

**DESARROLLO DE UN SISTEMA AUTOMÁTICO PARA LIMPIEZA Y  
TRATAMIENTO DE FRUTAS, APLICADO AL CULTIVO DE LIMONES**

**Daniel Gómez Rodríguez  
Yeison Andrés Gaona Reina**

**Universidad de Cundinamarca  
Facultad de ingeniería  
Fusagasugá, Colombia  
2019**

**DESARROLLO DE UN SISTEMA AUTOMÁTICO PARA LIMPIEZA Y  
TRATAMIENTO DE FRUTAS, APLICADO AL CULTIVO DE LIMONES**

**Daniel Gómez Rodríguez  
Yeison Andrés Gaona Reina**

**Tesis presentada como requisito para optar por el título de:  
Ingeniero Electrónico**

**Director:  
ING. Edwin Palacios Yepes**

**Codirector:  
ING. Arley Fernandez**

**Universidad de Cundinamarca  
Facultad de ingeniería  
Fusagasugá, Colombia  
2019**

## **Dedicatoria**

Dedico este proyecto a la memoria de mi padre Nestor Gaona López, quien fue la persona que me motivó a iniciar y seguir con mis estudios siempre, a mi madre Rosalba Reina Gutiérrez por su apoyo y sacrificio incondicional durante mi carrera, a mi familia, amigos y a todas las personas que de alguna u otra forma contribuyeron a estar más cerca de mi meta profesional.

**Y.A.G.R**

A mis padres Rosalba Rodríguez y Luis J. Gómez por ser mi principal apoyo incondicional para la culminación de mi carrera profesional, a mi hermana por motivarme a seguir adelante y en general a mis familiares que de una u otra forma estuvieron pendientes de todo este proceso. A mis amigos, compañeros y profesores por todo lo aprendido; no solo en la formación académica sino en cuanto a los valores que son indispensables para la vida.

**D. G. R**

## **Agradecimientos**

Agradecemos a Dios por permitirnos llegar a este punto de nuestras carreras profesionales, y darnos fortaleza para seguir a pesar de los tropiezos.

Agradecemos a nuestras familias que con su apoyo y acompañamiento supieron guiarnos y aconsejarnos para seguir en nuestro camino y a la culminación de este proyecto.

Sinceros agradecimientos a la Universidad de Cundinamarca, especialmente a la facultad de Ingeniería, por brindarnos la oportunidad de ser profesionales y con ello darnos herramientas de conocimiento para contribuir a la sociedad.

Agradecemos igualmente a nuestros amigos, profesores y demás personas del campus académico por su apoyo y por compartir con nosotros los logros en nuestra carrera profesional.



## TABLA DE CONTENIDO

<u>CAPÍTULO</u>	<u>PÁGINA</u>
<b>1. GENERALIDADES Y OBJETIVOS.....</b>	<b>18</b>
1.1. INTRODUCCIÓN .....	18
1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA .....	20
1.3. JUSTIFICACIÓN.....	21
1.4. OBJETIVOS .....	22
1.4.1. Objetivo general.....	22
1.4.2. Objetivos específicos.....	22
1.5. ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ARTE Y LA TÉCNICA.....	23
1.5.1. Estado del arte .....	23
1.5.2. Estado de la técnica.....	25
<b>2. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>29</b>
2.1. CÍTRICOS .....	29
2.2. SITUACIÓN NACIONAL .....	29
2.2.1. Producción .....	29
2.2.2. Exportaciones nacionales de la lima Tahití.....	30
2.2.3. Confección.....	31
2.3. LAVADO POR ASPERSIÓN.....	33
2.4. LAVADORES DE TAMBOR Y ASPERSIÓN. ....	33
2.5. LAVADORES DE CINTA Y ASPERSIÓN. ....	33
2.6. CONTROLADOR APLICADO AL SISTEMA.....	34
2.6.1. Controlador PID.....	34
2.6.2. FET de potencia .....	36
2.6.3. Marco referencial.....	37
2.6.4. Lima tahití. Especificaciones .....	38
2.6.4.1. Objeto.....	38
2.6.4.2. Definiciones, clasificación y calibre.....	38
2.6.5. Requisitos y tolerancias.....	41
2.6.5.1. Requisitos generales .....	41

<b>3.</b>	<b>DISEÑO METODOLÓGICO.....</b>	<b>43</b>
3.1.	AUTOMATIZACIÓN DEL SISTEMA.....	43
3.2.	REQUERIMIENTOS PRODUCTIVOS.....	45
<b>4.</b>	<b>DISEÑO.....</b>	<b>46</b>
4.1.	RODILLOS .....	46
4.1.2.	Selección del tipo de rodillo.....	47
4.1.3.	Rodillos de menor costo.....	48
4.1.4.	Adaptación rodillo-eje.....	49
4.1.5.	Medidas ejes de rotación.....	49
4.1.6.	Cantidad de rodillos.....	50
4.1.7.	Separación entre rodillos.....	50
4.2.	ESTRUCTURAS DE SOPORTE.....	51
4.2.1.	Estructura principal.....	51
4.2.3.	Estructura base .....	52
4.3.	RODAMIENTOS .....	53
4.3.1.	Mecanismo de rotación.....	55
4.3.2.	Piñones.....	55
4.3.3.	Cadena de transmisión de fuerza.....	56
4.4.	MOTOR .....	57
4.4.1.	Refuerzo de potencia.....	59
4.5.	SISTEMA DE ASPERSIÓN .....	60
4.5.1.	Componentes del sistema de aspersión.....	60
4.5.2.	Selección de la motobomba.....	61
4.5.3.	Selección de la electroválvula .....	61
4.5.4.	Boquillas de aspersión .....	62
4.6.	SISTEMAS ELECTRÓNICOS Y DE CONTROL .....	64
4.6.1.	Control del sistema de aspersión .....	65
4.6.1.1	Selección del sensor de movimiento .....	65
4.6.2.	Funcionamiento sensor laser.....	65
4.6.3.	LDR como sensor.....	65
4.6.4.	Interfaz digital.....	66
4.6.5.	Algoritmo digital para control del sistema de aspersión.....	67
4.6.6.	Hardware de control.....	68

4.6.6.1.	Microcontrolador .....	68
4.6.6.2.	Aislamiento de circuitos.....	68
4.6.6.3.	Optoaisladores como medidas de seguridad .....	69
4.6.6.4.	Circuito para control de motobomba.....	70
4.6.6.5.	Circuito para control electroválvula .....	71
4.6.6.6.	Circuitos para control sistema de aspersión.....	71
4.6.7.	Control de velocidad de los rodillos.....	73
4.6.7.1.	Sensor de velocidad.....	74
4.6.7.2.	Sensor Encoder de efecto Hall .....	75
4.6.7.3.	Medición de velocidad. ....	76
4.6.7.4.	Conversión a RPM.....	76
4.6.7.5.	Mejora de resolución.....	77
4.6.7.6.	Velocidad transmitida motor rodillos. ....	78
4.6.7.7.	Respuesta del sistema.....	78
4.6.7.8.	Uso del software de Matlab para identificación de la función de transferencia del sistema .....	79
4.6.7.9.	Diseño de control de velocidad.....	83
4.6.7.10	Uso del software de matlab para el análisis de la grafica.....	83
4.6.7.11.	<b>IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROL DE VELOCIDAD .....</b>	<b>84</b>
4.6.7.12.	Esquema general para el control de velocidad del motor .....	84
4.6.8.	Hardware de control de velocidad .....	85
4.6.8.1.	Mosfet de alta potencia.....	85
4.6.8.2.	Diagrama de conexión, circuito de control de velocidad.....	86
4.7.	<b>INTERACCIÓN MÁQUINA HOMBRE.....</b>	<b>87</b>
4.8.	<b>FUENTE DE VOLTAJE PARA EL SISTEMA. ....</b>	<b>90</b>
<b>5.</b>	<b>CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO.....</b>	<b>92</b>
5.1.	<b>CONSTRUCCIÓN .....</b>	<b>92</b>
5.1.1	Estructura base .....	92
5.1.2.	Base de motor y sistema de riego.....	92
5.1.3.	Láminas laterales (dos).....	92
5.1.4.	Lámina frontal.....	93
5.1.5.	Lámina (tolva entrada) .....	93



5.1.6.	Lámina (tolva salida) .....	93
5.2.	ACCESORIOS MECÁNICOS .....	93
5.2.1	Piñón de 2” y 25 dientes .....	93
5.2.2.	Piñón de 1.5” y 18 dientes.....	94
5.2.3	Piñón de 3” y 34 dientes .....	94
5.2.4.	Cadena de transmisión.....	95
5.2.5.	Rodamientos o balineras.....	96
5.2.6.	Acoples para los rodamientos .....	96
5.3.	EJES.....	96
5.4	TAPÓN.....	96
5.4.	RODILLOS .....	97
5.6.	SISTEMA DE ASPERSIÓN .....	97
5.6.1	Motobomba.....	97
5.6.2.	Tubo PVC.....	98
5.6.3	Manguera .....	98
5.6.4	Adaptador .....	99
5.6.5	Válvula .....	100
5.7.	ENSAMBLADO FINAL DEL SISTEMA.....	100
<b>6.</b>	<b>PRUEBAS Y RESULTADOS .....</b>	<b>102</b>
6.1.	PLAN DE PRUEBAS .....	102
6.1.1.	Funcionamiento del sistema.....	102
6.1.2	Velocidad.....	102
6.1.3	Tiempos óptimos .....	102
6.1.4.	Comparaciones de rendimiento.....	102
6.2.	PRUEBAS Y RESULTADOS .....	103
6.3.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	116
<b>7.</b>	<b>COSTOS.....</b>	<b>120</b>
7.1.	COSTOS DIRECTOS.....	120
<b>8.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>125</b>
8.1	CONCLUSIONES.....	125
8.2.	RECOMENDACIONES.....	126

8.3. RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS..... 126  
**BIBLIOGRAFÍA**..... 129

## LISTA DE TABLAS

<b><u>TABLA</u></b>		<b><u>PÁGINA</u></b>
1	Estado del arte .....	23
2.	Estado de la técnica.....	25
3	calibres de la lima Tahití producida en Colombia .....	41
4.	Características del motor .....	58
5.	Comparación motores DC .....	59
6.	Características sensores de velocidad.....	74
7.	Comparación sensores de velocidad.....	75
8.	Porcentaje de similitud.....	81
9.	Análisis de disminución de costos. Brillado.....	118
10.	Análisis de disminución de costos. Proceso completo.....	119
11.	Costos de materiales y accesorios mecánicos .....	120
12.	Costo de materiales y accesorios eléctricos y electrónicos .....	121
13.	Costos de estructura base .....	122
14.	Costo de accesorios de sistema de aspersion .....	123
15.	Valor total de costos directos .....	123
16.	Costos de operación por tonelada .....	124

## LISTA DE FIGURAS

<b><u>FIGURA</u></b>	<b><u>PÁGINA</u></b>
1. Diagrama de patente de invención de cluster 1.....	26
2. Patente de invención del cluster 2.....	27
3. Patente de invención del cluster 4.....	28
4. Comparativa de la producción vs área cosechada de cítricos .....	30
5. Volcado en seco y en agua.....	32
6. Diagrama de bloques de control PID .....	34
7. FET de potencia .....	37
8. Uso de un FET de potencia para controlar un motor .....	37
9. Categoría extra .....	39
10. Categoría 1 .....	39
11. Categoría 2 .....	40
12. Brillado manual en la Hacienda la Aurora.....	44
13. Diagrama de las etapas del sistema.....	45
14. Rodillos industriales en nylon.....	47
15. Diseño 3D del rodillo usado.....	48
16. Diseño 3D de rodillos con eje.....	50
17. Medidas de separación entre rodillos.....	51
18. Diseño 3D estructura principal, láminas laterales.....	52
19. Diseño 3D estructura principal vista desde el frente.....	52
20. Diseño3D Estructura base.....	53

21.	Chumaceras tipo brida.....	54
22.	Diseño 3D, ubicación de rodamiento o balineras.....	54
23.	Diseño 3D ubicación de piñones.....	56
24.	Diseño 3D piñones con cadena de tracción.....	57
25.	Relación de piñones de menor a mayor .....	59
26.	Diseño 3D de los componentes del sistema de aspersión .....	61
27.	Geometría aspersión.....	62
28.	Angulo y cobertura de pulverización de la boquilla .....	63
29.	Diseño 3D, aspersores .....	64
30.	(a) Celda fotoconductora; (b) características terminales de una celda fotoconductora .....	65
31.	(a) Sensor láser del sistema; (b) función del láser con el limón.....	66
32.	Diagrama conexión del láser con Arduino uno.....	67
33.	Algoritmo para el control del sistema de aspersión .....	67
34.	Conexión optoacoplador. ....	69
35.	Tipos de optoaisladores.....	70
36.	Circuito para el control de motobomba.....	70
37.	Circuito para control de electroválvula .....	71
38.	Circuito para control del sistema de aspersión.....	72
39.	Algoritmo del sistema de aspersión .....	73
40.	Controlador PID (Proporcional Integral Derivativo) .....	74
41.	Lectura de pulsos en el eje del motor.....	75
42.	Tipos de interrupciones para la toma de datos .....	77
43.	Respuesta del sistema.....	79
44.	Respuesta transitoria del sistema .....	80

<b>45.</b>	Grafica salida vs entrada del sistema. ....	80
<b>46.</b>	Proceso de cálculo de la TF. ....	81
<b>47.</b>	Gráfica comparación de similitud de las TF calculadas.....	82
<b>48.</b>	Función TF más acertada .....	82
<b>49.</b>	Análisis TF .....	83
<b>50.</b>	Datos para el controlador .....	84
<b>51.</b>	Control de velocidad .....	84
<b>52.</b>	Algoritmo del sistema mecánico .....	85
<b>53.</b>	Configuración, símbolo y parámetros de MOSFET .....	86
<b>54.</b>	Diagrama de conexión del sistema.....	87
<b>55.</b>	Conexión pantalla LCD implementada en el sistema .....	88
<b>56.</b>	Conexión parlante para timbre .....	89
<b>57.</b>	Algoritmo impresión datos en pantalla LCD y timbre.....	90
<b>58.</b>	Fuentes de voltaje en paralelo .....	91
<b>59.</b>	Láminas en acero, estructura del sistema.....	93
<b>60.</b>	Piñón de 2 pulgadas implementado en los ejes de los rodillos .....	94
<b>61.</b>	Piñón de 1,5 pulgadas implementado en el eje del motor.....	94
<b>62.</b>	Piñón de 3 pulgadas implementado en el eje del primer rodillo .....	95
<b>63.</b>	Cadena de transmisión implementado entre piñones de cada eje. ....	95
<b>64.</b>	Rodamiento o balinera usado a los extremos de los ejes .....	96
<b>65.</b>	Varilla roscada, usada como eje en cada uno de los rodillos de felpa .....	96
<b>66.</b>	Tapón usado en los extremos de cada rodillo .....	97
<b>67.</b>	Rodillo de felpa.....	97
<b>68.</b>	Motobomba .....	98

<b>69.</b>	Tubo PVC con sus respectivas boquillas de abanico .....	98
<b>70.</b>	(a) Manguera conectada desde el recipiente del líquido hasta la entrada de la motobomba; (b) manguera conectada desde la salida de la motobomba, hasta la entrada de la válvula. ....	99
<b>71.</b>	Adaptador ubicado en la entrada de la válvula .....	99
<b>72.</b>	Válvula implementada en el sistema.....	100
<b>73.</b>	Ensamble final del sistema.....	101
<b>74.</b>	Funcionamiento del sistema a máxima capacidad .....	103
<b>75.</b>	De izquierda a derecha: limón sin brillar; limón brillado .....	104
<b>76.</b>	Funcionamiento etapa de encerado del limón.....	105
<b>77.</b>	Se activa el sistema de aspersion. ....	106
<b>78.</b>	Gráfica control de velocidad .....	107
<b>79.</b>	Gráfica velocidad eficiente .....	108
<b>80.</b>	Comparación limón.....	109
<b>81.</b>	Gráfica tiempo mínimo de brillado.....	110
<b>82.</b>	Gráfica tiempo mínimo de encerado.....	111
<b>83.</b>	Gráfica; cantidad de limón por hora, proceso completo .....	112
<b>84.</b>	Gráfica, comparación; cantidad de limón por hora (solo brillado).....	113
<b>85.</b>	Gráfica comparación cantidad de limón por hora. Brillado y encerado .....	114
<b>86.</b>	Gráfica costo por cantidad de limón .....	115
<b>87.</b>	Gráfica comparación costo por cantidad de limón.....	116
<b>88.</b>	Diodo de rueda libre.....	126
<b>89.</b>	Redes Snubber.....	127
<b>90.</b>	Cambio de valor de resistencias.....	128
<b>91.</b>	Diseño e implementación de lámina acrílica .....	128

## RESUMEN

El desarrollo de un sistema automático para limpieza y tratamiento de frutas, aplicado al cultivo de limones; nace como un proyecto a partir de una necesidad, implementando soluciones inteligentes del campo de la ingeniería electrónica. El sistema se optimiza, se reestructura y se implementa para el lavado, brillo y encerado del limón Tahití en la hacienda la Aurora del municipio de Alvarado-Tolima. Se realiza un análisis del proceso manual implementado por los obreros de la hacienda, teniendo en cuenta variables como el tiempo, cantidad de fruta procesada, costos y número de personas que desarrollan esta labor. De esta forma y basados en esta información se obtienen los requerimientos mínimos de producción con los cuales debe cumplir el sistema.

Generalmente en sistemas de procesamientos de cítricos se usan rodillos hechos de fibra de nylon, se busca una alternativa de bajo costo y de similares características para reemplazar este tipo de rodillos debido a su alto costo en el mercado, seleccionando el más apropiado, un tipo de rodillo elaborado en PVC y cubierto en felpa suave que garantiza el debido proceso sin maltratar la frutas. Basado en los requerimientos productivos y el tamaño de la fruta; se diseña la estructura base la cual soporta el mecanismo de rotación de los rodillos sobre los cuales se limpiarán los limones. Teniendo en cuenta el diámetro de los rodillos, se escoge el sistema de piñones y cadenas los cuales van unidos al eje de cada uno de los rodillos; estos están impulsados por un motor DC y su velocidad es estabilizada mediante un control digital a través de un microcontrolador Arduino.

Para el lavado y encerado del limón se utiliza una motobomba DC con capacidad de 5 litros por minuto la cual estará recirculando agua mezclada con cera, el proceso de aspersión se activará cuando entre la fruta; gracias a un sensor que está ubicado en la entrada del sistema y este a su vez activa la electroválvula para abrir el paso del líquido, la salida se efectúa por tres boquillas de abanico instaladas en un tubo de PVC que está ubicado a una altura prudente sobre los dos últimos rodillos para lograr recubrir los limones de cera.

El control electrónico del sistema mecánico y del sistema de aspersión se hace teniendo en cuenta la capacidad y funcionamiento deseado de la máquina. Se crea un algoritmo para control digital de velocidad y el control de activación de los componentes del sistema de aspersión basados en pruebas realizadas al sistema en funcionamiento y análisis de resultados con el fin de hallar el rendimiento óptimo del sistema. Este software es implementado y ejecutado por una tarjeta de microcontrolador a la cual se conectan los componentes eléctricos, mediante circuitos con aislamiento de seguridad y amplificación de las señales de control.



El sistema es finalmente implementado en la Hacienda la Aurora, del municipio de Alvarado Tolima, para analizar su funcionamiento y determinar por medio de pruebas el punto en el que el sistema logra su mejor rendimiento. Se hace una capacitación breve al dueño de los cultivos para darle a conocer las pautas básicas de funcionamiento, y las instrucciones que se deben tener en cuenta para correcto uso de la máquina, así como la forma correcta de leer los datos que el sistema electrónico muestra en la pantalla, con el fin de lograr los mejores resultados a la hora de procesar el limón.

## CAPÍTULO I

### 1. GENERALIDADES Y OBJETIVOS

#### 1.1. INTRODUCCIÓN

La especie y la variedad es una de las principales decisiones que debe tomar un productor que ha decidido cultivar cítricos, ya que es una de las variables que está firmemente vinculada con las actividades poscosecha requeridas, el tipo de mercado, el rendimiento y el beneficio de la inversión. La sensación de esta determinación se percibe a largo plazo y se establece durante todo el periodo de vida del cultivo, observando que los cultivos de cítricos más productivos son los que se presentan con especies y variedades que tienen mayor aprobación y valor en el mercado, y que estén bien adaptado al nicho ecológico donde se van a cultivar, lo que garantiza altas producciones de excelente calidad y costos bajos. (Diana Mateus, 2010)

La lima ácida Tahití, es originaria del Sureste Asiático, Persia (Irán). Se planta en Colombia en 21 departamentos, donde se presentan estados ambientales propicios para el cultivo de frutos de calidad: temperaturas entre 23 y 34°C, altitud entre 0 y 1.600 msnm, precipitación entre 900 y 1.200 mm y luminosidad de 1.900 h año<sup>-1</sup> (Dorado, 2011). En Colombia se cultivan principalmente dos limas ácidas: el limón Pajarito o Mexicano (*Citrus aurantifolia*) y la lima ácida Tahití (*C. latifolia*). Los colombianos comercializan frutos originarios del departamento del Tolima por el alto contenido de jugo, como el atributo más apetecido, mientras que para el mercado del exterior el mayor interés es la frescura y la apariencia del fruto, color verde intenso uniforme en toda la corteza, libre de áreas blancuzcas, sin golpes de sombra, porque su principal uso es en la preparación de cócteles (Bassan et al., 2016). Durante 2007 se exportaron 3.596 t y en 2014 aproximadamente 4.529 t, alcanzando una cifra significativa en el mercado de frutas de exportación de 27.300 t durante los últimos 13 años, convirtiéndose en una oportunidad de mercado para los agricultores (Hernández et al., 2014). (PEDRO ANDRÉS ARÉVALO, 2016)

El manejo de la poscosecha de frutas tiene como fin preservar las propiedades de los productos desde que son recogidos hasta que llegan al cliente o consumidor, respetando la calidad organoléptica y microbiológica, mejorando y adecuando su apariencia externa, y aplicando siempre los estatutos y recomendaciones actuales en cada país. Las BPN o buenas prácticas de manufactura, establece una importante y valiosa herramienta para la agroindustria, estas evitan y minimizan los riesgos de contaminación sanitaria de una fruta fresca. Al centrarse el sistema en los elementos o factores claves que intervienen en la sanidad y calidad en toda la cadena alimenticia, el productor(a), el exportador(a) o procesador(a) y el consumidor(a) final pueden estar seguros de que se alcanza y se mantienen los niveles deseados de calidad sanitaria. (intellectum, 2000).

