOSTADO EN GRANO	Peso de la muestra (Gr): 250GR
Origen	N/A	
Variedad	N/A	Tipo de Tostión: MEDIA OSCURA
Rango de altitud:	N/A	Numero Agtron:
Época de cosecha	N/A	Molienda: MEDIA
PERFIL DE TAZA		
1.Fragancia/Aroma	8,00	CHOCOLATE CITRICO, CARAMELO
2. Sabor	7,75	DULCE CARAMELO ACHOCOLATADO
3. Sabor residual	7,50	CORTO
4. Acidez	7,00	BAJA
5. Cuerpo	7,75	MEDIO
6. Dulzor	8,00	MEDIO
7. Uniformidad	10,00	UNIFORME
8. Limpieza de la taza	10,00	LIMPIO
9. Balance	10,00	BALANCEADO

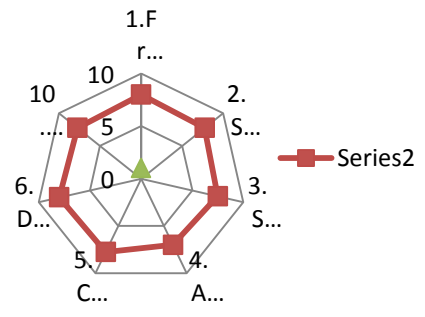
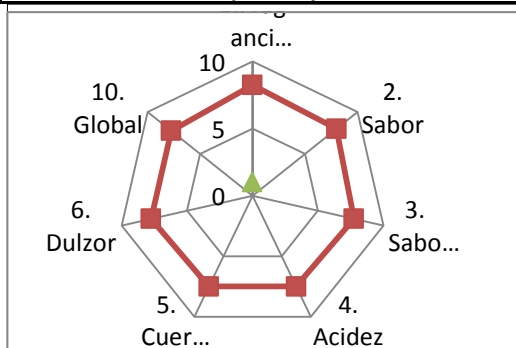
10. Global	7,75	CAFÉ DULCE CON NOTAS ACHOCOLATADAS CORTO EN SABOR ACIDES Y RECIDUAL CORTOS
<b>PUNTAJE FINAL (SCAA)</b>		<b>83,75</b>
		CURVA DE TOSTION
<b>OBSERVACIONES:</b> Curva de tostión lenta en inicio baja acides sube dulzor, sabor corto.		

Tabla 13. Ficha técnica del producto tostado #2.

CURVA DE TOSTION #2 UDENAR			
FICHA TÉCNICA DEL PRODUCTO TOSTADO			
CODIGO: 002.			
Fecha de Catación:	17/05/2014	Laboratorio:	UDENAR
Fecha de muestreo:	16/05/2014	Catador:	EVELIO LASSO
Presentación de muestra:	TOSTADO	Peso de la muestra (Gr):	250GR
Origen	N/A	Tipo de Tostión: Numero Agtron: Molienda:	MEDIA ALTA N/A Media
Variedad	N/A		
Rango de altitud:	N/A		
Época de cosecha	N/A		
PERFIL DE TAZA			
1.Fragancia/Aroma	8,25	CITRICO, FRUTOS ROJOS CARAMELO	

2. Sabor	8,00	ACHOCOLATADO, NOTAS CITRICAS
3. Sabor residual	7,75	DULCE, CORTO
4. Acidez	7,50	MEDIA
5. Cuerpo	7,50	MEDIO
6. Dulzor	7,75	ACARAMELADO
7. Uniformidad	10,00	UNIFORME
8. Limpieza de la taza	10,00	LIMPIO
9. Balance	10,00	BALANCEADO
10. Global	7,75	CAFÉ MAS DESARROLLADO EN SU SABOR
<b>PUNTAJE FINAL (SCAA)</b>		<b>84,50</b>



CURVA DE TOSTION

**OBSERVACIONES: CAFÉ MAS DESARROLLADO EN SU ESTRUCTURA DE SABOR, ACIDEZ MEDIA Y RECIDUAL UN POCO MAS PROLONGADO.**

**EVELIO AUDIAS LASSO B.**  
Catador Q-GRADER

A partir de esta evaluación se puede denotar que la uniformidad y el balance en los granos de café están en su máximo nivel, por lo tanto podemos decir que el objetivo de la final de la investigación se cumplió.