La lima Tahití debe presentarse al consumidor como “frutos enteros con forma característica de la variedad, con presencia de cáliz, sanos, sin humedad externa anormal producida por mal manejo en las etapas de poscosecha, evitando cualquier olor o sabor extraños (provenientes de otros productos, empaque o recipientes, con los cuales hayan estado en contacto), con apariencia fresca y consistencia firme, libres de materiales extraños (tierra, polvo de agroquímicos y cuerpos extraños) visibles en el producto o su empaque. El espacio de cada unidad de empaque debe ser semejante y estar seleccionado solamente por frutos de la misma especie o variedad, categoría, color y calibre”. Esto quiere decir que después de la poscosecha, los frutos deben seguir una serie de procedimientos antes de su puesta al mercado.

En la mayoría de los casos, el lavado se realiza con máquinas lavadoras, ya sea por cortinas de espuma o por boquillas. Se deben usar detergentes alcalinos o neutros, como dodecil benceno sulfonato sódico en concentraciones del orden del 10%, y normalmente se añade un fungicida OPP (ortofenilfenol) con un tiempo de contacto de 30-40 segundos. El material de los cepillos del sistema suelen ser en nylon y giran de acuerdo al diseño o las R.P.M que sean necesarios; el tiempo de fricción de la fruta sobre los rodillos es de 20-30 segundos. En algunas variedades de piel fina, conviene reducir el número de cepillos.

En el sistema de aspersión, las boquillas que dispersan el agua deben trabajar con una presión de aproximadamente 200 Kpa, y el escurrido se debe de realizar en aros de látex (donuts) en los que la velocidad de rotación es crítica y no debe exceder las r.p.m recomendadas o diseñadas. (Lasallista, 2012)

## 1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Los procesos de automatización se han hecho mucho más comunes en las diferentes industrias a partir de la gran revolución industrial, dando paso a procesos más eficientes y reduciendo así el costo de producción de cualquier producto en la actualidad. A lo largo de las últimas décadas, la mecanización de los procesos productivos se ha enfocado en reemplazar con máquinas las tareas realizadas por las personas. “Los recursos disponibles de mano de obra para la industria de vegetales y frutas frescas se están volviendo cada vez más escasos. Solo en Estados Unidos la fuerza de trabajo agrícola ha caído desde 3,4 millones a un millón durante el último siglo y un 20% entre 2002 y 2014, y los costos han aumentado 51%”, dice Al respecto, Ed Treacy, vicepresidente de Eficiencias de la Cadena de Suministro de Produce Marketing Association (PMA).

La producción de cítricos (naranja, mandarina, lima, limón...etc), en Colombia es en un alto nivel gracias a los diferentes climas tropicales propicios para el cultivo de estos, sin embargo, estas ventajas que presentan muchas zonas del país con respecto a otros países pioneros en producción de cítricos, se evidencian casos que restringen la competitividad del sector, tales como el bajo desarrollo tecnológico en procesos de producción, entre otros. Uno de los problemas que más obstaculiza al país para incursionar en mercados externos, es que no se cuenta con la calidad adecuada y además se deben solucionar problemas de empaque y presentación. Los altos costos de producción y los bajos rendimientos de la mano de obra en los procesos de adecuación de la fruta, son otros factores que limitan la óptima producción de cítricos en la mayoría de los cultivos en las diferentes regiones de Colombia.

Teniendo en cuenta lo anterior, y viendo las facultades que se obtienen en el estudio y desarrollo de la ingeniería a nivel de la Universidad de Cundinamarca, se formula la siguiente pregunta:

¿Cómo optimizar tecnológicamente el proceso de producción de los cítricos?

### 1.3. JUSTIFICACIÓN

La producción de cítricos en Colombia crece cada año, como lo muestra un reporte de ministerio de agricultura y desarrollo rural, donde se afirma que Colombia pasó de producir 845.367 toneladas en 67.103 hectáreas de cultivo en 2009, a 1.056.342 toneladas en 72.42 hectáreas de cultivos en 2012. Así mismo según un informe Elaboración Unidad Técnica de ASOHOFRUCOL, con base en Quintero Hermanos DANE –DIAN, la cantidad toneladas exportadas por Colombia para los años 2011 a 2013 ha disminuido notoriamente con respecto a los años inmediatamente anteriores, esta disminución se justifica en la gran ola invernal que azotó el país en esos años. Esto y los altos índices de calidad requeridos para la exportación han truncado en gran medida que los productores de cítricos en Colombia puedan llevar sus productos a otros países.

Es de gran importancia saber que los cítricos, como mandarinas, naranjas, lima Tahití y limón, que son los de mayor producción en Colombia, luego de su debida cosecha, la fruta adquiere un tono opaco, por factores de suciedad en el ambiente y por la misma naturaleza de la fruta. Para lograr una buena presentación de este producto en el mercado es necesario limpiar la fruta en su superficie total, con un material suficientemente suave pero eficiente para este proceso. Luego de esto la fruta adquiere un brillo natural por los componentes de su cáscara, para lograr un brillo de mejor calidad se puede ayudar con un tipo de sustancia soluble en el agua la cual puede ser aplicada a la fruta por medio de un proceso de aspersion.

El hecho de que los grandes productores de cítricos en Colombia no tengan las herramientas suficientes, y procesos automatizados para la alta producción de esta fruta, hace que sea mucho más alto del costo por tonelada producida. Actualmente la gran mayoría de los procesos de producción de cítricos se llevan a cabo por medio de procesos artesanales, por medio de personas, obreros que con sus propias manos realizan las tareas de limpieza y adecuación de la fruta para lograr una mejor presentación del producto. De esta forma se hace mucho más extenso el tiempo en el que se puede producir una tonelada de limones, por ejemplo.

Para que un agricultor del sector cítrícola de Colombia pueda obtener mejores ganancias en su proceso de producción, se debe tener en cuenta el tiempo que se gasta en todo este proceso, la mano de obra necesaria, los costos que ello implica, y la calidad requerida para este producto en el mercado, no solo nacional sino internacional, si se quiere exportar, conlleva grandes inversiones, que difícilmente pueden ser recuperadas si no se mejora en gran medida este proceso completamente.

Teniendo en cuenta lo anterior con este proyecto se busca diseñar e implementar un sistema automatizado que pueda ser de gran utilidad como herramienta para hacer eficiente en gran medida el proceso de producción de cítricos en los diferentes cultivos de cítricos en la región.

## **1.4. OBJETIVOS**

### **1.4.1. Objetivo general**

Desarrollar una máquina capaz de limpiar y adecuar limón Tahití por medio de rodillos y un sistema de lavado automático.

### **1.4.2. Objetivos específicos**

- Reducir los altos costos de producción de cítricos mediante un sistema que reemplace la mano de obra.
- Reducir el tiempo de lavado y adecuación de las frutas para su debida comercialización.
- Emplear conocimientos adquiridos durante la carrera en el diseño e implementación de los módulos de cada etapa del proceso.
- Verificar la reducción de costos y tiempo empleados en la producción de cítricos.

## 1.5. ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ARTE Y LA TÉCNICA

### 1.5.1. Estado del arte

*Tabla 1 Estado del arte*

*Fuente: autores*

AÑO	LUGAR	AUTOR(ES)	CONCEPTO CLAVE	NOMBRE DEL ARTÍCULO
Diciembre. 2006	Montevideo, Uruguay	Gabriela Garmendia, Silvana Vero	Se describen los métodos para desinfección de frutas y hortalizas que se basan en procesos físicos y/o químicos entre los que se pueden mencionar la remoción mecánica y tratamientos térmicos.	MÉTODOS PARA DESINFECCIÓN DE FRUTAS Y HORTALIZAS
febrero, 2016	España	David Galí Mascarilla, Martí Aliaguilla, Sonia Sanchís Pérez, Isabel Forns Agudo, Anna Serra Clusellas, F.Xavier Simón Font, Ángel Teno, Julia García Montaña	El estudio que se presenta, se lleva a cabo en las aguas que son utilizadas en el lavado de espinacas y lechugas. Se utiliza la tecnología de electro-oxidación a través de la extracción de materia oxidable, limpieza hasta alcanzar una buena calidad de agua.	Tratamiento y desinfección del agua de lavado de vegetales mediante electro-oxidación. Caso de estudio: agua de lavado de espinacas y lechuga
24 de febrero de 2010	Ciudad de La Habana, Cuba.	Mayra Bataller Venta, Sandra santa Cruz, Mario A. García	Se evalúan el rendimiento y los requisitos de la utilización del ozono con el objetivo general de evaluarla como una alternativa sustentable en el tratamiento poscosecha de productos frutícolas y hortícolas.	El ozono: una alternativa sustentable en el tratamiento poscosecha de frutas y hortalizas
febrero de 2016	Guatemala	Francisco Ernesto Alvarado Maldonado	Se presenta una herramienta para desarrollar una banda transportadora para piedrín. Se describen las generalidades y los equipos que componen una banda transportadora de rodillos	Propuesta de diseño y cálculo para una banda transportadora de rodillos para piedrín

En los artículos investigados, se da a conocer estudios realizados por diferentes autores, en los cuales se utilizan procesos físicos y/o químicos para el lavado y desinfección de frutas y hortalizas, como también la recuperación y reutilización del agua que se utiliza para estas actividades.

Algunas de las investigaciones y proyectos desarrollados en la *Tabla 1*. Se contemplan en España, Cuba y Uruguay sobre la temática de lavado adecuado de frutas. En el primer clúster presenta el estudio realizado por la facultad de química de la UDELAR (universidad de la república, Uruguay) sobre la contaminación superficial de frutas y hortalizas, en las que presenta organismos que están asociados a partículas de tierra u otro tipo de suciedad adherida a la fruta, en cuyo caso la remoción es relativamente sencilla. Sin embargo existe flora asociada cuya remoción es difícil ya que se encuentran formando biofilms superficiales o están ocupando lugares poco accesibles como aberturas naturales o heridas. (VERO, 2006)

El clúster dos, el estudio que se presenta se lleva a cabo en las aguas que son utilizadas en el lavado y la desinfección de espinacas y lechugas. Se utiliza la tecnología de electro-oxidación a través de la extracción de materia oxidable y de la disposición de limpieza hasta alcanzar una calidad de agua que permita su debida restauración y reutilización en el mismo sistema de lavado. Con un bajo consumo de energía que permita reducir el aporte tanto de agua como de biocidas. (GALÍ MASCARILLA. David, 2016)

El clúster tres, se evalúan el rendimiento y los requisitos de la utilización del ozono con el objetivo general de evaluarla como una alternativa sustentable en el tratamiento poscosecha de productos frutícolas y hortícolas. Recopilando información en bases de datos, sitios web y revistas especializadas en el tema, almacenamiento y procesamiento de frutas y hortalizas. La aplicación del ozono a concentraciones relativamente bajas y tiempos de contacto cortos, permite la inactivación de microorganismos, garantiza la calidad del producto agrícola e incrementa su resistencia al deterioro. (BATALLER VENTA. Mayra, 2010)

El clúster cuatro, Se presenta una herramienta para desarrollar una banda transportadora para piedrín. Se describen las generalidades y los equipos que componen una banda transportadora de rodillos, los parámetros de diseño, tales como material a transportar, capacidad requerida, perfil de la trayectoria del transportador, ancho, velocidad de la banda; luego se consideran los parámetros calculados, o resultados, capacidad máxima de transporte, fuerzas, potencias y tensiones en la banda. Con base en estos cálculos se procede a la selección y diseño de los diferentes elementos de la banda transportadora. (MALDONADO ALVARADO, 2016)



## 1.5.2. estado de la técnica

Tabla 2. Estado de la técnica

	Patente 1	Patente 2	Patente 3	Patente 4
Año	07 de septiembre de 2014	28 de agosto de 2015	18 de febrero de 2017	28 de diciembre de 2011
Autor(es)	OH, HONG-SIK	GARCÍA PORTILLO, Manuel	ESCOLAR REINA, Alejandro	Benedetti, Angelo
Título patente	Aparato de lavado de fruta con sistema de recogida de polvo y proceso de lavado de fruta utilizando el mismo	Dispositivo para optimizar el lavado de frutas	Sistema de reutilización de agua para centro de lavado de frutas y hortalizas	Sistema para lavar frutas y hortalizas
Descripción	Un objetivo de la presente invención es un aparato de lavado de fruta que incluye un sistema de recogida de polvo, una unidad de accionamiento de cepillos de rodillo y un sistema de soplado, y un procedimiento de lavado de fruta utilizando el mismo.	La invención describe un nuevo dispositivo que proporciona un lavado y desinfección de la fruta que mejora los sistemas actuales, sobre todo en cuanto a consumo de agua por unidad de producto lavado, lo que redunda también en un importante ahorro en la fase de secado posterior, al conseguir tratar el producto con menor cantidad de agua.	Corresponde al campo técnico de los sistemas de reutilización de agua para un centro de lavado de frutas y hortalizas, que comprenden unos medios de tratamiento del agua utilizada en el lavado conectados a un tanque de recogida del agua de lavado, un depósito de recogida del agua tratada conectado a dichos medios de tratamiento y al centro de lavado y, unos medios de limpieza de los medios de tratamiento.	Se proporciona un sistema que lava de manera adecuada y eficaz frutas y hortalizas, de manera individual o en manojos. Dicho lavado tiene lugar, sin la ayuda de personal, por medio de un sistema automático que contempla tanto la pulverización de agua de lavado como un doble cepillado de las frutas y hortalizas, permitiéndose dicho cepillado gracias a la forma de las bandejas que alojan las frutas y hortalizas.

En los sistemas de limpieza de frutas se han desarrollado diversas patentes en sectores industriales, cada patente presenta una novedad inventiva específica aplicada en una de las etapas básicas de limpieza y tratamiento de frutas y/o hortalizas.

En el clúster 1 se presenta una patente de invención con el número de publicación de la concesión europea EP 1651064. Para lograr el objetivo de la presente invención, se dispone un aparato de lavado de fruta, para realizar las etapas de lavado de fruta mientras las frutas son transferidas mediante una unidad de accionamiento de cepillos de rodillo compuesta por un motor, una pluralidad de cepillos de rodillo, y medios de transmisión de fuerza dinámica para conectar el motor de accionamiento a la pluralidad de cepillos de rodillo, comprendiendo el aparato de lavado de 15 fruta unas cubiertas inferiores en forma de tolva situadas por debajo de la pluralidad de cepillos de rodillo, medios de soplado que comprenden un ventilador de soplado conectado a los extremos inferiores de las cubiertas inferiores para soplar aire hacia la pluralidad de cepillos de rodillo, unas cubiertas superiores situadas por encima de la pluralidad de cepillos de rodillo y cuyas partes superiores son estrechas y cuyas partes inferiores son anchas para ser simétricas respecto a las cubiertas inferiores, y medios de recogida de polvo conectados herméticamente a los 20 extremos superiores de las cubiertas superiores para llevar a cabo una absorción de aire por vacío hacia la parte superior de la pluralidad de cepillos de rodillo. (Patente nº EP 1651064, 2014)

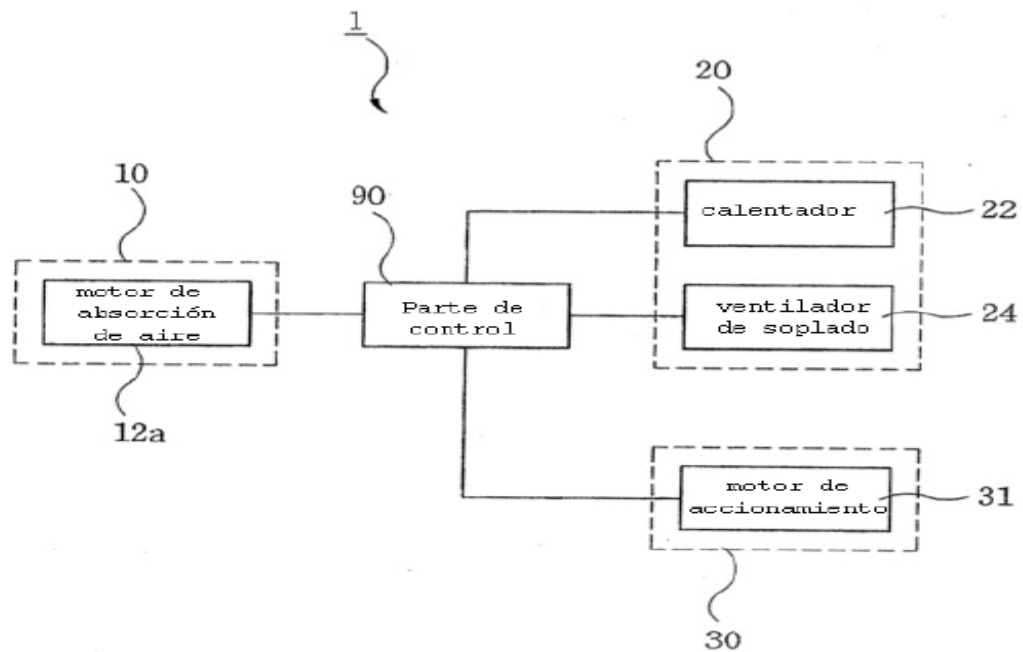
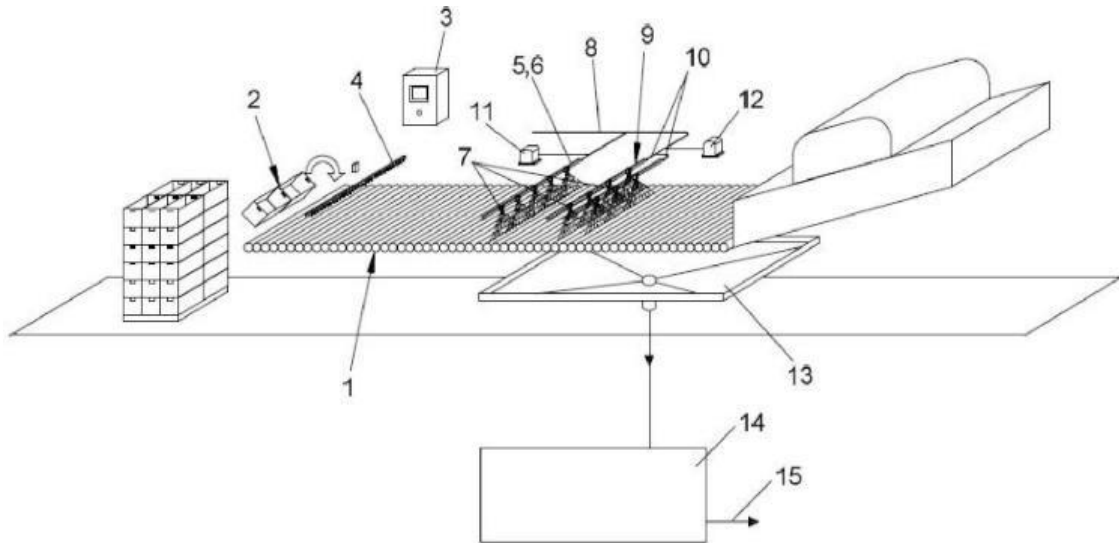


Figura 1. Diagrama de patente de invención de cluster 1

Fuente: (Patente nº EP 1651064, 2014)

En el cluster 2, es un tipo de patente de invención con número de solicitud P201430263. La invención consiste en un nuevo dispositivo que permite optimizar el lavado de frutas y similares por pulverización, como por ejemplo pueden ser hortalizas, en instalaciones de tratamiento post-cosecha, donde la fruta es sometida a diferentes procesos de lavado y desinfección, enjuague y secado. (España Patente nº P201430263, 2015)



*Figura 2. Patente de invención del cluster 2  
Fuente: (España Patente nº P201430263, 2015)*

El Cluster 3, es una patente de invención con número de solicitud P201630230. La presente invención corresponde al campo técnico de los sistemas de reutilización de agua para un centro de lavado de frutas y hortalizas, que comprenden unos medios de tratamiento del agua utilizada en el lavado conectados a un tanque de recogida del agua de lavado, un depósito de recogida del agua tratada conectado a dichos medios de tratamiento y al centro de lavado y unos medios de limpieza de los medios de tratamiento. (España Patente nº 2 631 192, 2016)

En el cluster 4 presenta una patente de invención con el número de solicitud europea 06425507.8 en el que se proporciona un sistema para lavar frutas y hortalizas que comprende:

una cinta transportadora de dichos productos a lo largo de una dirección y que presenta alojamientos para alojar dichos productos, presentando dichos alojamientos aberturas pasantes y una estación de lavado definida en una zona de dicha cinta transportadora y

provista de al menos un pulverizador para pulverizar agua de lavado sobre dichos productos y al menos un par de cepillos adaptados para cepillar dichos productos por medio de sus cerdas, estando caracterizado el sistema porque un primer cepillo de dicho par está situado debajo de dicha cinta transportadora y un segundo cepillo de dicho par está situado encima de dicha cinta transportadora y porque los cepillos de dicho par giran alrededor de ejes de giro respectivos con la misma dirección de giro, según lo expuesto en las reivindicaciones adjuntas.

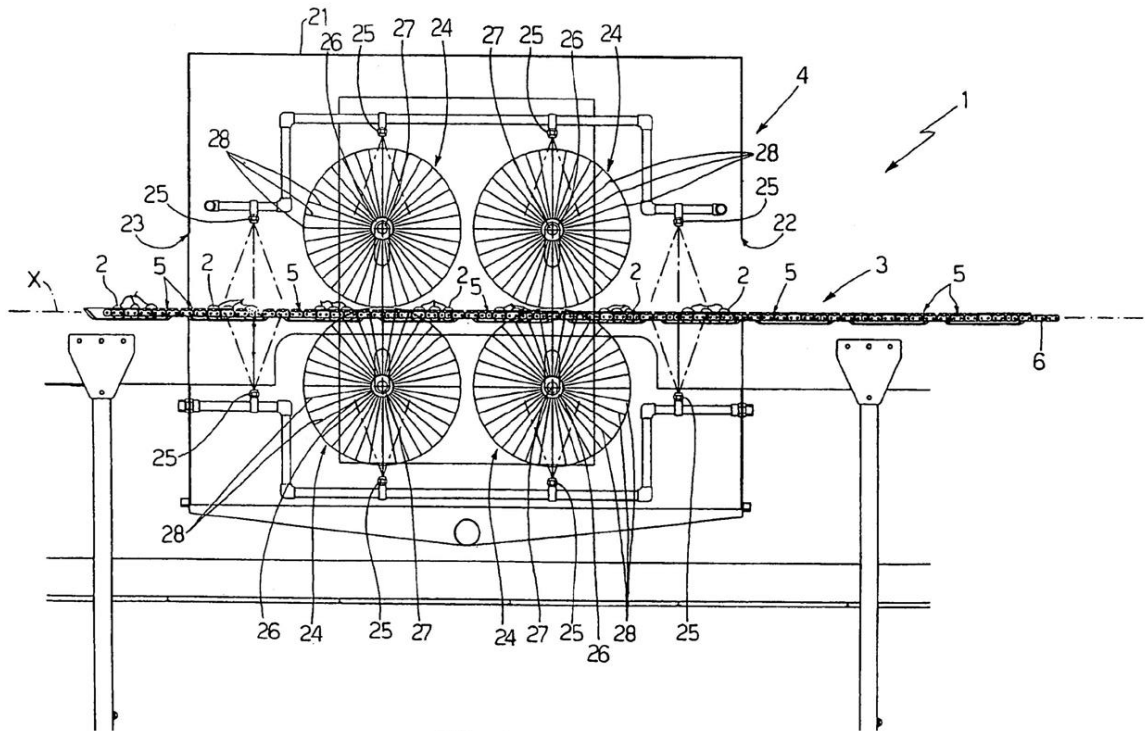


Figura 3. Patente de invención del cluster 4.  
Fuente: (España Patente nº 2 631 192, 2016)

## CÁPITULO II

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1. CÍTRICOS

El continente americano y el occidente de Europa son regiones catalogadas por su excelencia como las de mayor producción cítrica, aun sabiendo que estos son cultivos constantes que tienden a adaptarse a diferentes condiciones climáticas y que facilita su cultivo en la mayoría de países.

El alto contenido de antioxidantes es una de las principales características de los cítricos, componentes que impiden el daño por el ambiente contaminado producido por el tabaco, entre otros, previene enfermedades terminales y degenerativas como el cáncer e impide que el organismo envejezca a temprana edad. Otro de sus principales aportes es la vitamina C, la cual no se almacena en el cuerpo y debido a esto es necesario consumir a diario cualquier tipo de cítrico. La vitamina C aporta a la compensación de los tejidos, favorece a la cicatrización, fortalece los vasos sanguíneos, por tanto ayuda a la buena circulación de la sangre y mantiene huesos, encías y dientes sanos. Protegen el sistema respiratorio ya que aumentan las defensas, es por esto que son recomendados para las molestias de resfriados, gripes, dolor de garganta y muscular, y tienen acción antiviral y antibacteriana. La fibra es otro nutriente presente en los cítricos; ésta, limpia el tracto digestivo, desecha grasas y toxinas, y brinda sensación de saciedad, contribuyendo a comer menos y evitar subir de peso. (CÍTRICOS: CULTIVO, POSCOSECHA E INDUSTRIALIZACIÓN, 2012)

#### 2.2. SITUACIÓN NACIONAL

##### 2.2.1. Producción

En Colombia, la geografía posee las condiciones más adecuadas para la cosecha de cítricos; ya que las regiones con mayor producción están entre los 0 m – 1600 m de altitud y sus temperatura entre los 23°C y los 34°C, luminosidad superior a 1900 horas/año de brillo solar al año, con temporadas de lluvia anuales de 900 mm a 1200 mm. La futa tiene una producción constante durante todo el año, con cosechas que abundan en diferentes épocas.

La producción de cultivos tuvo una intervención de 1.38% en el año 2010. Hubo una decreciente producción entre 2007 y 2010 (*ver figura 4*), el promedio de tasa anual fue de -5.5 y -10.3%, y su rendimiento fue de -4.8% 15.

Debido a la temporada de lluvias que hubo en el país en el año 2007; el mercado de los diferentes cítricos en Colombia tuvo un déficit ocasionado por una producción menor, esto ha conducido a que en las diferentes regiones que son productoras cítricas, reduzcan su producción. (CÍTRICOS: CULTIVO, POSCOSECHA E INDUSTRIALIZACIÓN, 2012)

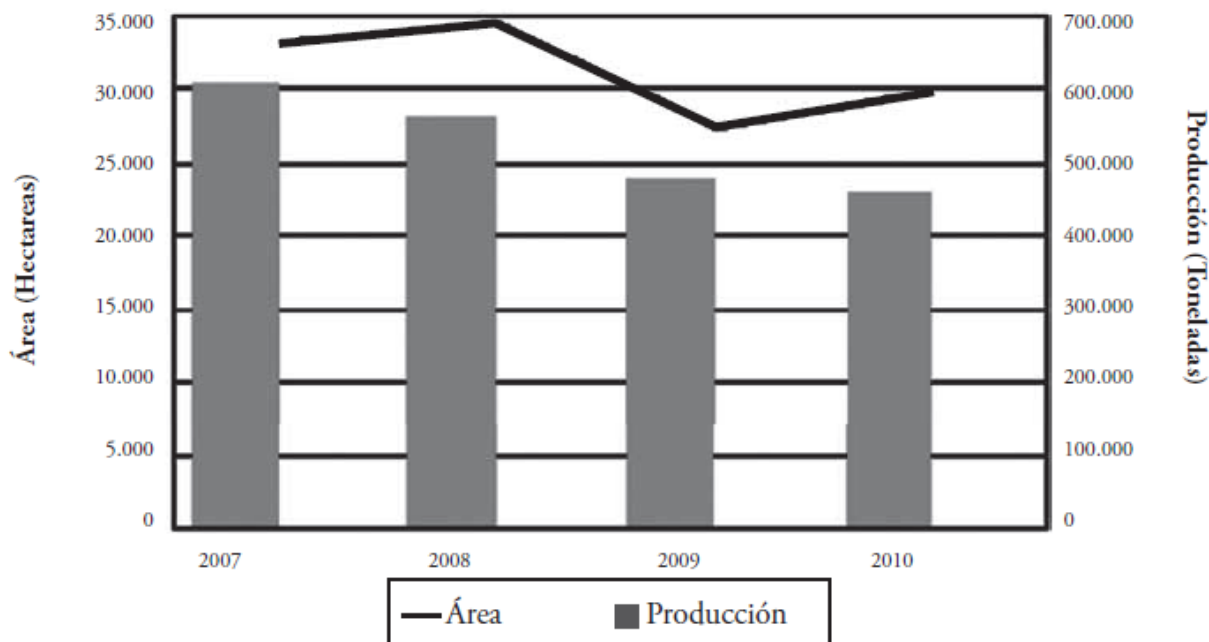


Figura 4. Comparativa de la producción vs área cosechada de cítricos  
Fuente: (CÍTRICOS: CULTIVO, POSCOSECHA E INDUSTRIALIZACIÓN, 2012)

### 2.2.2. Exportaciones nacionales de la lima Tahití.

La lima Tahití ha venido creciendo en cuanto a su consumo a nivel interno, pero la exportación siempre ha sido la principal prioridad para los productores, principalmente hacia Europa y Norteamérica. Entre el año 2000 y el año 2003 fue el mayor auge en cuanto a exportaciones de esta fruta

- pasando de 93.631 Kg. A un precio FOB de 67.496
- 1.180.602 Kg. a un precio FOB de 833.923.

Debido a esto, el país diseñó una política de apoyo para sembrar cultivos de limón Tahití, en las diferentes regiones con climas tropicales que reúnen las condiciones que se requieren para dicho proceso.

### **Precios nacionales.**

El comportamiento de los precios de los limones Tahití y común muestra un alto grado de sustitución entre las variedades. Según cálculos hechos por la Corporación Colombiana Internacional, con base en información del Sistema de Información de Precios del Sector Agropecuario, SIPSA, el grado de sustitución entre las variedades es del orden de 0.9 en la central mayorista de Bogotá, del 0.7 en Medellín y de 0.89 en Cali; esto permite concluir que el consumidor sustituye 86 fácilmente una variedad por otra cuando hay escasez o cuando los precios de una de las variedades suben. (PATRICIA & IVAN, 2004)

El canal de comercialización nacional no es muy complejo y está integrado por comerciantes estables y con tradición en el manejo de otras frutas como naranja, mandarina y piña. Los limones pasan directamente al productor mayorista, luego al detallista en las centrales de abasto y finalmente al consumidor final.

Las centrales mayoristas de cada uno de los departamentos se proveen de limones producidos, en su mayoría, en el mismo departamento y de la producción de los departamentos vecinos; las importaciones de limón, que completan la oferta nacional, llegan, sobre todo, a las centrales de abasto de Medellín y Cali procedentes de Ecuador y a la central mayorista de Cúcuta procedentes de Venezuela.

Los supermercados han venido incrementando su participación en el canal de comercialización, se provee en un 70% directamente de los productores y el 30% restante los adquieren a través de intermediarios. Los supermercados exigen que las limas cumplan con la norma técnica NTC 4087, aunque algunos han desarrollado normas propias. (PADILLA., 2004).

#### **2.2.3. Confección**

Según la Normativa de Calidad (NTC), expedidas por el Icontec. A la hora de presentar los frutos al consumidor, deben tener presencia de cáliz, deben ser frutos enteros y sin llegar a alterar la forma característica de cada una de las especies o variedades, en su etapa de poscosecha se debe asegurar un secado uniforme para que no presente humedad en su parte externa, si el producto va a ser empaquetado; se debe evitar cualquier olor o sabor diferente, se debe presentar con un aspecto fresco y sin materiales extraños como polvo producido por algún agroquímico y/o tierra, si va a ser empaquetado; debe ser visible, y se debe surtir por frutos de su misma especie, variedad, categoría y calibre.

El tratamiento y uso de fungicidas se puede implementar siempre y cuando haya una línea o sistema de ducha o aspersión.

El sistema de descarga de los frutos se puede hacer utilizando sistemas de amortiguado para desacelerar la caída y así proteger el producto de golpes y así regular el flujo del producto (figura 5).



*Figura 5. Volcado en seco y en agua  
Fuente: (Catarina Pedro Pássaro Carvalho, 2012)*

En la línea de entrada se recomienda utilizar los rodillos en ángulo de modo que proporcione la caída de hojas y ramitas que vayan en la canastilla.

El uso de detergentes alcalinos o neutros es fundamental, se recomienda que sea durante 30-40 segundos, el lavado se hace por lo general con máquinas o sistemas de lavado con boquillas o cortinas de espuma. Se utilizan cepillos redondos de nylon y deben girar entre 70-80 r.p.m o dependiendo del diseño a implementar.

En el sistema de enjuague, se deben utilizar boquillas con una presión de alrededor 200 Kpa y dejar escurrir en aros de latex con una velocidad de rotación que no sea mayor a 75 r. p. m. (Catarina Pedro Pássaro Carvalho, 2012)

La máquina de espuma se puede utilizar para aplicar o pulverizar fungicidas a una presión baja. Se recomienda usar desinfectantes en el sistema de enjuague para garantizar que no haya residuos en la fruta. (Catarina Pedro Pássaro Carvalho, 2012).



### **2.3. LAVADO POR ASPERSIÓN**

El lavado por aspersión es el método más común en cuanto a lavado húmedo se refiere, y su principal función es someter las superficies de la fruta a duchas de agua. Se utiliza presión en el agua para obtener una mayor cobertura, esto teniendo en cuenta también la distancia entre la fruta y la boquilla y el tiempo al que es sometido el producto.

El moho negro de los frutos es uno de los contaminantes que más se presentan en los cítricos, es por eso que se recomienda utilizar un pequeño volumen de agua pero con una mayor presión. (Conocimientosweb.net, 2013)

### **2.4. LAVADORES DE TAMBOR Y ASPERSIÓN.**

Consiste en unos rodillos metálicos que están separados uno del otro, de tal forma que deje pasar los desechos y sostenga la fruta mientras van pasando sobre estos. Se ubica en una posición inclinada y a una velocidad mínima; esto permite que se pueda controlar el movimiento de las frutas sobre los rodillos y garantizar la duración del sistema de lavado. El sistema de lavado contiene un tubo de aspersión con boquillas para asegurar el lavado del producto.

### **2.5.LAVADORES DE CINTA Y ASPERSIÓN.**

Este consiste en un sistema de banda transportadora que traslada la fruta por debajo del sistema de aspersión. Es implementado para frutas por lo general redondas para garantizar la fricción y sosteniéndolas bajo las duchas de aspersión. (los divinos, 2009)

## 2.6. CONTROLADOR APLICADO AL SISTEMA

### 2.6.1. Controlador PID

Se considera un sistema de control SISO, de una entrada y una salida y con un solo grado de libertad:

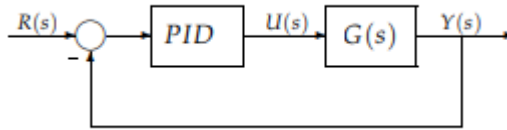


Figura 6. Diagrama de bloques de control PID  
Fuente: (Mazzone, 2002)

El grupo de controladores PID, incluyen tres principales acciones: proporcional (P), integral (I), y derivativa (D). Así entonces los miembros de este grupo de controladores se denominan P, I, PI, PD, y PID.

**P: acción de control proporcional**, el controlador arroja una salida proporcional al error, es decir:  $u(t) = KP * e(t)$ , cuya expresión de su función de transferencia es:

$$Cp(s) = Kp$$

De donde se tiene que  $Kp$  es la ganancia proporcional que puede ser ajustada. Un sistema de control proporcional es capaz de controlar cualquier planta estable, sin embargo, su desempeño está limitado y en régimen permanente (off-set), se observa error.

- **I: acción de control integral:** el controlador arroja una salida proporcional al error acumulado, esto conlleva lentitud en su modo de controlar.

$$u(t) = Ki \int_0^t e(\tau) d\tau \quad Ci(s) = \frac{Ki}{s}$$

Cuando la señal de error ( $\tau$ ) tiene un valor de cero, la señal del controlador  $u(t)$  posee un valor distinto de cero. Esto quiere decir que, si se da una referencia constante, o perturbaciones, se tendrá un error de régimen permanente de cero.

- **PI: acción de control proporcional-integral**, está definida por:

$$u(t) = Kp e(t) + \frac{Kp}{Ti} \int_0^t e(\tau) d\tau$$

De donde se tiene que  $Ti$  es el tiempo integral y es el término que establece la acción integral. Así entonces se tiene la función de transferencia:

$$Cp1(s) = Kp \left( 1 + \frac{1}{Tis} \right)$$

Cuando se tiene un control proporcional, se necesita que haya error para que el control en su acción proporcional arroje un valor distinto de cero. Con un controlador de acción integral, un error positivo mínimo siempre se tendrá una acción de control creciente, en cambio si se tiene un error negativo la señal de controlador será decreciente. Esto demuestra que, en régimen permanente, el error estará siempre en un valor de cero. En la industria la mayoría de los controladores tienen solamente acción PI. Eso debido a que un controlador PI es el más adecuado para los procesos donde la dinámica es primordialmente de primer orden. Una demostración sencilla de esto es por ejemplo la respuesta a un impulso escalón.

- **PD: acción de control proporcional-derivativa**, está definida por:

$$u(t) = Kp e(t) + KpTd \frac{de(t)}{dt}$$

De donde se tiene que  $Td$  es la constante nombrada tiempo derivativo. Este tipo de controladores se caracterizan por su rapidez.

La función transferencia de un controlador PD resulta:

$$CpD(s) = Kp + sKpTd$$

Para adquirir un controlador de alta sensibilidad, se suma una acción de control derivativa al control proporcional, produciendo un cambio visible antes de que la proporción del error sea demasiado grande.

- **PID: acción de control proporcional-integral-derivativa**, este tipo de controladores contiene reunidas cada una de tres acciones de control, anteriormente mencionadas. La acción combinada de este control se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$u(t) = Kp e(t) + \frac{Kp}{Ti} \int_0^t e(\tau) d\tau + Kp Td \frac{de(t)}{dt}$$

Así entonces la función de transferencia se expresa:

$$CPID(s) = Kp \left( 1 + \frac{1}{Tis} + Tds \right)$$

(Mazzone, 2002)

### 2.6.2. FET de potencia

El uso del MOSFET de alta potencia es un dispositivo generalmente utilizado para sistemas de control de motores, lámparas, fuentes de alimentación y otros tipos de cargas de alta potencia. Es común que en este tipo de aplicaciones se le denomine FET de potencia a los conocidos MOSFET.

#### FET de potencia como interfase

Las tarjetas de control digital son dispositivos diseñados para circuitos de baja potencia y proporcionan pequeñas corrientes de carga. Para poder usar la salida de un microcontrolador para controlar o excitar una carga que consuma alta corriente, se debe usar un FET de potencia como interfase (un componente B que permita a un dispositivo A controlar otro componente C). La figura 7 muestra como una tarjeta de microcontrolador es capaz de controlar un dispositivo de alta potencia. Cuando la señal de control es alta, el FET de potencia se comporta como interruptor cerrado. Cuando la señal de control es baja, el FET de potencia se comporta como un interruptor que está abierto. De las aplicaciones más relevantes de los FET de potencia, está el ser usado como interfase entre circuitos integrados digitales y cargas de alta potencia. La figura 8 muestra claramente como un CI digital es capaz de controlar una carga de alta potencia. (Malvino, 2000)

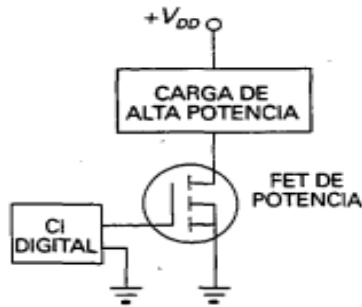


Figura 7. FET de potencia

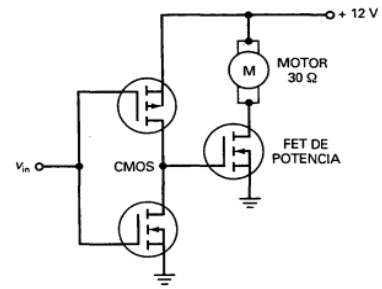


Figura 8. Uso de un FET de potencia para controlar un motor

Fuente: (Malvino, 2000)

### 2.6.3. Marco referencial

El Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, ICONTEC, es el organismo nacional de normalización, según el Decreto 2269 de 1993.

ICONTEC es un organismo sin ánimo de lucro, privado, que se encarga de ofrecer apoyo y crecimiento al productor y protegiendo los beneficios del consumidor. Brinda apoyo al sector público y al sector privado dentro del territorio colombiano, para así garantizar competitividad en el mercado interno y externo a la hora de exportar productos.

Los comités técnicos se encargan del proceso de normalización técnica de todos los sectores involucrados y del periodo de la consulta pública, siendo este distinguido por la intervención del público en general.

La norma NTC 4087 fue ratificada por el Consejo Directivo el 97-02-26

La norma NTC se ajusta y puede ser actualizada periódicamente ya que su fin es contribuir y beneficiar las necesidades y exigencias del productor y el consumidor (NORMA TÉCNICA COLOMBIANA (NTC 4087), 1997)

## **2.6.4. Lima tahití. Especificaciones**

### **2.6.4.1. Objeto**

Su principal función es implantar los requisitos que se deben cumplir en cuanto la comercialización, ya sea para el consumo o en la utilización de materia prima de la lima Tahiti.

### **2.6.4.2. Definiciones, clasificación y calibre**

#### **a) DEFINICIONES**

Para concluir los objetivos de esta norma se deben observar las siguientes descripciones:

- **Cáliz:** conjunto de hojas, flores, que envuelve las otras piezas florales por lo general verdes con características de la hierba.
- **Fruto no climatérico:** son las cosechas que adquieren una reducción en la tasa de respiración, y debido a esto se presentan cambios en la cantidad de ácidos y azúcares en la fruta.

#### **b) CLASIFICACIÓN**

La lima Tahití presenta tres categorías las cuales se explican a continuación:

- **Categoría extra**

La lima Tahití no debe presentar daños, se aceptan defectos exteriores que no superen el 15% de la superficie total de la fruta, sin que afecte la forma original del fruto (véase la Figura 9).