## **5. CONCLUSIONES.**

- Dentro del proceso de torrefacción del café se presentan cambios físicos y químicos que conllevan a que el control del sistema no pueda manipularse bajo condiciones constantes, por lo cual hay que tener en cuenta las variaciones que puede presentar el producto y adaptar el sistema para responder a estas.
- Al aplicar la sintonización mediante visión artificial se observa que dentro de la tolva la mayor cantidad de granos de café posibles se encuentran en el aire, lo que conlleva a que entren en contacto la menor cantidad de tiempo posible con las paredes del recipiente, y a su vez permite que la torrefacción se realice a partir de la convección con aire caliente, evitando de esta manera la sobretostión de los granos, tueste disparejo y un tueste incompleto influyendo así de manera directa en la calidad del café.
- El recipiente diseñado permite la extracción eficiente de la cascarilla al aplicarle el proceso de tosti3n de café, gracias a las perforaciones del cilindro interno y al constante movimiento. Esto evita los gases indeseables de combustión ya que estos afectan directamente en la calidad del producto final.
- Ya que la velocidad ideal de giro de la tolva de tosti3n depende de varios factores algunos de ellos no predefinibles tales como la variaci3n de volumen y masa de producto, fue necesario fijar intervalos en los cuales se pudo establecer los cambios de la velocidad mediante ecuaciones que utilizan variables conocidas tales como la cantidad de producto y el porcentaje del proceso de tosti3n en el cual se encuentra.
- Dentro del software se hizo necesario realizar un filtro personalizado, ya que los filtros por defecto de la plataforma no se adaptaban a los requerimientos del sistema. El filtro desarrollado es de tipo RGB y es el que más se acerca a capturar de forma limpia el café que se encuentra en el aire para posteriormente analizar los resultados.
- El arranque del motor dentro de cualquier proceso para diferentes cantidades de café es forzoso, por lo cual es necesario aplicar un porcentaje de PWM inicial que se encuentra entre el 30% y 50% dependiendo del peso a tostar. Facilitando el inicio en su movimiento y su posterior establecimiento.

- Dentro de la toma de imágenes se observó que los FPS de la cámara depende directamente de la iluminación, por lo cual para evitar inconvenientes en la captura y su posterior procesamiento de imágenes se adecua una base con iluminación externa dirigida hacia la parte interna del cilindro.
- Ya que la etapa mecánica presenta problemas que se refleja directamente en la lectura de velocidad inmediata fue necesario replantear el funcionamiento del sistema, donde la velocidad ideal no la encuentra directamente el software si no que se realiza un análisis de datos utilizados posteriormente para realizar el control.

## **6. RECOMENDACIONES.**

- Es posible realizar el control de la velocidad de giro de la tolva con otros métodos que permiten una mayor fidelidad de los datos adquiridos, mediante la utilización de sensores ya sea infrarrojos ultrasónicos o de radiación.
- Para utilizar la lógica del software descrita en primera medida es necesario realizar una fabricación óptima de la tolva de tosti3n, es decir que no tenga problemas mecánicos.
- Para obtener una toma de imágenes de mayor fidelidad se sugiere la utilización de cámaras de mayor velocidad de captura.
- Ya que el código ocupa gran parte de la memoria del microcontrolador, se podría realizar una optimización al firmware.
- Ya que el sistema en conjunto consta de la etapa de control de temperatura y la etapa de control de giro se recomienda realizar el acople de los dos sistemas en uno solo, es decir un solo prototipo, un solo software y un solo firmware.
- Modificar el software para que se realice el tratamiento de los datos dentro de la misma interfaz.
- Encontrar una funci3n que determine la velocidad ideal de giro en cualquier instante de tiempo, teniendo en cuenta variables de peso y volumen, es decir aplicar lógica difusa.
- Adaptar un sistema que permita de forma más sencilla la instalación de la base para toma de imágenes, sin perder la calidad en la captura.
- Para el proceso de tosti3n es necesario implementar un testeador en el cilindro que permita observar el avance de la tosti3n y el desarrollo del grano.
- Hay que tener en cuenta que a pesar de que el diseño de la tolva de tosti3n está determinada para poder procesar 2000gr de producto, es recomendable introducir como máximo aproximadamente el 50% de la capacidad, es decir 1000gr, ya que ara cantidades mayores el movimiento de los granos no permite el libre flujo de aire caliente dentro del cilindro.