*Figura 9. Categoría extra*  
*Fuente. (NORMA TÉCNICA COLOMBIANA (NTC 4087), 1997)*

- **Categoría 1**

Se presentan unos requisitos generales que se deben efectuar y se permite lo siguiente:

- Su forma puede tener algunos defectos que sean mínimos.
- Deficiencias mínimas en su color, ocasionado por el sombreado que obtiene por la fricción entre las hojas y los frutos y marcas producidas por insectos. Estas deficiencias no pueden superar el 30% de la superficie total de la fruta (véase la Figura 10)

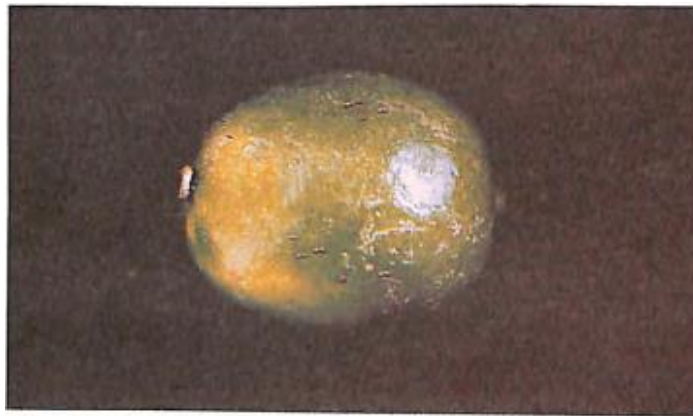


*Figura 10. Categoría 1*  
*Fuente. (NORMA TÉCNICA COLOMBIANA (NTC 4087), 1997)*

- **Categoría 2**

Esta categoría abarca la lima Tahití que no clasifica en las anteriores categorías, pero que satisface las características generales. Se permite los siguientes defectos (véase la Figura 11):

- Su forma puede tener algunos defectos.
- Deficiencias mínimas en su color, ocasionado por el sombreamiento que obtiene por la fricción entre las hojas y los frutos y marcas producidas por insectos. Estas deficiencias no pueden superar el 50% de la superficie total de la fruta
- Imperfectos en la piel o cascara.



*Figura 11. Categoría 2*

*Fuente. (NORMA TÉCNICA COLOMBIANA (NTC 4087), 1997)*

c) **Calibre**

Se define por el calibre de la sección ecuatorial de la fruta, se utiliza un calibrador y se mide en milímetros (mm). Como se determina en la siguiente tabla:



Tabla 3 calibres de la lima Tahití producida en Colombia  
Fuente: (NORMA TÉCNICA COLOMBIANA (NTC 4087), 1997)

CALIBRES			
Diámetro mm	Calibre mm.	Peso promedio (g)	
Mayor o igual a 68	A	179	Se permite hasta 10% por número o peso de limas que correspondan a un calibre inmediatamente superior o inferior
67-60	B	132	
59-50	C	90	
49-43	D	61	
menor o igual 42	E	42	

Calibre mínimo: se descartan los frutos que midan menos de 38 mm de diámetro

## 2.6.5. Requisitos y tolerancias

### 2.6.5.1. Requisitos generales

Las anteriores categorías de lima Tahití deben seguir cada uno de los requisitos y defectos que se autorizan. De igual forma, deben cumplir con las siguientes especificaciones:

- Cada uno de los frutos deben presentarse enteros.
- La forma característica de la lima Tahití debe ser la misma.
- Con presencia de cáliz
- La lima Tahití debe Presentarse sana (sin marcas de daños ocasionados por insectos y enfermedades, que afecten la fruta)
- En la etapa de poscosecha se debe tener cuidado para no presentar la fruta con humedad externa.
- Si hay contacto con otros productos, se debe asegurar que la lima Tahití no presente cualquier olor y/o sabor extraño

- Su apariencia física debe estar fresca y con firmeza en su consistencia.
- Se debe presentar sin componentes extraños como tierra, polvo, cuerpos extraños; provenientes de la poscosecha. (NORMA TÉCNICA COLOMBIANA (NTC 4087), 1997)

## **CAPÍTULO III**

### **3. DISEÑO METODOLÓGICO**

En el siguiente capítulo se considera el desarrollo e implementación de cada una de las etapas que conforman el sistema para limpieza y tratamiento de frutas aplicado a cítricos en la hacienda la Aurora ubicada en el municipio de Alvarado en el departamento del Tolima, con la finalidad de automatizar el proceso de limpieza, y encerado de limones para exportación.

El funcionamiento del sistema se basa en limpiar y encerar limones de una forma automática para agilizar el proceso de adecuación necesaria de las frutas para comercialización nacional e internacional. Su funcionamiento está regulado por el control de parámetros por medio de sensores y una tarjeta de microcontrolador digital. Se hace seguimiento al rendimiento del sistema para mostrar mediante un display los datos del funcionamiento en tiempo real.

Los requerimientos productivos de este proceso, son parámetros fundamentales a tener en cuenta para lograr diseñar un sistema que cumpla con los objetivos de disminución de costos y tiempo. Además, la disponibilidad de recursos por parte del propietario de la producción cumple un papel importante en el proceso de diseño del cada módulo el sistema.

#### **3.1. AUTOMATIZACIÓN DEL SISTEMA**

Actualmente el proceso de limpieza y brillo de las frutas se lleva a cabo de forma artesanal usando una mesa elaborada en madera de 150 cm de ancho por 280 cm de largo con inclinación horizontal de 1 metro en su extremo más alto y 80 cm en su extremo más bajo, donde se ubican dos derivaciones o tolvas que llevan el limón por fuerza de gravedad hasta las canastas en las que se empaca para ser comercializado. En cuanto el limón se pone sobre la mesa, los obreros contratados, toman trozos de tela de contextura muy suave y frotan los limones de forma circular para quitar las partículas de polvo y lograr un brillo mínimo sobre los limones, como se muestra en la figura 12, lo que no garantiza una limpieza total de la superficie de la fruta y conlleva un mayor tiempo de adecuación y con ello mayores costos.



*Figura 12. Brillado manual en la Hacienda la Aurora  
Fuente: autores*

Se hace un estudio de la línea de producción actual evaluando el tiempo empleado en cada etapa del proceso, desde la etapa de recolección de la fruta en el cultivo, el transporte hasta la bodega de tratamiento y almacenamiento, la etapa de selección y extracción de frutas dañadas, con imperfecciones y/o con tamaño notablemente reducido, la etapa de limpieza donde se remueven las partículas de polvo o suciedades externas, la etapa de brillado en la que la misma fruta adquiere su propio brillo al frotar su corteza con tela de textura suave, la etapa de empacado donde se llena cada canasta con un peso promedio de 20kg y la etapa de almacenamiento en la cual se lleva cada canasta de limones hasta un lugar fresco donde se almacena hasta su comercialización.

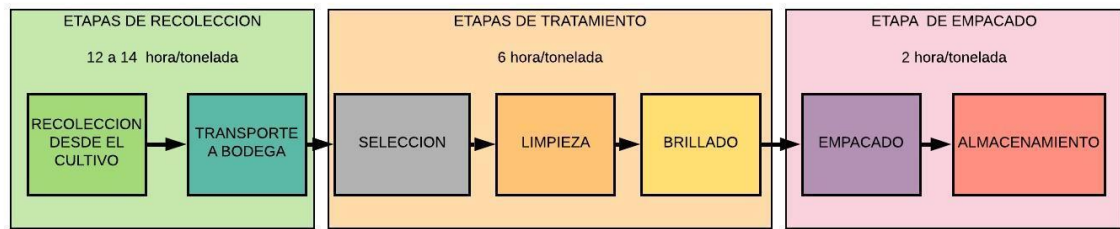


Figura 13. Diagrama de las etapas del sistema  
Fuente: autores

El funcionamiento del sistema se basará en transportar las frutas sobre una banda de rodillos de Felpa, los cuales giran mediante un sistema mecánico de cadenas y piñones accionado por un motor DC de 100 N/m al cual se le controla la velocidad para así lograr una referencia estable y evitar el deterioro de los cítricos debido a la delicadeza de su corteza. Las frutas avanzan sobre los rodillos, que a su vez están girando en la misma dirección en la que avanzan los limones, para lograr que estos sean transportados hacia la etapa de encerado, donde una solución de cera y agua es rociada sobre las frutas mediante un sistema de aspersion, cuya presión y flujo son manejados por una motobomba y una electroválvula activada digitalmente por la interrupción de un sensor de luz láser que se encuentra ubicado al principio de la banda de rodillos.

### 3.2. REQUERIMIENTOS PRODUCTIVOS

Para la automatización del proceso de limpieza y encerado de limones en la hacienda La Aurora del municipio de Alvarado, Tolima, se requiere:

- Un sistema de limpieza y brillo mediante rodillos.
- Un sistema de encerado mediante aspersion por boquillas.
- Una estructura que soporte y una los sistemas anteriores, con tolvas de entrada y salida para una la dinámica de las frutas.
- Que los componentes y materiales usados sean lo más económicos posible.
- Que el sistema logre limpiar, brillar y encerar más de 210 kg por hora.
- Que el costo de limpieza, brillo y encerado de 1 tonelada, sea menor a \$125.000.

## CAPÍTULO IV

### 4. DISEÑO

Para lograr que la máquina a diseñar cumpla con los objetivos que se plantean, se crea un diseño, teniendo en cuenta, el costo de los componentes empleados, el presupuesto disponible por parte del dueño del cultivo de limones, la cantidad de fruta con la que va a trabajar el sistema y las distintas tareas que debe realizar la máquina.

La cantidad de limón Taití que se desea limpiar en la máquina estará entre una y dos toneladas por semana; dependiendo del precio del limón en el mercado, el dueño del cultivo decide qué cantidad de fruta recolectar y limpiar para vender, aun así, se debe tener en cuenta que no serán menos de 100kilogramos. Por ello se necesita que la máquina logre limpiar adecuadamente grandes cantidades de limón.

#### 4.1. RODILLOS

Los cítricos son frutas que requieren de un tratamiento delicado para evitar daños en su corteza, como rayones o manchas de color oscuro, que son causados por golpes o fricción con materiales de texturas demasiado ásperas. Por esta razón los rodillos que se utilizan en sistemas para limpieza de cítricos, están fabricados en su mayoría, de tubos muy gruesos en los cuales se insertan filamentos de nylon quedando en forma de cepillos muy suaves. *Ver figura 14*



*Figura 14. Rodillos industriales en nylon  
Fuente: (SoloStocks, 2019)*

#### **4.1.2. Selección del tipo de rodillo**

La medida del diámetro del rodillo está determinada principalmente por el tamaño de la fruta que se va a limpiar, en este caso el tamaño de un limón Taití de mejor calidad, es de mínimo 68mm de diámetro, por lo que la medida adecuada del rodillo debe estar entre los 50mm y los 130mm de diámetro; esta medida, junto con el espacio entre rodillos, que debe ser de máximo 3cm, medidos desde el punto más aleado del eje, hasta el mismo punto del siguiente rodillo, son de gran importancia para la dinámica de las frutas, ya que un diámetro demasiado grande o una separación mayor a los 3cm, puede evitar que el limón avance sobre los rodillos y causaría un amontonamiento de estos. Se tiene en cuenta la medida del limón de mejor calidad, debido a que los limones más pequeños son seleccionados manualmente antes de ingresar al sistema, estos se venden a menor precio y normalmente no sirven para exportación, por lo tanto, su tratamiento se hace aparte. La medida del largo del rodillo se determina a partir de las longitudes del sistema que se va a diseñar, a su vez, este depende de la cantidad de limón que se desea limpiar.

Para este sistema, que tiene longitudes de 40cm de ancho por 110cm de largo, se requieren al menos 6 rodillos con cepillo, de 30cm de largo para la etapa de limpieza y otros 2 o 3 rodillos sin cepillo, de la misma longitud, para la etapa de encerado. En el mercado actual,

un rodillo con cepillo de estas medidas cuesta alrededor de \$150.000, esto multiplicado por la cantidad de rodillos, que serían 6, daría un costo de \$900.000, este valor incrementa en gran medida el total de costos de fabricación de la máquina y se sale del presupuesto disponible por arte del dueño del cultivo.

#### 4.1.3. Rodillos de menor costo.

Se busca una alternativa para reemplazar los rodillos tradicionales, estos nuevos rodillos deben cumplir las mismas funciones, deben estar hechos de un material suficientemente suave para evitar daños y a la vez resistente a la fricción con las frutas, y lo más importante que su precio en el mercado o su valor de fabricación sea mucho más bajo. Se intenta fabricar un tipo de rodillo de las mismas características del que se encuentra en el mercado, pero el costo de fabricación, materiales y trabajo son igualmente altos. Así entonces, la búsqueda se centra en rodillos con cepillo de un material más económico que el nylon, encontrando como el más apropiado un rodillo que, en lugar de cepillo está cubierto por felpa; la felpa es un material suave, resistente a la fricción con las frutas y económico. Se contacta a la empresa Gumoplast, la cual se dedica a la fabricación de este tipo de rodillos, hechos principalmente para trabajos de pintura, pidiendo información sobre rodillos con las longitudes adecuadas para este sistema, obteniendo como respuesta un rodillo con diámetro de 3 pulgadas de tubo, más aproximadamente 1.17 pulgadas de felpa. Ver figura 15.

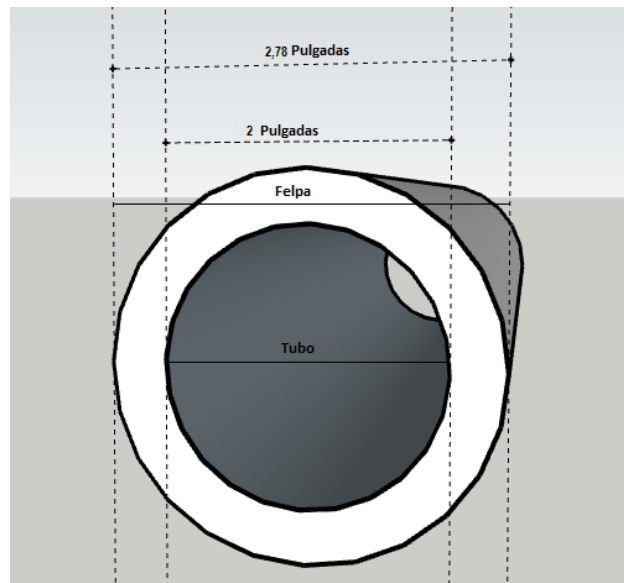


Figura 15. Diseño 3D del rodillo usado  
Fuente: autores



El material en el que está fabricado el nuevo rodillo, cumple con las características necesarias para reemplazar al rodillo con cepillo de nylon generalmente usado en este tipo de sistemas, además es 97% más económico, costando \$24.000.

#### **4.1.4. Adaptación rodillo-eje**

Para poder usar estos rodillos en un sistema mecánico accionado por piñones con cadenas o poleas, se deben adecuar con ejes internos de metal resistentes al peso que soportan los rodillos, y resistentes a las vibraciones de la rotación mecánica. Por lo tanto, se debe pensar en un diámetro de tubo metálico, lo suficientemente grueso para evitar que se doble o se parta con el peso de los limones. Con la asesoría de un experto en mecánica se propone como medida mínima de diámetro del eje, 1/3 de pulgada de grosor, teniendo en cuenta también el costo de este componente y su cantidad a utilizar. Así entonces se debe ajustar, el eje al diámetro del rodillo con un tapón circular reduciendo el espacio interior de 2 pulgadas a 1/3 de pulgada, aplicando suficiente presión y un tipo de pegamento industrial para evitar que se suelte.

#### **4.1.5. Medidas ejes de rotación**

La medida de largo de este eje debe ser mayor al largo del rodillo, debido a que debe estar sujeto a un tipo de rodamiento en ambos extremos y en uno de los extremos llevara el piñón que recibe la fuerza para su debida rotación; por ello se decide que el largo del eje debe ser de mínimo, 38cm. Como se observa en la figura 16. Se necesitan 7 ejes con las medidas ya mencionadas y un eje con el mismo grosor, pero con 2 cm más de longitud debido a que se fijaran 2 piñones en este último eje.

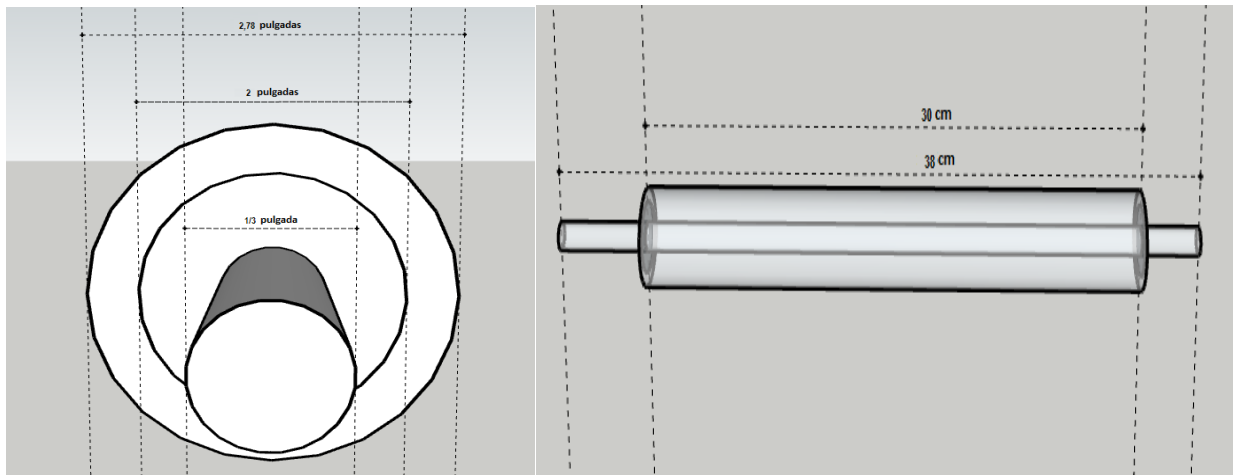


Figura 16. Diseño 3D de rodillos con eje  
Fuente: autores

#### 4.1.6. Cantidad de rodillos

Teniendo en cuenta la medida de largo deseado de la máquina, se necesitan exactamente 8 rodillos ubicados a la misma distancia, 6 de ellos con cubierta de felpa, contados desde la entrada al sistema, los otros 2 rodillos serán tubos lisos de PVC o metal, situados a la salida de la máquina en donde se encuentra la etapa de encerado, estos últimos son lisos debido a que transportan el limón luego de pasar por los chorros de aspersión, por lo tanto, se busca que escurran la mayor cantidad de agua posible antes de llegar a la tolva de salida.

Contando ya con las medidas exactas del rodillo que se va a utilizar, se continúa con el diseño de la estructura base, la estructura mecánica y demás elementos necesarios en el sistema.

#### 4.1.7. Separación entre rodillos

Con una medida de diámetro de 2.78 pulgadas cada rodillo, y teniendo en cuenta el diámetro promedio de un limón de calidad extra el cual es de 2.36 pulgadas, se calcula que la separación entre rodillos debe ser de mínimo 9 cm medidos desde cada eje de rotación. Así entonces la distancia máxima que debe haber entre cada rodillo debe ser menor a los 3cm para lograr que con el giro de los rodillos los limones avancen sobre estos evitando amontonamiento y pérdida de tiempo. Ver figura 17.

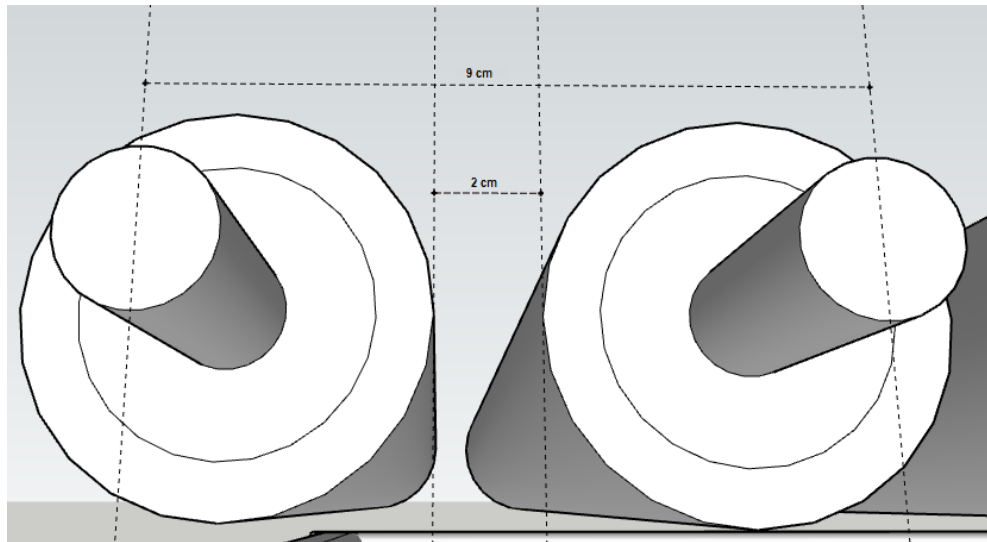


Figura 17. Medidas de separación entre rodillos  
Fuente: autores

## 4.2. ESTRUCTURAS DE SOPORTE

La estructura base debe estar fabricada de un material suficientemente fuerte para soportar desde los 10 kg, que es el peso aproximado de los componentes del sistema, mecánicos, eléctricos y de seguridad; el peso máximo que debe soportar la estructura base debe ser mayor a los 20 kg, que es el peso que puede acumularse sobre los rodillos al estar llena de limones en su totalidad sumado al peso de los componentes. Además, debe ser un material que soporte fuertes vibraciones, debido a que se trabajará con motores y mecanismos con cadenas. Se recomienda que sea una estructura en metal, debido a que también estará expuesta a humedad, ya que se usa un sistema de aspersión con agua y otras sustancias dentro del mismo sistema de lavado.

### 4.2.1. Estructura principal

La estructura principal es la que se observa en las *figuras 18, 19* y debe ser armada en láminas de acero inoxidable debido a que estará en contacto constante con humedad y demás factores ambientales que pueden deteriorar la estructura. Adicional a esto en máquinas de tratamiento de alimentos se recomienda siempre que las piezas que transportan el producto directa o indirectamente sean en acero inoxidable. Esta estructura debe llevar los agujeros en los que van introducidos los ejes de los rodillos separados máximo 9cm desde cada centro.

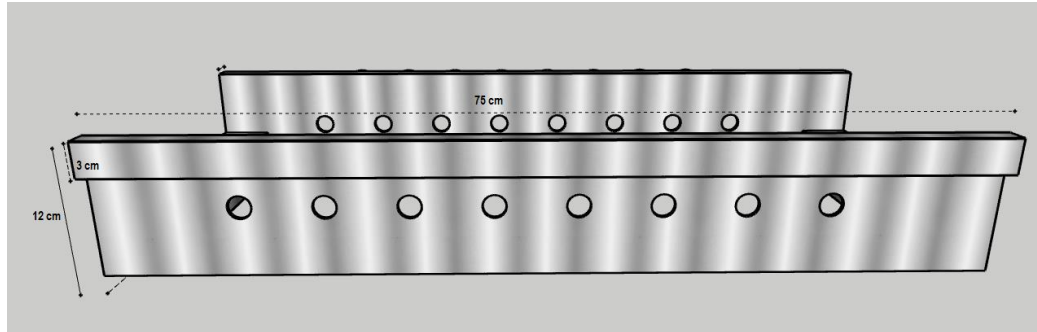


Figura 18. Diseño 3D estructura principal, láminas laterales

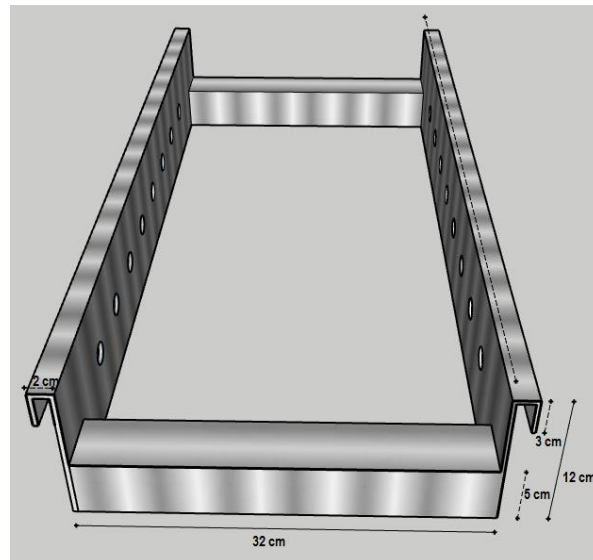
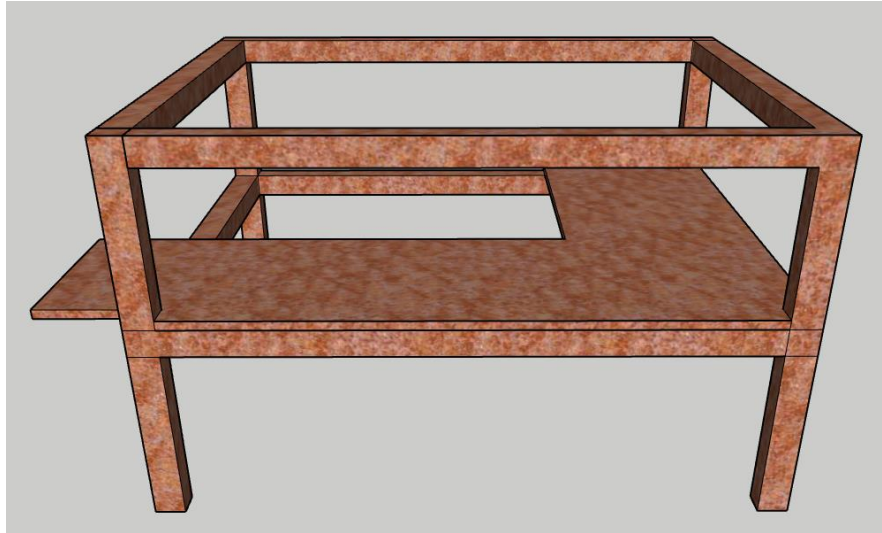


Figura 19. Diseño 3D estructura principal vista desde el frente  
Fuente: autores

#### 4.2.3. Estructura base

La estructura base debe estar armada en un material igualmente resistente, preferiblemente metal y no es estrictamente necesario que se en acero inoxidable ya que este material es de alto costo. Puede ser hierro, pero debe ir cubierta por pintura o alguna sustancia que proteja su superficie de la corrosión por humedad.



*Figura 20. Diseño3D Estructura base  
Fuente: autores*

Su forma es la que se muestra en la figura 20 obsérvese que en la parte media de los soportes verticales debe ir una plataforma del mismo material, en la que se pondrán los componentes mecánicos y electrónicos del sistema.

### **4.3. RODAMIENTOS**

Los rodillos deben estar girando sobre su eje horizontal a una velocidad determinada, por lo tanto, en cada extremo de cada rodillo se deben fijar rodamientos de tipo balineras, para evitar la fricción con los soportes fijos, ya que esto provocaría un mayor esfuerzo mecánico, sobre calentamiento en los soportes y en los ejes de los rodillos y un desgaste drástico que afectaría el tiempo de vida útil de los componentes y de la máquina en general ; según asesoría del experto en mecánica, el rodamiento más adecuado para este tipo de trabajo es la chumacera tipo brida, *ver figura 21.*



Figura 21. Chumaceras tipo brida  
Fuente: (High Tech Bearings, s.f.)

Por el tamaño de los ejes y la separación entre cada rodillo una chumacera industrial que se ajuste a las medidas necesarias es muy difícil de encontrar en el mercado y los precios de fabricación son bastante elevados. Por esta razón se opta por usar balineras tipo adaptando su parte interna a los ejes de los rodillos y su anillo externo fijado a la estructura principal. Ver figura 22.

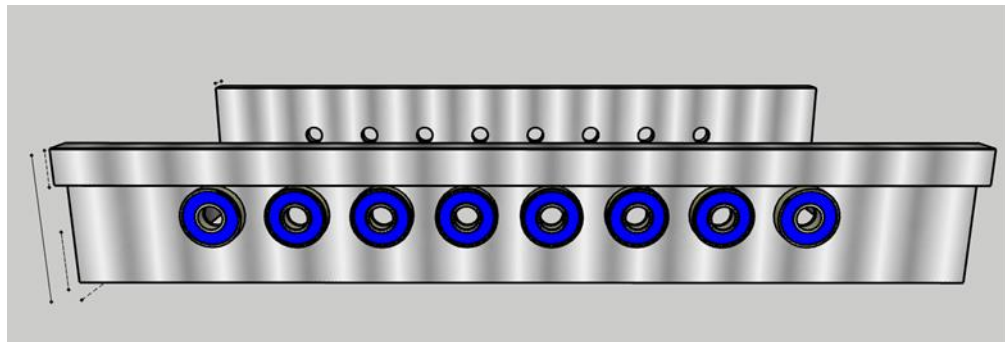


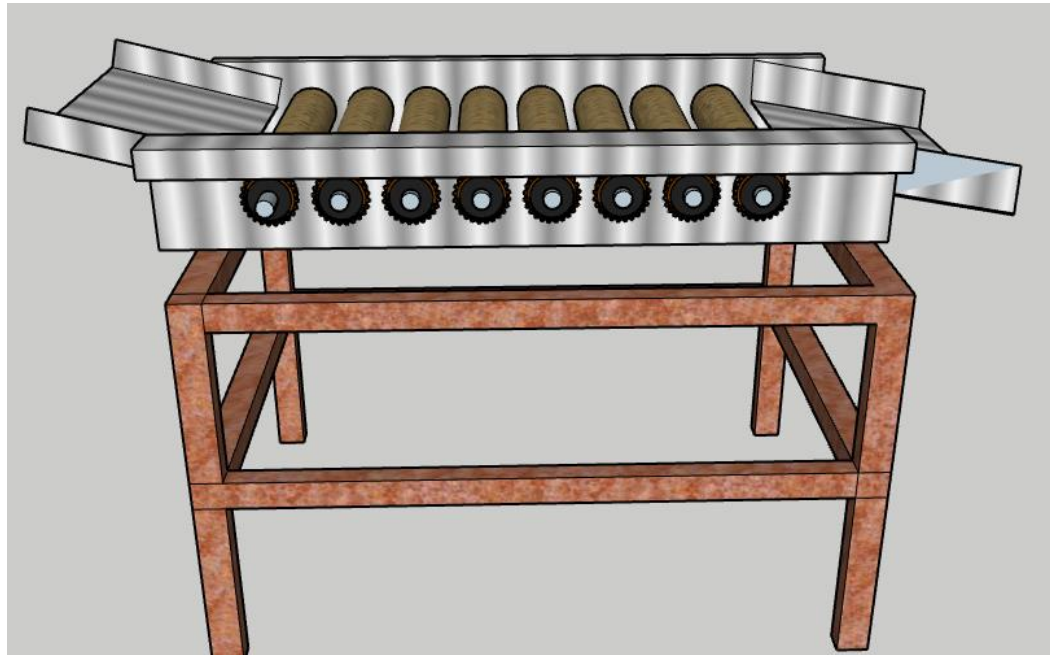
Figura 22. Diseño 3D, ubicación de rodamiento o balineras  
Fuente: autores

#### **4.3.1. Mecanismo de rotación**

Para transmitir la fuerza desde el motor a los rodillos se escogió un mecanismo de cadenas y piñones, las cadenas ofrecen gran resistencia de tensión, mayor tolerancia a altas temperaturas y a factores externos como humedad. Implementar un mecanismo con poleas y correas es menos viable debido a que la rotación a altas velocidades y el trabajo durante largos periodos de tiempo, causarían en las correas sobrecalentamiento y posible ruptura, según concepto del experto en mecánica. Adicional a esto se debe tener en cuenta que las correas pueden llegar a estar expuestas humedad, esto sumado a una alta temperatura causaría deterioro de las correas en poco tiempo e incrementaría el costo de mantenimiento de la máquina.

#### **4.3.2. Piñones**

Los piñones para este mecanismo se eligen según el esfuerzo y la velocidad a la de que deben girar los rodillos, en el marco teórico se menciona que para tratamiento de cítricos, los rodillos de nylon deben girar a una velocidad constante, en este caso el recubrimiento de los rodillos está fabricado en felpa, un material muy diferente al nylon, por lo que la velocidad de rotación se establece mediante el análisis de rendimiento y resultados. Sin embargo, teniendo en cuenta el esfuerzo que debe hacerse, dado por el peso de la máxima cantidad de limones que se acumularían sobre los rodillos, se elige un piñón de 2 pulgadas, esto, teniendo en cuenta el diámetro del rodillo, y según criterio del experto en mecánica. La velocidad de rotación no es problema, ya que en la parte electrónica se aplica un control digital al motor, y se trabajara con la velocidad adecuada, según análisis de resultados.



*Figura 23. Diseño 3D ubicación de piñones  
Fuente: autores*

### **4.3.3. Cadena de transmisión de fuerza**

La cadena que transmite la fuerza del motor a los piñones es proporcional al tamaño de los piñones, en máquinas como esta se usan dos cadenas del mismo calibre, una para transmitir directamente la fuerza mecánica desde el motor hasta el primer rodillo, en este primer rodillo se fijan dos piñones, uno para recibir la cadena que viene desde el motor y el otro para transmitir la fuerza desde este primer eje a todos los demás ejes de la máquina. *Ver figura 24.* La segunda cadena es la que transmite la fuerza desde el primer rodillo a todos los demás piñones de la máquina, haciendo que estos giren a la misma velocidad.



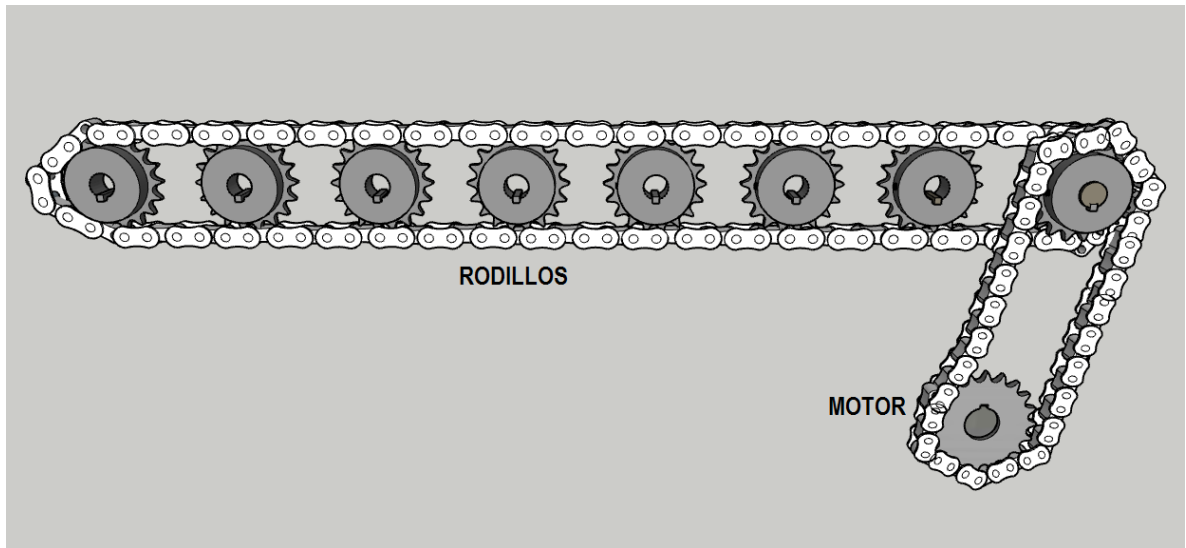


Figura 24. Diseño 3D piñones con cadena de tracción  
Fuente: autores

#### 4.4. MOTOR

El motor, es el componente de la máquina que transforma la energía eléctrica en energía mecánica, la característica principal que se tiene en cuenta para elegir el tipo de motor adecuado para este sistema, es la fuerza del torque, se necesita mover aproximadamente 15 kg entre componentes y frutas, teniendo en cuenta rodamientos con el mínimo de fricción. Por lo que la mínima fuerza que debe tener el motor es de 100N/m, según criterio del experto en mecánica. Así entonces, se busca un motor en el mercado que cumpla con los requerimientos encontrando precios desde los \$200.000 hasta los \$500.000, variando entre estos, características mínimas a tener en cuenta.

La selección del motor para este sistema debe contemplar principalmente la fuerza de torque requerida para mover el tren de rodillos con el máximo peso sobre ellos. Así entonces sumando el peso normal de los rodillos incluyendo el eje de metal y adaptaciones, con el peso de la máxima cantidad posible de limones acumulados sobre los rodillos, teniendo en cuenta la cantidad y longitud de los rodillos, se tiene que:

$$P_t = \left( \frac{L_r * C_r * P_l}{D_l} \right) + P_c$$

Siendo,

$P_t$  = El peso total a mover

**Lr**= Longitud de largo de cada rodillo

**Cr**= Cantidad de rodillos

**Pl**= Peso aproximado de cada limón de calidad extra

**Dl**= diámetro mínimo de cada limón de calidad extra

**Pc**= Peso aproximado de componentes

Así entonces, tendríamos que el peso máximo total con el que debe trabajar el motor es:

$$Pt = \left( \frac{0.30m * 8 * 110g}{0.060m} \right) + 10000g$$

$$Pt = 14400g$$

Un total de 14 kilogramos aproximadamente. Teniendo en cuenta este valor se hace la comparación y selección del motor.

Debido a la importancia de la parte mecánica en este sistema, es igualmente importante elegir un motor que tenga la fuerza suficiente, además de ser económico y controlable. Teniendo en cuenta estos aspectos se hace el siguiente análisis.

*Tabla 4. Características del motor*

<b>CARACTERISTICAS MOTOR</b>	
<b>ASPECTO</b>	<b>VALOR</b>
Fuerza de torque	40
Rango de Velocidad	15
Voltaje de operación	10
Consumo de potencia	10
Costo	25

Tabla 5. Comparación motores DC

<b>MOTORES</b>				
<b>ASPECTO</b>	Motor Single Ball Bearing For Car W	Permanente Imán Eléctrico Cepillado Motor Genera	Permanent Magnet Dc Motor High Speed Cw/ccw	motor DC
Fuerza de torque	30	40	40	40
Rango de Velocidad	15	15	15	15
Voltaje de operación	6	10	10	10
Consumo de potencia	10	10	3	10
Costo	3	12	10	20
<b>Total</b>	64	87	78	95

#### 4.4.1. Refuerzo de potencia



Figura 25. Relación de piñones de menor a mayor  
Fuente: autores

La transmisión de potencia del motor a los rodillos es mejorada usando una relación de piñones de menor a mayor tamaño, logrando repotenciar la fuerza que el motor ejerce sobre los rodillos. El piñón en el eje del motor cuenta con 18 dientes mientras el piñón que recibe la fuerza en los rodillos tiene 34 dientes, así entonces la relación de fuerzas es la siguiente.

$$Rf = \frac{Ndr}{Ndm} = \frac{34}{18} = \frac{1,8}{1} = 1,8 : 1$$

Siendo

$Rf$  = Relación de fuerza del motor a los rodillos

$Ndr$  = Numero de dientes del piñón receptor en los rodillos

$Ndm$  = Número de dientes del piñón en el eje del motor

#### **4.5. SISTEMA DE ASPERSIÓN**

El sistema de aspersión de esta máquina, cumple con la tarea de encerado de la fruta, está ubicado en la parte final del tren de rodillos ya que el encerado es la última etapa del sistema, luego de esto la fruta pasa ser empacada para almacenamiento o distribución directa en el mercado. La sustancia aplicada a las frutas en esta etapa, es una especie de cera, no toxica, comestible, de textura ligeramente viscosa, disuelta en agua y aplicada a los cítricos para ayudar a conservar la fruta mayor tiempo, para control fitosanitario y además brindar brillo adicional, dando una imagen más fresca y atractiva al consumidor.

##### **4.5.1. Componentes del sistema de aspersión**

Un sistema de aspersión contiene cuatro componentes básicos, tanque de almacenamiento del líquido, motobomba de presión, tubos o mangueras de distribución y aspersores. Para esta máquina, el tanque de almacenamiento de líquido está descubierto en la parte de arriba, ya que el líquido que escurre de los limones es nuevamente recolectado, por debajo de los rodillos. La reutilización de esta sustancia es posible determinado número de veces, debido a que los limones llegan a este punto luego de pasar por un proceso de limpieza de su corteza. Luego de que la solución de agua y cera cae por entre los rodillos es almacenada en un recipiente de capacidad mínima de 5lt. Al llegar al tanque de almacenamiento, la sustancia es succionada por la motobomba de presión, al mismo tiempo que pasa por un filtro de partículas compuesto por una malla de orificios de máximo 0,5mm de diámetro, evitando así que partículas diminutas obstruyan la salida en los aspersores

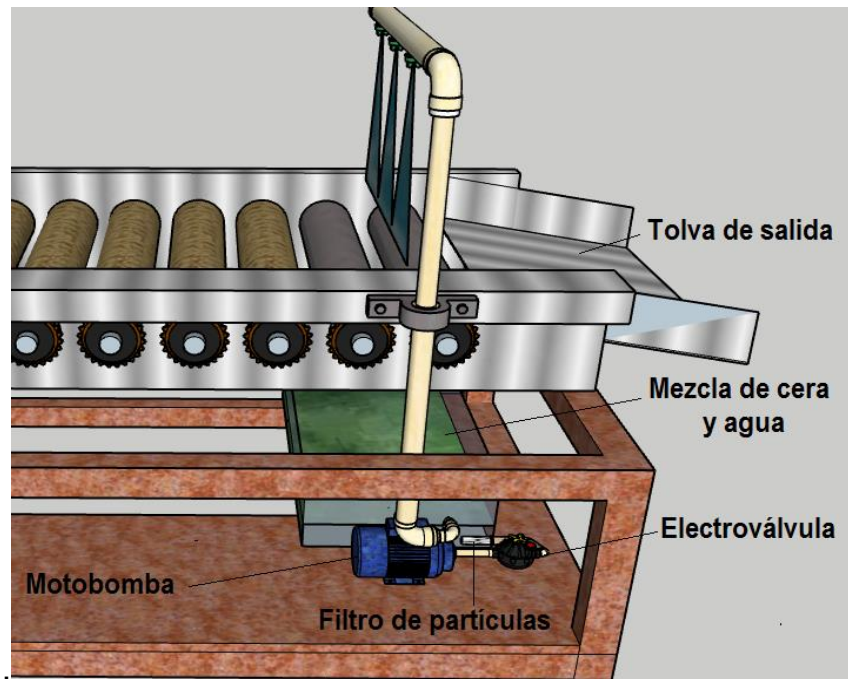


Figura 26. Diseño 3D de los componentes del sistema de aspersión

#### 4.5.2. Selección de la motobomba

La motobomba que se usa para hacer circular el líquido desde el tanque hasta los aspersores tiene capacidad de 5lts por minuto, y tiene suficiente presión para lograr que el chorro en los aspersores se esparza cubriendo la mayor cantidad de limones por boquilla. Esta debe encenderse y apagarse según la lectura de un sensor en la entrada de fruta, cuyo funcionamiento se explica en el capítulo de sistemas electrónicos y de control. Luego de ser dirigido hacia los tubos de distribución, el líquido pasa por una electroválvula, cuya activación es controlada digitalmente por un microprocesador, que a su vez recibe la señal del sensor, al igual que la motobomba.

#### 4.5.3. Selección de la electroválvula

La electroválvula cumple la función de abrir y cerrar el paso del líquido que va hacia las boquillas debido a la constante conmutación de encendido y apagado de esta etapa. Se escoge una electroválvula a 110V para asegurar el cierre total del fluido aun con la presión de la motobomba.