## **7. REFERENCIAS.**

- [1] Café London, Curvas de tostión, marzo de 2010. Documento consultado 4 de septiembre del 2012 en línea disponible en:  
<http://caferdelosrios.blogspot.com/2012/03/curvas-de-tostion..html>
- [2] Camilo lagos, Luis Daniel Portilla, Jaime Orlando Ruiz, INFORME “DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA MÁQUINA DE TOSTIÓN PARA LA MICROEMPRESA “ALIANZA CAFÉ VIDA””, Enero 2012.
- [3] Cenicafé, Beneficio del café I, Documento consultado el 8 de enero del 2014 en línea disponible en :  
[http://www.cenicafe.org/es/publications/cartilla\\_20\\_beneficio\\_del\\_cafe.pdf](http://www.cenicafe.org/es/publications/cartilla_20_beneficio_del_cafe.pdf)
- [4] Documento consultado el 8 de enero del 2014 Disponible en línea en  
[http://avdiaz.files.wordpress.com/2010/09/ti01\\_200603.pdf](http://avdiaz.files.wordpress.com/2010/09/ti01_200603.pdf)
- [5] Cooperative coffees, Control de calidad, Documento consultado en el 8 de enero del 2014 en línea disponible en: <http://www.coopcoffees.com/for-producers/documentation/agriculture/manuel-control-de- calidad.pdf>
- [6] Albert Solá, Tostado y molido del café, Documento consultado en el 8 de enero del 2014 en línea disponible en: [http://www.forumdelcafe.com/pdf/F\\_07-Tostado\\_y\\_Molido.pdf](http://www.forumdelcafe.com/pdf/F_07-Tostado_y_Molido.pdf)
- [7] Documento consultado el 8 de enero del 2014 Disponible en línea en:  
<http://iaci.unq.edu.ar/materias/vision/archivos/apuntes/Aspectos>.
- [8] Luis Hernando Melo Wilches, Milton Antonio Camacho Chávez, Interpretación visual de imágenes de sensores remotos y su aplicación en levantamientos de cobertura y uso de la tierra, Primera edición 2005, Documento consultado en el 8 de enero del 2014.
- [9] Universidad nacional de Quilmes, Aspectos de un sistema de visión artificial, Octubre 2005. Documento consultado el 8 de enero del 2014 en línea disponible en:  
<http://iaci.unq.edu.ar/materias/vision/archivos/apuntes/Aspectos%20de%20un%20Proyecto%20de%20Visi%C3%B3n%20Artificial.pdf>

- [10] Albert Solá, Un paseo por la historia del tueste de café, Documento consultado en el 8 de enero del 2014 en línea disponible en:  
[http://www.forumdelcafe.com/pdf/F-47\\_Tueste.pdf](http://www.forumdelcafe.com/pdf/F-47_Tueste.pdf)
- [11] Productos SANDVIK, Características del acero inoxidable, Documento consultado en el 15 de enero del 2014 en línea disponible en:  
[http://www.sandvik.coromant.com/es-es/knowledge/materials/workpiece\\_materials/iso\\_m\\_stainless\\_steel/pages/default.aspx#2](http://www.sandvik.coromant.com/es-es/knowledge/materials/workpiece_materials/iso_m_stainless_steel/pages/default.aspx#2)
- [12] Artículos SUMITEC, Acero inoxidable, Documento consultado en el 15 de enero del 2014 en línea disponible en:  
<http://www.sumiteccr.com/Aplicaciones/Articulos/pdfs/AISI%20304.pdf>
- [13] Productos CEDINOX, Tipos de acero inoxidable, Documento consultado en el 15 de enero del 2014 en línea disponible en:  
<http://www.cedinox.es/espanol/tipos-de-acero.html>
- [14] Irma Milena Mayorga, Aspectos de calidad del café para la industria torrefactora nacional, Documento consultado en el 15 de enero del 2014 en línea disponible en:  
[http://www.iue.edu.co/portal/images/negocios\\_internacionales/cafe/LACALIDADENLAINDUSTRIADELCAFE.pdf](http://www.iue.edu.co/portal/images/negocios_internacionales/cafe/LACALIDADENLAINDUSTRIADELCAFE.pdf)
- [15] Documento consultado el 18 de enero del 2014 Disponible en línea en:  
<http://cnzjleili.en.made-in-china.com/product>.
- [16] Manz, firmware, Documento consultado en el 18 de enero del 2014 en línea disponible en: <http://www.emezeta.com/informes/firmware.pdf>
- [17] Anónimo, Comunicación USB con el PIC18f4550, Documento consultado en el 18 de enero del 2014 en línea disponible en:  
<http://www.aquihayapuntes.com/indice-practicas-pic-en-c/comunicacion-usb-pic18f4550-utilizando-la-clase-cdc.html>
- [18] Agustín Froufe, JavaServer Pages Manual de Usuario y tutorial, ALFAOMEGA GRUPO EDITORE, S.A. de C.V. 2002, documento consultado el 22 de enero de 2014.
- [19] José Mompín Poblet, Inteligencia Artificial conceptos técnicos y aplicaciones, MARCOMBO S.A 1987, Documento consultado el 22 de enero del 2014.



- [20] Anónimo, Característica de JAVA como lenguaje de programación, Documento consultado en el 30 de enero del 2014 en línea disponible en: <http://www.infor.uva.es/~jmrr/tgp/java/JAVA.html>
- [21] Gerónimo Isidro, JPicUsb: Clase JAVA para comunicación USB con PICs usando API de microchip, Documento consultado en el 30 de enero del 2014 en línea disponible en: [http://www.microvirtual.org/images/Congreso/Ponencias\\_CVM1/Comunicacion/es/com\\_2.PDF](http://www.microvirtual.org/images/Congreso/Ponencias_CVM1/Comunicacion/es/com_2.PDF)
- [22] SQLITE, SQLite, Documento consultado en el 30 de enero del 2014 en línea disponible en: <http://www.sqlite.org/>
- [23] SLF4J, *Slf4j*, Documento consultado en el 30 de enero del 2014 en línea disponible en: <http://www.slf4j.org/>
- [24] XEIAM, *Xchart*, Documento consultado en el 30 de enero del 2014 en línea disponible en: <http://xeiam.com/xchart.jsp>
- [25] SARXOS, *Webcam-capture*, Documento consultado en el 30 de enero del 2014 en línea disponible en: <http://webcam-capture.sarxos.pl/>
- [26] BRIDJ, *Bridj*, Documento consultado en el 30 de enero del 2014 en línea disponible en: <https://code.google.com/p/bridj/>
- [27] MICROCHIP, MPusbAPI, Documento consultado en el 30 de enero del 2014 en línea disponible en: <http://www.microchip.com/forums/m246926.aspx>
- [28] Anónimo, Los colores del café, Documento consultado en el 30 de enero del 2014 en línea disponible en: [http://w4.siap.gob.mx/sispro/IndModelos/SP\\_AG/Cafe/Industria.pdf](http://w4.siap.gob.mx/sispro/IndModelos/SP_AG/Cafe/Industria.pdf)
- [29] José Hipólito Pascua, José Luis Fernández, Enrique Silvestre, Mario Pozo, José Ignacio Seguí, Conexión de una LCD con un microcontrolador, Documento consultado en el 30 de enero del 2014 en línea disponible en: [http://server-die.alc.upv.es/asignaturas/lse/2002-03/Pantallas\\_LCD/LCD.pdf](http://server-die.alc.upv.es/asignaturas/lse/2002-03/Pantallas_LCD/LCD.pdf)