#### 4.5.4. Boquillas de aspersión



Figura 27. Geometría aspersión  
Fuente: (Intagri, 2018)

En sistemas de tratamiento de cítricos, los aspersores están ubicados por debajo de un tubo recto situado de forma horizontal sobre la trayectoria de los limones. *Ver figura 29*. Se crea el diseño de este sistema con aspersores tipo boquillas de abanico plano con ángulo de apertura de  $30^\circ$ , siendo estas las más apropiadas por la forma de cobertura de aspersión. *Ver figura 27*. La cantidad de boquillas a utilizar depende del área que se desea cubrir y la altura a la que se fije el tubo, ya que a mayor altura, el área cubierta por los chorros es mayor y se necesitaran menos boquillas, aunque a menor altura se asegura una total cobertura del área alcanzada. Para la selección adecuada se tuvo en cuenta la tabla que se observa en la figura 28. Altura-cobertura

Angulo de pulverización incluido	Cobertura teórica a diversas alturas de pulverización (en centímetros)							
	20 cm	30 cm	40 cm	50 cm	60 cm	70 cm	80 cm	90 cm
15°	5.3	7.9	10.5	13.2	15.8	18.4	21.1	23.7
20°	7.1	10.6	14.1	17.6	21.2	24.7	28.2	31.7
25°	8.9	13.3	17.7	22.2	26.6	31.0	35.5	39.9
30°	10.7	16.1	21.4	26.8	32.2	37.5	42.9	48.2
35°	12.6	18.9	25.2	31.5	37.8	44.1	50.5	56.8
40°	14.6	21.8	29.1	36.4	43.7	51.0	58.2	65.5
45°	16.6	24.9	33.1	41.4	49.7	58.0	66.3	74.6
50°	18.7	28.0	37.3	46.6	56.0	65.3	74.6	83.9
55°	20.8	31.2	41.7	52.1	62.5	72.9	83.3	93.7
60°	23.1	34.6	46.2	57.7	69.3	80.8	92.4	104
65°	25.5	38.2	51.0	63.7	76.5	89.2	102	115
73°	29.6	44.4	59.2	74.0	88.8	104	118	133
80°	33.6	50.4	67.1	83.9	101	118	134	151
85°	36.7	55.0	73.3	91.6	110	128	147	165
90°	40.0	60.0	80.0	100	120	140	160	180
95°	43.7	65.5	87.3	109	131	153	175	196
100°	47.7	71.5	95.3	119	143	167	191	215
110°	57.1	85.7	114	143	171	200	229	257
120°	69.3	104.0	139	173	208	243		
130°	85.8	129	172	215	257			
140°	110	165	220	275				
150°	149	224	299					

Figura 28. Angulo y cobertura de pulverización de la boquilla  
Fuente: (Intagri, 2018)

Así entonces se ubica un tubo de PVC de ½ pulgada de 32cm de largo, y a 20 cm por encima de los rodillos, al cual se adhieren de forma segura y evitando cualquier escape de líquido, 3 boquillas, las cuales cubren el total de 30 cm del largo de los rodillos. El tubo está situado verticalmente sobre el espacio entre el rodillo 7 y 8, siendo estos, los dos rodillos que no tienen felpa. Se elige esta ubicación para evitar que el líquido salpique los rodillos con felpa, ya que si se mojan estos rodillos su peso se incrementa y esto afectará la mecánica de la máquina.

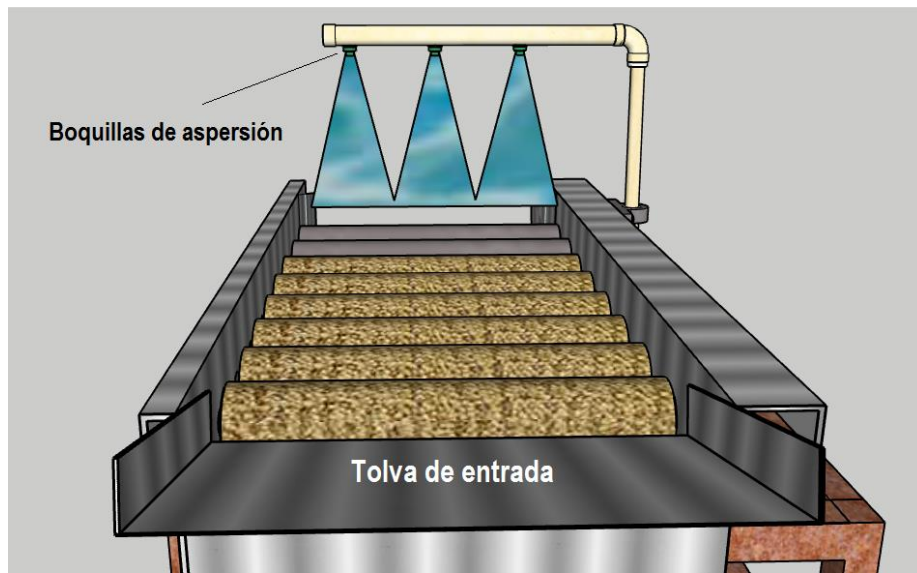


Figura 29. Diseño 3D, aspersores

#### 4.6. SISTEMAS ELECTRÓNICOS Y DE CONTROL

Para el correcto funcionamiento de esta máquina, es necesario el diseño de circuitos con sensores y microcontroladores con algoritmos de control digital que dirijan los componentes electromecánicos del sistema.

Una de las funciones principales de la máquina es la limpieza de los limones por medio de la rotación de los rodillos con felpa. En caso de la detención de esta función mecánica, la máquina se detendría en su totalidad llevando su rendimiento a cero. Por esto es importante que la fuerza que mueve los rodillos sea la suficiente para que giren a la misma velocidad con carga o sin carga. En el campo de la ingeniería electrónica el diseño de controladores digitales es una de las herramientas más eficientes de llevar a cabo la estabilización de variables controlables dentro de un entorno. Para hacer efectivo el uso de controladores digitales se necesitan componentes básicos como, sensores, microcontroladores, y actuadores. Para elegir correctamente los componentes electrónicos y electromecánicos necesarios, se hace un análisis de cada uno de los ellos, teniendo en cuenta sus características básicas, dando un valor a cada característica y haciendo una comparación de la importancia de cada una en el correcto funcionamiento del sistema.



## 4.6.1. Control del sistema de aspersión

### 4.6.1.1 Selección del sensor de movimiento

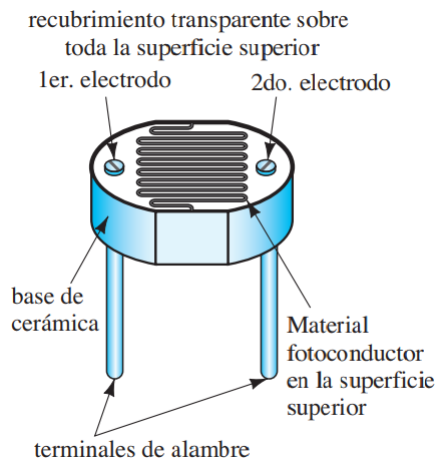
Existe gran variedad de sensores para detectar movimiento a corta y larga distancia. De acuerdo con las medidas del sistema, se escoge la fabricación de un sensor laser de bajo costo por su mejor desempeño ante la detección de movimiento en un punto determinado del sistema.

### 4.6.2. Funcionamiento sensor laser

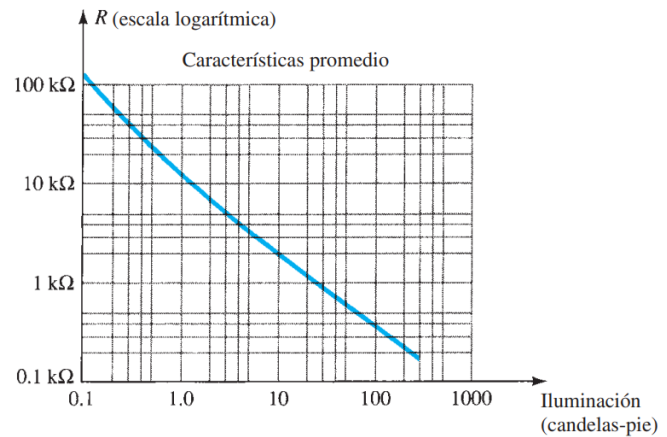
Una LDR (Light Dependent Resistor) o fotorresistencia es una resistencia que varía su valor óhmico en función de la luz que incide sobre su superficie. Cuanto mayor sea la intensidad de la luz que incide en la superficie del LDR menor será su resistencia y cuanto menos luz incida, mayor será su resistencia.

### 4.6.3. LDR como sensor

Para usar la fotorresistencia como sensor se tiene en cuenta que las lecturas variaran según la intensidad luminosa sobre su superficie, eso debido a que cuando la LDR no está expuesta a radiaciones luminosas, los electrones están firmemente unidos en los átomos que la conforman, pero cuando sobre ella inciden radiaciones luminosas, esta energía libera electrones con lo cual el material se hace más conductor, y de esta manera disminuye su resistencia. Así entonces se pueden obtener distintos datos de voltaje los cuales son la lectura del Arduino.



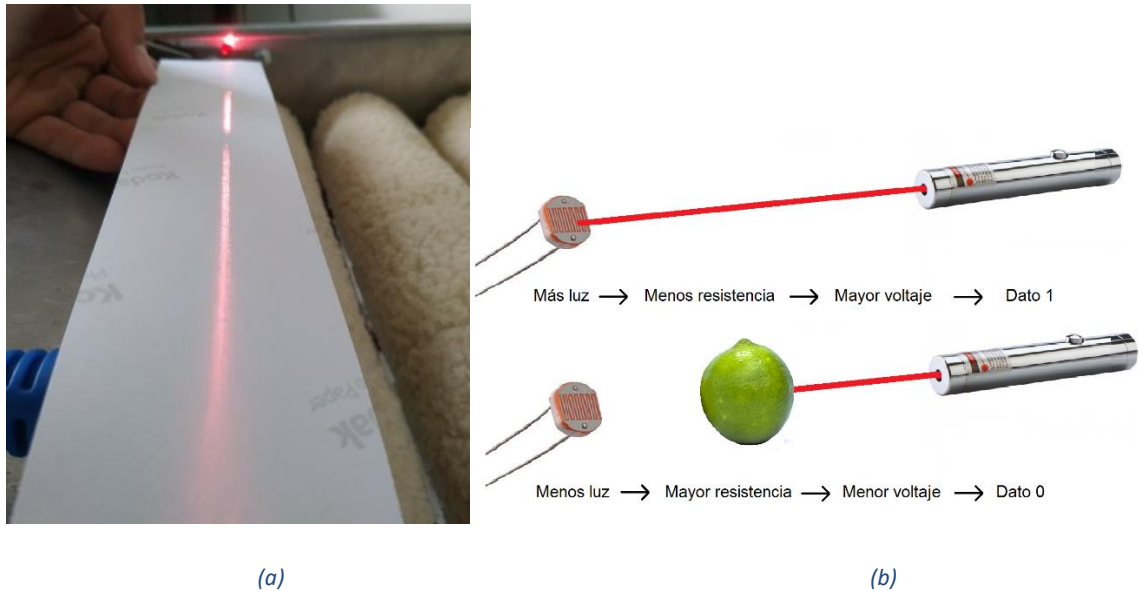
(a)



(b)

Figura 30. (a) Celda fotoconductora; (b) características terminales de una celda fotoconductora  
Fuente: (Nashelsky, 2009)

El uso de un sensor en la entrada del sistema se debe a la necesidad de saber si está entrando fruta a la máquina o no, por ello el dato que se necesita conocer es ‘sí’ o ‘no’, y dependiendo de este dato activar o no el sistema de aspersión. Por este motivo no se requiere un sensor que mida distintas distancias, simplemente adquirir el estado de la entrada a la máquina. El sensor laser brinda la facilidad de reconocer si un objeto se cruza entre el emisor y el receptor de luz, ubicados uno frente al otro a cada lado de la banda de rodillos. *Ver figura 31*



*Figura 31. (a) Sensor láser del sistema; (b) función del láser con el limón*

#### 4.6.4. Interfaz digital

Así entonces el haz de luz incide todo el tiempo sobre la fotorresistencia causando que esta disminuya su nivel óhmico, permitiendo la circulación de mayor voltaje y enviando al Arduino un dato digital de 1. Al ingresar la fruta al sistema el haz de luz es interrumpido momentáneamente; al interponer cualquier objeto entre el emisor de luz (apuntador laser) y el receptor (la fotorresistencia), automáticamente aumenta el valor óhmico de la LDR, disminuyendo el voltaje y enviando al Arduino un dato 0 (cero). Para mejorar la lectura de Arduino, se usa un pin digital, ya que en este caso el sensor puede estar únicamente en dos estados, 1 y 0. Para mejorar el flujo del código fuente se usa el pin digital 3, el cual en Arduino UNO también es usado para la detección de interrupciones.

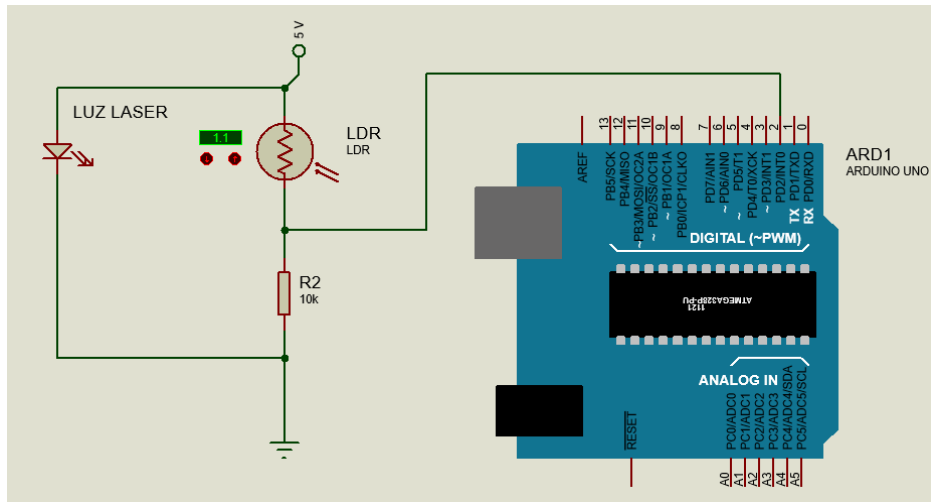


Figura 32. Diagrama conexión del láser con Arduino uno

#### 4.6.5. Algoritmo digital para control del sistema de aspersión

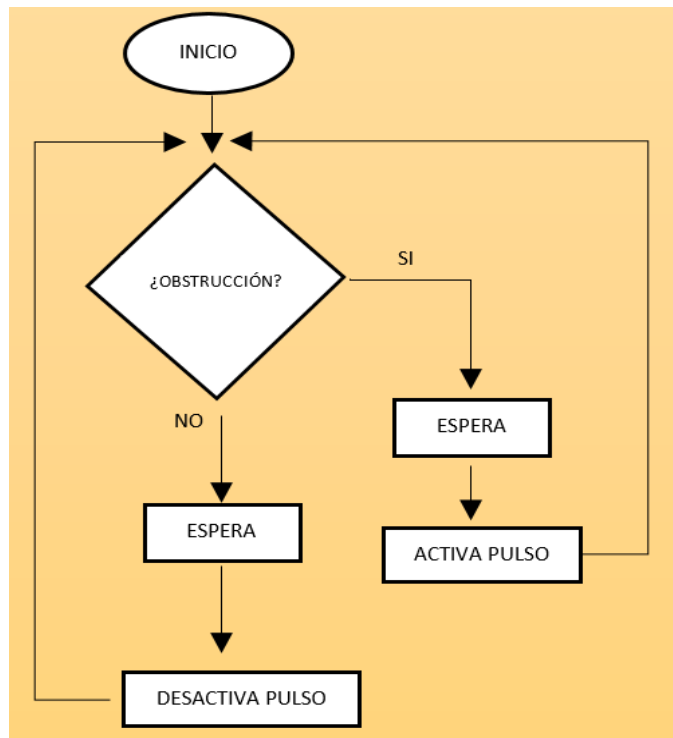


Figura 33. Algoritmo para el control del sistema de aspersión

El Arduino recibe el dato, ya sea 1 o 0 y por medio del código fuente ejecuta un proceso para activar y desactivar el sistema de aspersión. Si el primer dato recibido es 1 significa que no hay obstrucción, en ese caso los procesos siguientes se ejecutan sin cambio alguno en el

sistema. Si el dato recibido es 0, significa que hubo una obstrucción, en este caso espera un tiempo de 20 seg y envía el pulso que activará el sistema de aspersión. El sistema no se activa inmediatamente debido a que el limón debe tardar unos segundos rodando sobre los rodillos para quedar lo suficientemente limpio y llegar a la etapa de encerado, esto con el fin de evitar consumo innecesario de energía eléctrica, evitar desgaste por uso continuo en los componentes del sistema de aspersión (motobomba, electroválvula y circuitos de control) y evitar el desperdicio de la mezcla que es rociada por los aspersores ya que el ciclo de reutilización de esta sustancia no recupera el 100% del líquido que sale de las boquillas, un 10% se va cubriendo al limón, otro 15% es salpicado fuera del alcance de los componentes de recolección. Además, el hecho de reutilizar el líquido está limitado a cierto tiempo, ya que, en el ciclo de reutilización la sustancia está en contacto con el ambiente externo y con componentes que pueden agregar partículas de polvo y suciedad al líquido. Esto se contrarresta con el filtro de partículas ubicado en la salida del depósito, pero este puede dejar pasar partículas muy diminutas, ya que su función principal es evitar que se obstruya la salida en los aspersores con partículas de tamaño mayor a 0.5mm

#### **4.6.6. Hardware de control**

Se diseñan los circuitos encargados de ejecutar las órdenes del microcontrolador, teniendo en cuenta las debidas medidas de seguridad y usando los componentes más adecuados para cada tarea.

##### **4.6.6.1. Microcontrolador**

El microcontrolador en este sistema es de gran importancia ya que es el componente encargado de controlar los distintos actuadores o componentes mecánicos, que llevan a cabo las funciones más importantes de la máquina. La tarjeta de microcontrolador en este caso recibe señales de dos sensores, el de velocidad ubicada en el eje del motor, y el sensor de obstrucción de luz láser, ubicado en la entrada de la fruta al sistema. La elección del microcontrolador debe hacerse teniendo en cuenta su velocidad de procesamiento, la facilidad de programación, su integración con otros componentes y su costo en el mercado.

##### **4.6.6.2. Aislamiento de circuitos**

Una vez se detecta la obstrucción el Arduino envía un pulso digital positivo para activar los componentes eléctricos del sistema de aspersión (motobomba y electroválvula). Estos componentes están eléctricamente aislados de los componentes electrónicos por medio de optoaisladores, para evitar daños en los circuitos electrónicos de baja tensión, que puedan ser causados por sobre cargas o fugas de corrientes altas en los circuitos de voltajes más altos.

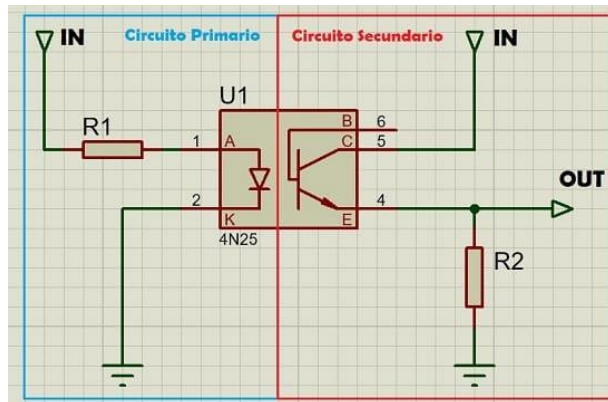


Figura 34. Conexión optoacoplador.  
Fuente: (rodríguez, s.f.)

Los optoacopladores u optoaisladores son componentes diseñados para proteger y aislar circuitos con diferentes tensiones pero que conmutan entre sí, gracias a su funcionamiento de transferencia de señales eléctricas utilizando ondas de luz.

#### 4.6.6.3. Optoaisladores como medidas de seguridad

Existen distintos tipos de optoaisladores que usan el mismo principio de funcionamiento, pero tienen usos variados. Entre ellos encontramos los **fototransistores** cuyo funcionamiento es similar al de un transistor bipolar pero, activado por señales de luz, **fotodarlington**, cuya diferencia con el anterior está en su amplificación de señal de salida, gracias a la conexión Darlington de sus transistores internos, **fototiristores**, los cuales funcionan básicamente como un tiristor activándose con un pulso eléctrico, en este caso una señal de luz, y **fototriac**, usados para conmutar circuitos electrónicos con voltajes pequeños DC y circuitos de alto voltaje AC, debido a que en lugar de un transistor se usa un triac.

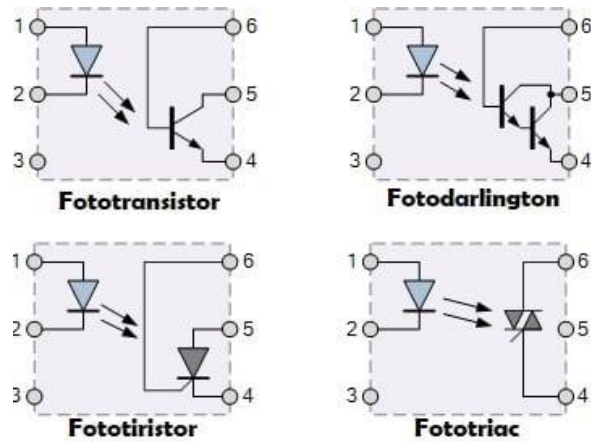


Figura 35. Tipos de optoaisladores.  
Fuente: (rodríguez, s.f.)

#### 4.6.6.4. Circuito para control de motobomba

Así entonces, usando un optoacoplador 4n25, se tiene el circuito de conexión para activar por medio del Arduino, basado en la lectura del sensor laser, la motobomba de 12v, cuya alimentación proviene de la fuente de poder externa.

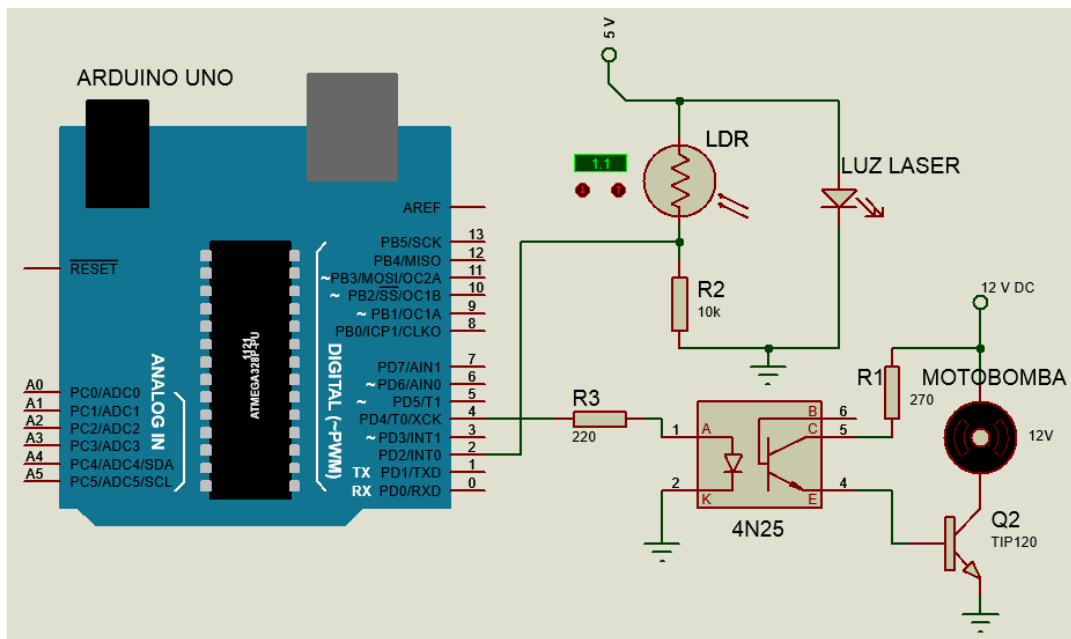


Figura 36. Circuito para el control de motobomba

#### 4.6.6.5. Circuito para control electroválvula

De igual forma se usa un optoaislador MOC3010 para activar por medio del mismo pulso de salida del arduino, la electroválvula, cuya alimentación es 120V de corriente alterna. Esta válvula está normalmente cerrada por lo que es necesario activar el triac mediante el control de paso de voltaje que se hace en el optoaislador. Ver figura 37.

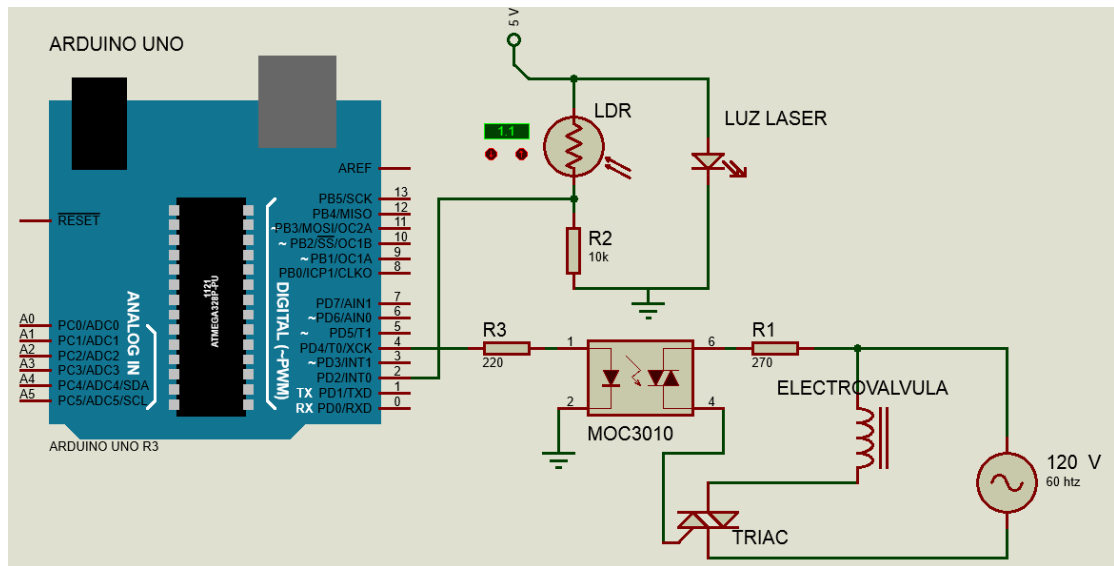


Figura 37. Circuito para control de electroválvula

#### 4.6.6.6. Circuitos para control sistema de aspersión

Teniendo el diseño del esquema eléctrico y electrónico para el encendido y apagado de la motobomba y la electroválvula, controlado por el microcontrolador y la lectura del sensor laser, se crea el esquema general electrónico para control digital del sistema de aspersión mostrado en la figura 38. Electrónico para sistema de aspersión. En el cual se observa que juntos componentes se activan al mismo tiempo debido a que el líquido no podrá empezar a circular si solo uno de ellos funciona. Cabe recordar que estos no se encienden inmediatamente a la lectura del sensor, sino que debe transcurrir tiempo posterior a la interrupción.

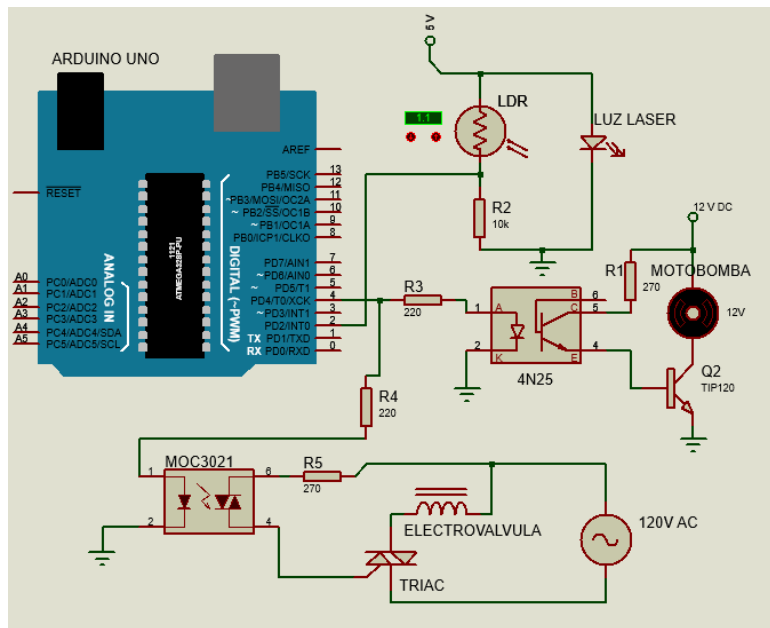


Figura 38. Circuito para control del sistema de aspersión

### Esquema general de sistema de aspersión

El esquema general del sistema de aspersión es el que se muestra en la *figura 39*. En este se observa la totalidad de los elementos implementados en este sistema. Se observan dos ciclos diferentes teniendo en cuenta que hay flujo de señales eléctricas y flujo de una sustancia líquida; este último es el que se señala con líneas de color azul y hace referencia al recorrido que hace la mezcla de agua y cera para ser asperjada sobre las frutas. El ciclo de la sustancia empieza desde el depósito en donde se debe poner una gran cantidad del líquido antes de arrancar la máquina; de allí pasa por el filtro de partículas, luego es conducido por medio de tubos hasta la electroválvula, donde debe estar abierto el paso y así llegar hasta el tubo ubicado sobre los rodillos, el cual tiene 3 boquillas que asperjan el líquido sobre los limones. Luego el líquido escurre al depósito por entre los rodillos y empieza de nuevo el ciclo. El ciclo de la señal eléctrica empieza en el sensor laser al ser obstruido por los limones, de allí la señal llega directamente al microcontrolador arduino, el cual cumple con su proceso previamente programado, y enviando así mismo la señal modificada en el tiempo al circuito de control, el cual aísla y amplifica la señal para activar la válvula y la motobomba al tiempo.



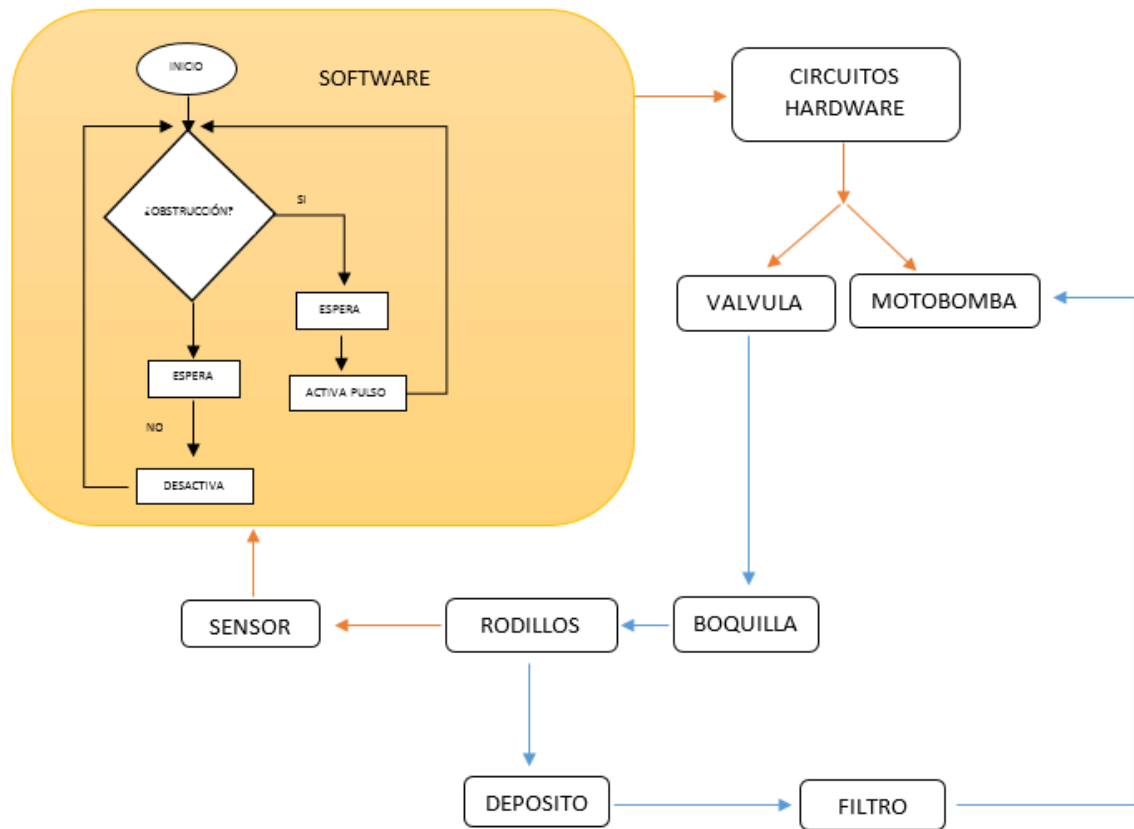


Figura 39. Algoritmo del sistema de aspersión

#### 4.6.7. Control de velocidad de los rodillos

Se tiene un sistema mecánico de rodillos interconectados con cadenas y piñones para que giren todos al tiempo y a la misma velocidad, este sistema es accionado por un motor de 24V DC con 100W de potencia suficiente para mover los rodillos aun con el máximo peso acumulado sobre ellos.

La velocidad adecuada para una limpieza completa y brillo satisfactorio se establece en el análisis de pruebas y resultados y esta debe mantenerse constante, aunque haya perturbaciones en el sistema mecánico. Los controladores son herramientas fundamentales para este tipo de tareas. Un controlador digital consta de 4 partes fundamentales, necesarias para el correcto control de una variable definida. Ver figura 40.

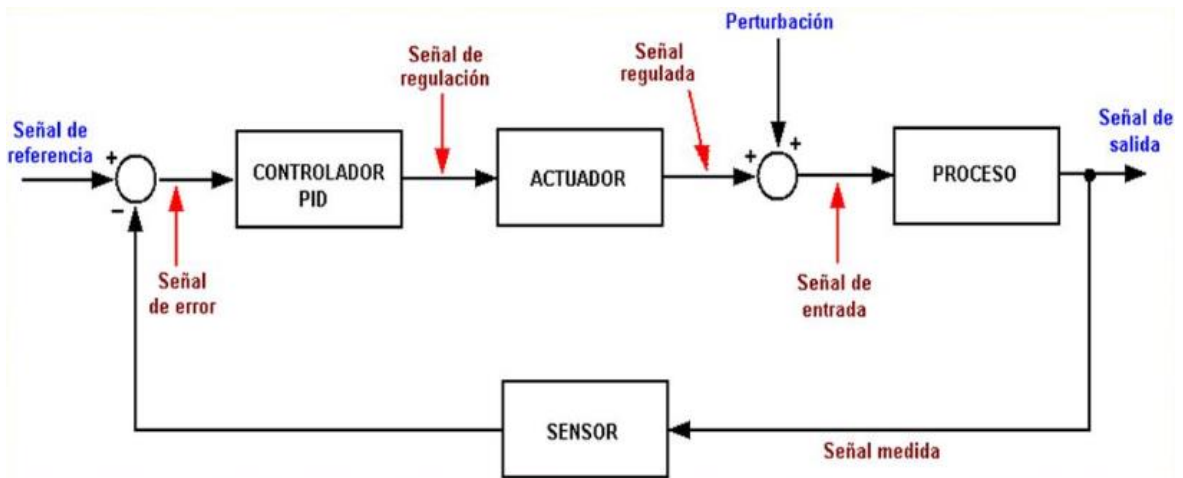


Figura 40. Controlador PID (Proporcional Integral Derivativo)  
Fuente: (Mírez, 2012)

#### 4.6.7.1. Sensor de velocidad

Teniendo el motor indicado para implementar en el sistema, lo siguiente es elegir el sensor que proporcione la medida más exacta de velocidad, para lograr un control acertado y eficiente. Para elegir el sensor más apropiado, se hace un análisis de los sensores más usados en este aspecto, teniendo en cuenta factores como rango, integración, exactitud, precisión, y costo, como se observa en la tabla 6.

Tabla 6. Características sensores de velocidad

CARACTERISTICAS SENSORES DE VELOCIDAD	
ASPECTO	VALOR
Alimentación	10
Tipo de salida (digital-analógica)	30
Señal	30
Relación	20
Costo	10

Tabla 7. Comparación sensores de velocidad

ASPECTO	Sensor efecto Hall ME-42	Sensor De Velocidad Con Encoder, Tipo Herradura Klh512	Motor DC 5V
Alimentación	10	10	10
Tipo de salida (digital-analógica)	30	30	5
Señal	20	20	20
Relación	20	8	8
Costo	8	4	10
<b>Total</b>	<b>88</b>	<b>72</b>	<b>53</b>

#### 4.6.7.2. Sensor Encoder de efecto Hall

El sensor de efecto hall entrega lecturas de pulsos según la cantidad de polos que tenga el encoder, en este caso se tiene una cantidad de 12 pulsos por revolución o por vuelta. Así entonces la lectura que se obtiene es la que se muestra en la figura 41 viéndose 6 pulsos positivos que corresponden a media vuelta del eje del motor.

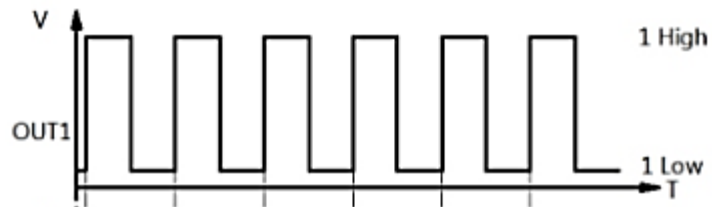


Figura 41. Lectura de pulsos en el eje del motor  
Fuente: (Infootec, 2000)

#### 4.6.7.3. Medición de velocidad.

La lectura del sensor es recibida por el arduino por medio de uno de sus pines digitales. Para un funcionamiento eficaz del programa se usan los pines de interrupciones, que son mecanismos que permiten ejecutar una función específica asociada a un determinado evento. Cuando este evento ocurre el procesador sale inmediatamente del flujo normal del programa y ejecuta la función asociada. Esto le permite al procesador usar menos cantidad de memoria, mejorar la rapidez y eficacia de las lecturas y facilitar la ejecución de varias funciones a la vez.

Teniendo en cuenta que la lectura es un tren de pulsos, cada pulso representa una interrupción, así entonces se programa que el procesador para cuente la cantidad de interrupciones en un lapso de tiempo y así mismo por medios de cálculos conocer la cantidad de vueltas que da un motor en el mismo lapso de tiempo.

#### 4.6.7.4. Conversión a RPM

El procesador contará la cantidad de pulsos que haya cada 0.1 segundos, este valor es multiplicado por 600, dado que es el número de veces que cabe ese conteo en 1 minuto, y luego es dividido por el número de pulsos que equivalen a una vuelta. Así se obtiene la cantidad de vueltas que alcanza el eje del motor en 1 minuto, expresado como revoluciones por minuto.

$$rpm = \frac{Cp * \frac{P}{Pl}}{Np} \quad \text{ec.1}$$

Donde:

$Rpm$  = Numero de vueltas en un minuto (revoluciones por minuto).

$Cp$  = cantidad de pulsos contados en un lapso de tiempo.

$P$  = Periodo de tiempo en el que se expresa la medida, en este caso un minuto.

$Pl$  = lapso de tiempo de cada muestra.

$Np$  = número de pulsos equivalentes a una vuelta.

#### 4.6.7.5. Mejora de resolución

En Arduino existe una variedad de formas para tomar en cuenta una interrupción, facilitando la toma de datos.

LOW, La interrupción se dispara cuando el pulso es LOW.

HIGH, se dispara cuando el pulso esta HIGH

CHANGE, Se dispara cuando pase de HIGH a LOW y viceversa.

RISING, Dispara en el flanco de subida (Cuando pasa de LOW a HIGH).

FALLING, Dispara en el flanco de bajada (Cuando pasa de HIGH a LOW). (Vega, 2017)

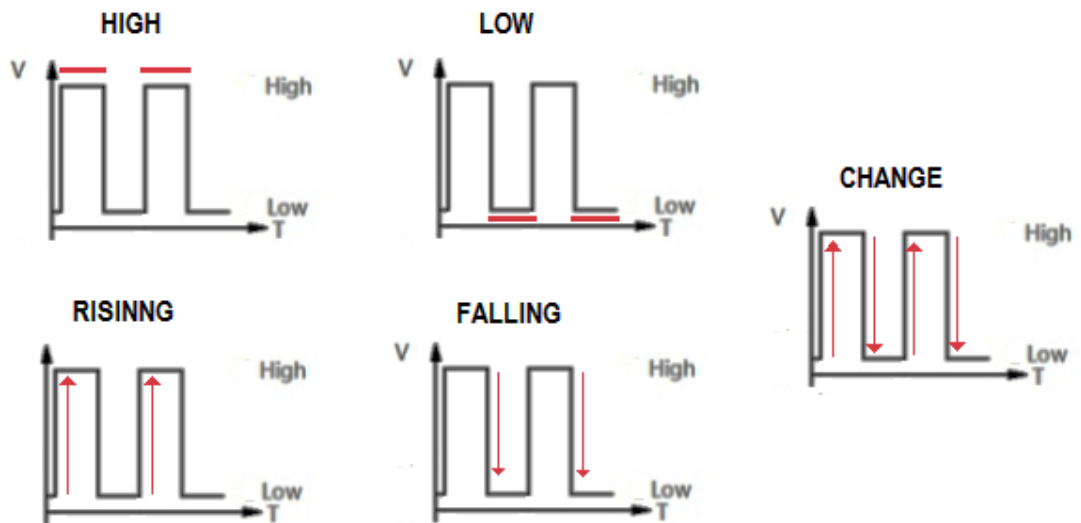


Figura 42. Tipos de interrupciones para la toma de datos  
Fuente (Illamas, 2016)

Hay interrupciones que se activan con cada pulso como HIGH, LOW, RISING, FALLING, pero hay una que se activará 2 veces cada pulso, CHANGE lo que agrega una mayor resolución a la medida de velocidad debido a que la interrupción se dispara 24 veces cada vuelta, obteniendo el doble de veces comparado con las demás interrupciones.

Así entonces la conversión de pulsos a revoluciones por minuto (rpm), usando la ec.1 queda de la misma forma, teniendo en cuenta que el número de pulsos por vuelta es ahora 24.

#### 4.6.7.6. Velocidad transmitida motor rodillos.

La lectura de velocidad se hace sobre el eje del motor para obtener una mayor precisión. Si se tiene en cuenta que la transmisión de velocidad del motor a los rodillos es de 1,8 a 1, según la ecuación, así entonces, la velocidad a la que giran los rodillos está dada por:

$$Vr = \frac{Ndm * Vm}{Ndr}$$

Donde:

$Vr$  = Velocidad en el eje de los rodillos (rpm).

$Ndm$  = Numero de dientes del piñón en el eje del motor.

$Vm$  = Velocidad en el eje del motor (rpm).

$Ndr$  = Numero de dientes de piñón receptor en los rodillos.

#### 4.6.7.7. Respuesta del sistema

La adquisición de datos para el análisis de la respuesta del sistema se hace aplicando un impulso escalón de 12V al motor. La velocidad se mide por medio del sensor y se convierte a la velocidad real de los rodillos por medio de la tarjeta de ARDUINO UNO. Los datos se toman durante un tiempo prudente de 30 segundos, obteniendo la respuesta observada en la figura 43. En ella se puede ver que la velocidad está variando constantemente entre las 1700 y 1450 RPM y se observan picos y bajones de velocidad debido a imperfecciones mecánicas del sistema.

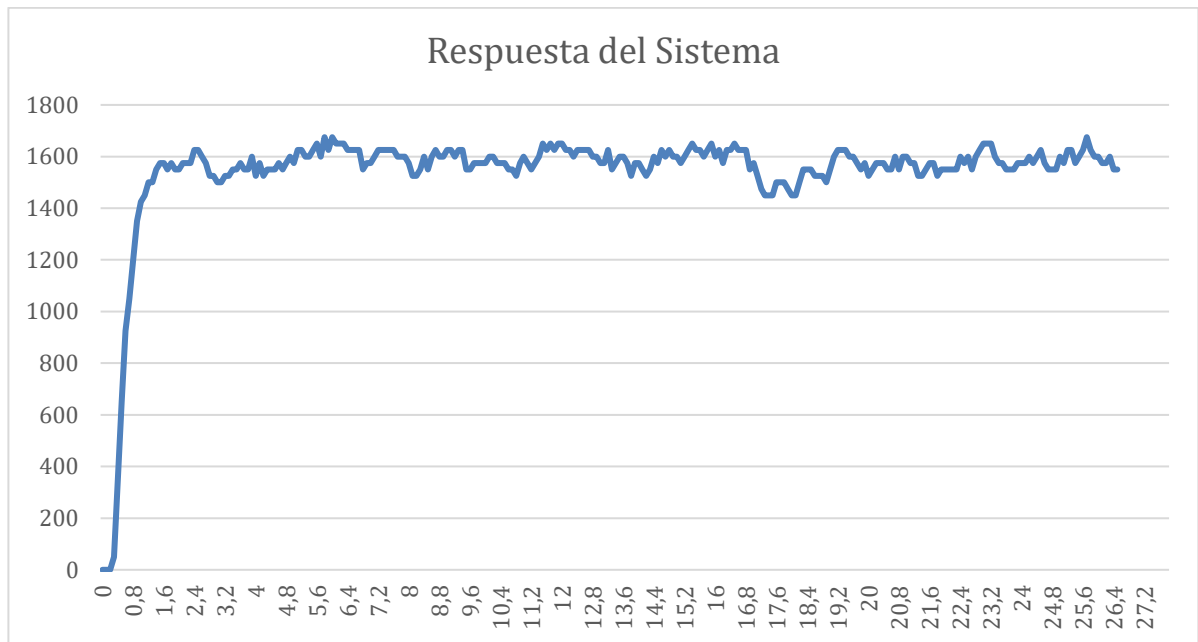


Figura 43. Respuesta del sistema

#### 4.6.7.8. Uso del software de Matlab para identificación de la función de transferencia del sistema

Obteniendo los datos de la respuesta del sistema, estos son procesados por medio de una herramienta que ofrece el software de MATLAB llamada Ident, muy útil y precisa para calcular la función de transferencia según la respuesta de del sistema.

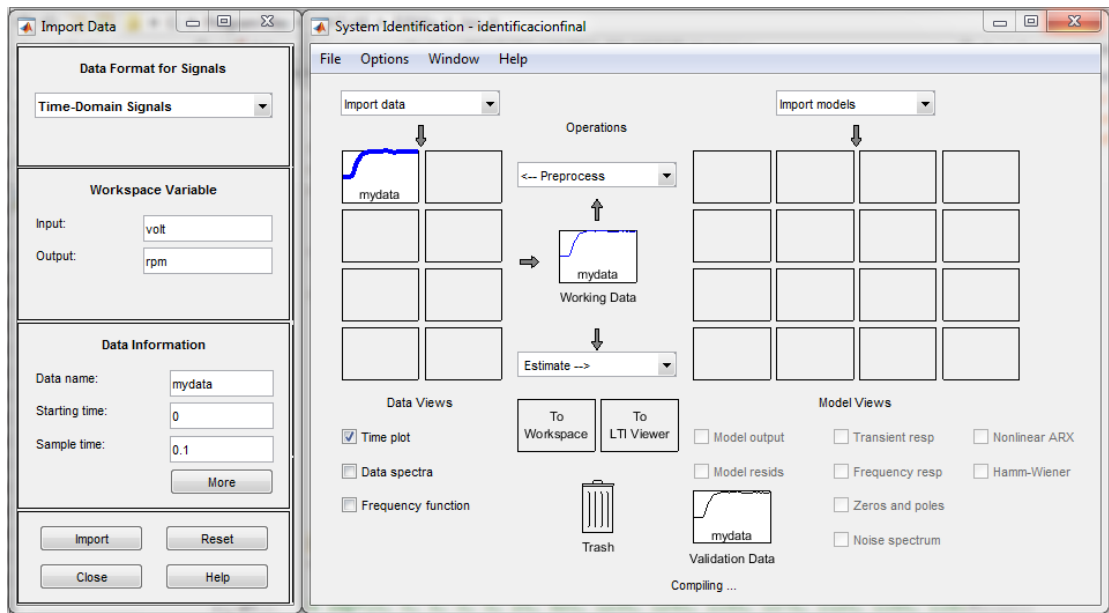


Figura 44. Respuesta transitoria del sistema

Se ingresan dos vectores previamente almacenados en el workspace de Matlab, definiendo que los datos fueron tomados en el dominio del tiempo, se especifica el tiempo de muestreo y se procede a calcular la función de transferencia

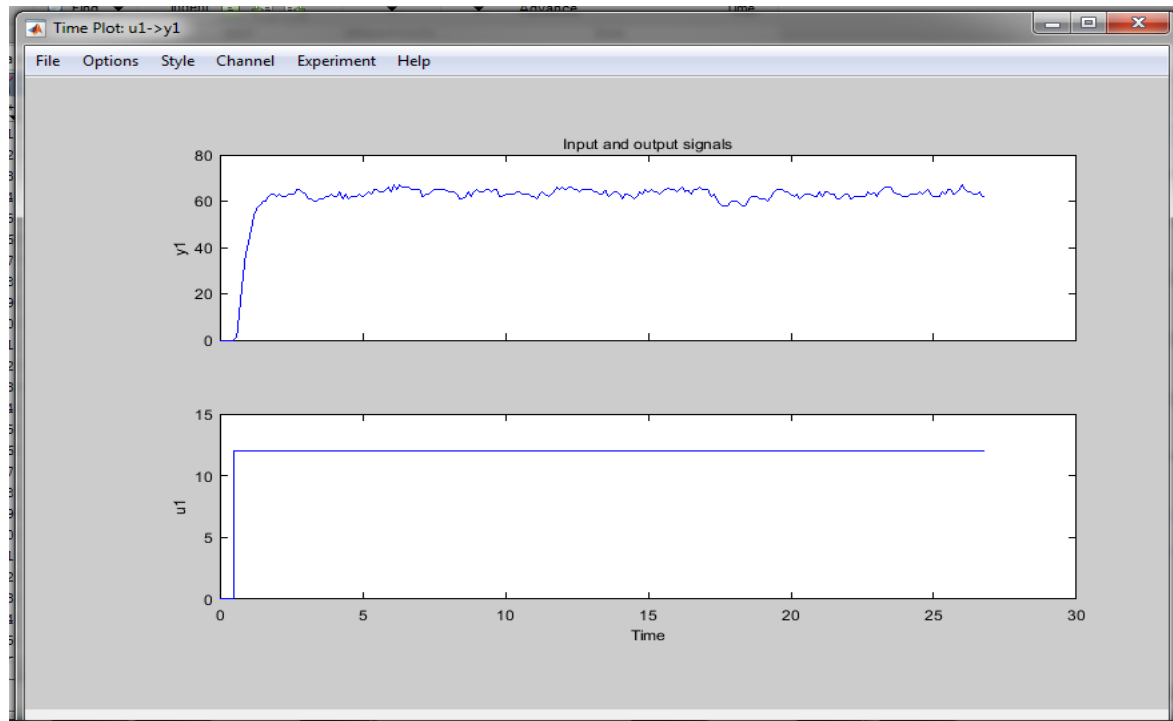


Figura 45. Grafica salida vs entrada del sistema.



Primero se obtiene una gráfica de la entrada y la salida del sistema, observando que la gráfica de salida es exactamente igual a la que obtuvo graficando directamente los datos tomados del arduino. Esto verifica que los datos fueron ingresados correctamente. Ver figura 45

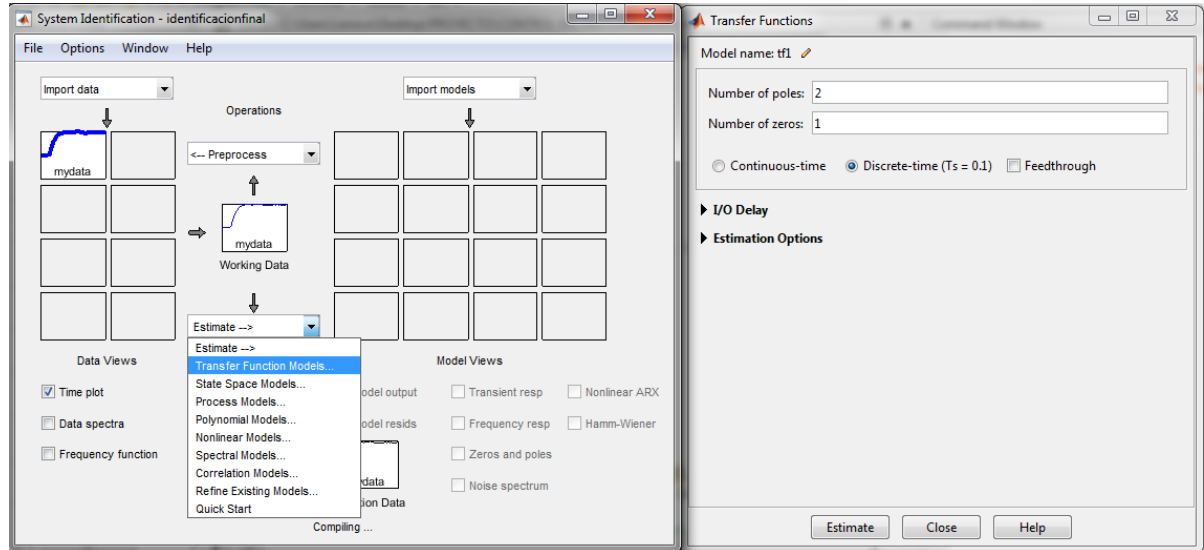


Figura 46. Proceso de cálculo de la TF.

Para el cálculo de la función de transferencia más acertada, se ingresan diferentes valores de polos y zeros deseados obteniendo un porcentaje de similitud distinto en cuanto varían los anteriores valores.

Tabla 8. Porcentaje de similitud

		Zeros			
		1	2	3	4
Polos	2	tf 1 84.45%			
	3	tf 2 84.63%	tf 10 84.74 %		
	4	tf 3 84.68%	tf 11 84.76%	tf 17 84.77%	
	5	tf 4 82.01%	tf 12 84.76%	tf 18 84.78%	tf 23 84.79%
	6	tf 5 9.589%	tf 13 84.8%	tf 19 84.8%	tf 24 84.8%
	7	tf 6 84.8%	tf 14 84.8%	tf 20 84.74%	tf 25 84.75%
	8	tf 7 85.6%	tf 15 85.6%	tf 21 85.6%	tf 26 84.8%
	9	tf 8 85.55%	tf 16 85.63%	tf 22 85.64%	tf 27 84.79%

Así entonces se crea la tabla 16, en la que se observa cada función de transferencia según su número de polos y ceros y su porcentaje de similitud con respecto a la gráfica de los datos tomados.

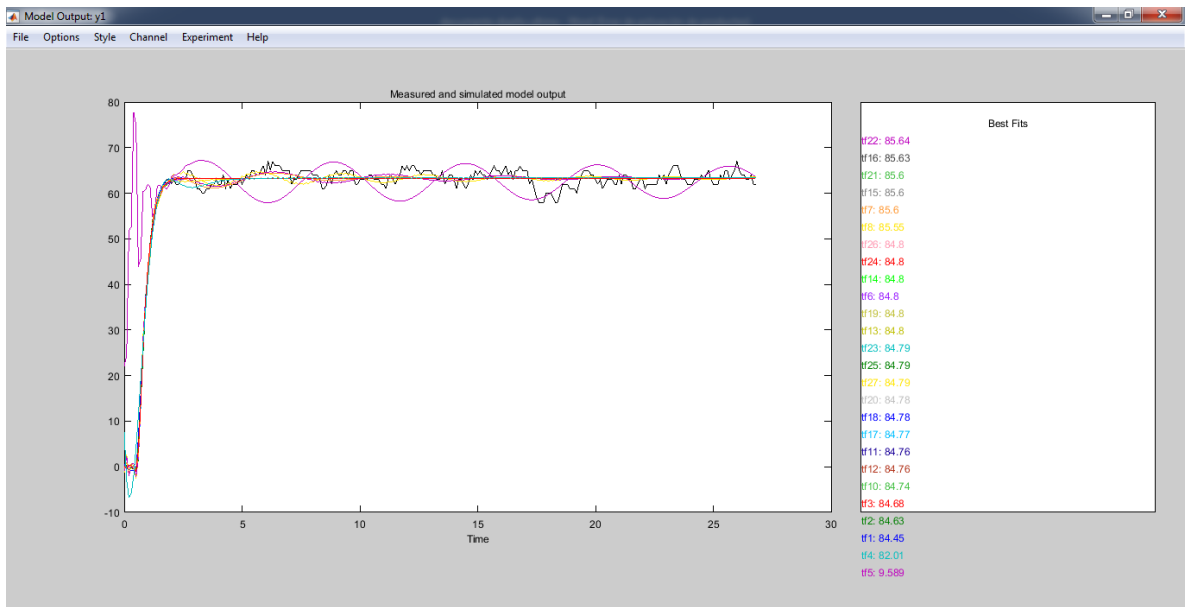


Figura 47. Gráfica comparación de similitud de las TF calculadas.

Se calcula un buen número de funciones de transferencia, las cuales se van mostrando con diferentes colores en una ventana del programa, ubicando en la parte derecha de la ventana cada función de transferencia y su porcentaje similitud con la gráfica original de mayo a menor, como se observa en la *figura 47*

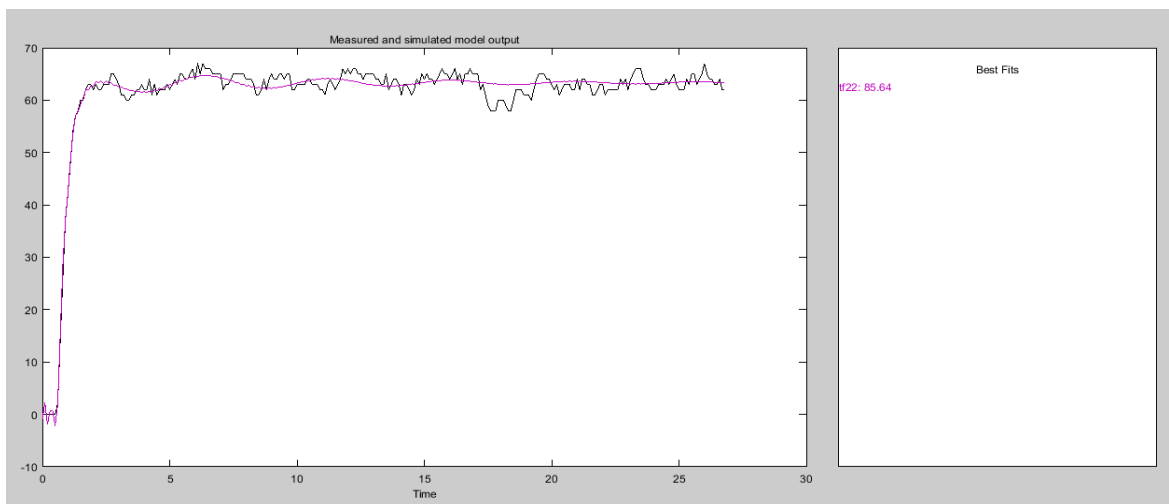


Figura 48. Función TF más acertada

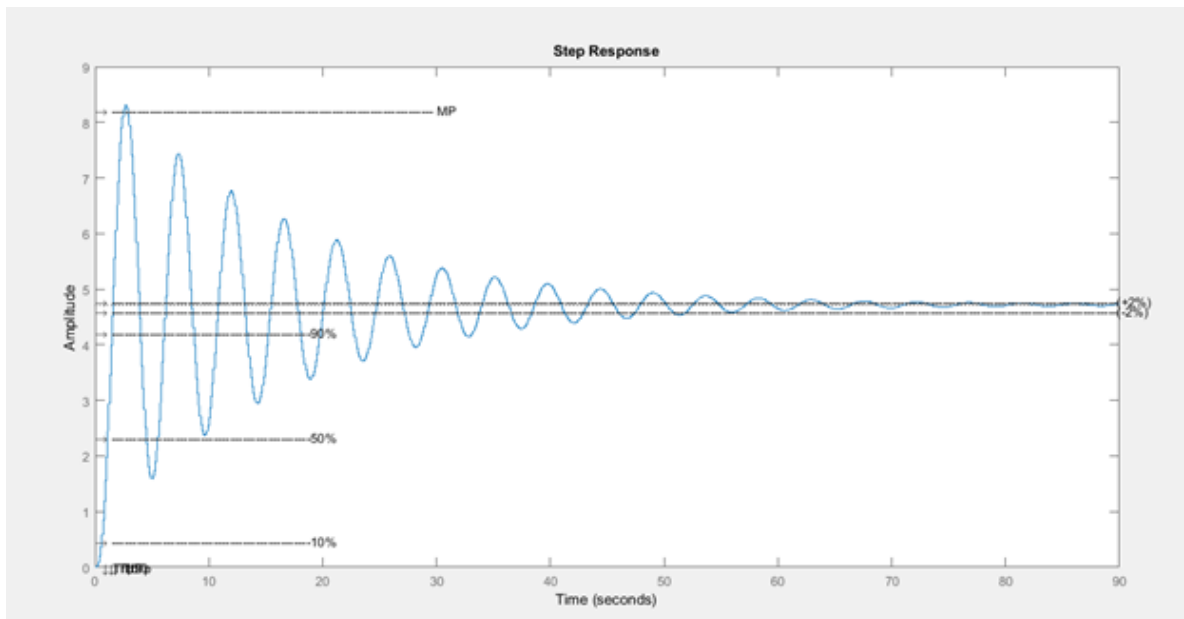
Se observa en la *figura 48*, la función de transferencia numero 22 fue la que obtuvo mayor porcentaje de similitud con la gráfica original, tomando esta como la más apropiada para trabajar en el controlador.

#### 4.6.7.9. Diseño de control de velocidad

La velocidad con la que giran los rodillos es de gran importancia ya que de esta depende la rapidez con la que se pueda limpiar una gran cantidad limón. El control digital debe lograr establecer una velocidad fija y compensar los picos o bajones causados por el peso sobre los rodillos. Para lograr esto se tiene el sensor de velocidad que envía la lectura al microcontrolador, en el cual se programa un controlador digital previa y especialmente diseñado para actuar sobre los circuitos de control y a su vez sobre el mismo motor.

#### 4.6.7.10. Uso del software de matlab para el análisis de la grafica

Se tiene un algoritmo en el software de MATLAB, el cual fue elaborado con el fin de obtener los datos del análisis de una función de transferencia para posteriormente calcular el controlador. *Ver figura 49*



*Figura 49. Análisis TF*

Los datos obtenidos mediante el algoritmo, son los que se muestran en la *figura 50*. El código se observa en el anexo B.

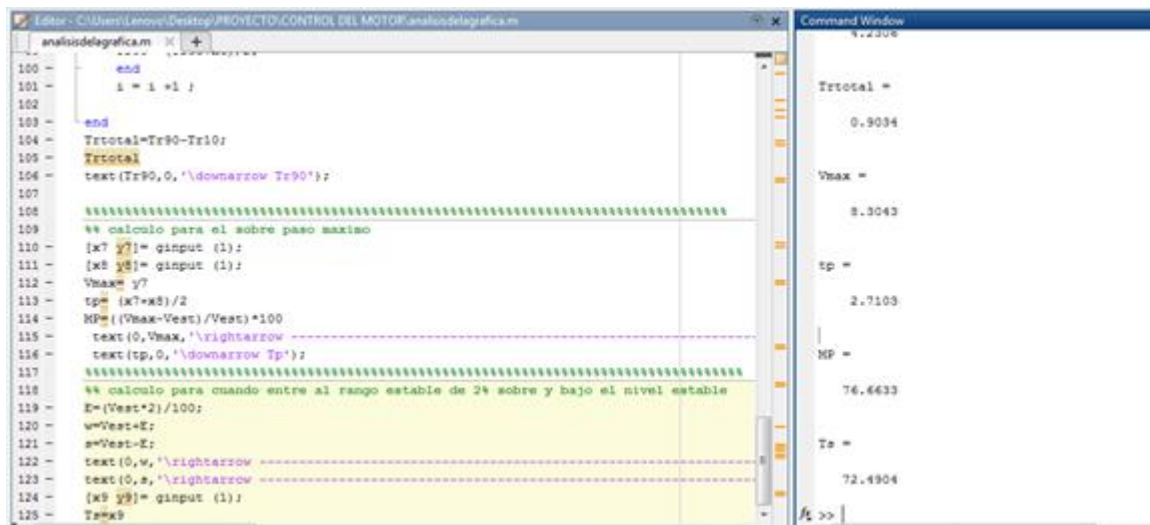


Figura 50. Datos para el controlador

Así entonces se calcula, con ayuda del software, de MatLab la ecuación del controlador para aplicar al sistema de control de velocidad. La ecuación implementada es la que se muestra en la figura 51.

$$y1[1] = 1 * y1[2] + 0.8951 * x1[1] - 0.982259 * x1[2] + 0.35816 * x1[3]$$

Figura 51. Control de velocidad

#### 4.6.7.11. implementación del control de velocidad

Se ha obtenido la ecuación de controlador que funciona correctamente en el sistema y el paso a seguir es implementar este diseño de controlador en el software y hardware de la máquina. Para esto se programa un algoritmo en el arduino que reciba la señal de lectura del sensor de velocidad, la convierta en un dato de revoluciones por minuto, y lo reste con un valor de referencia de velocidad en el cual se debe estabilizar el sistema y así obtener el valor del error con el cual, el controlador llevará a cabo su tarea compensando la tasa de error enviando el nuevo valor de pwm necesario para lograr la velocidad de referencia.

#### 4.6.7.12. Esquema general para el control de velocidad del motor

El esquema general del control de velocidad es el que se muestra en la figura 52, en el cual se observa claramente el ciclo de realimentación desde el sensor, pasando por el software la señal de PWM y los circuitos en la parte del hardware y su control directo con el motor.

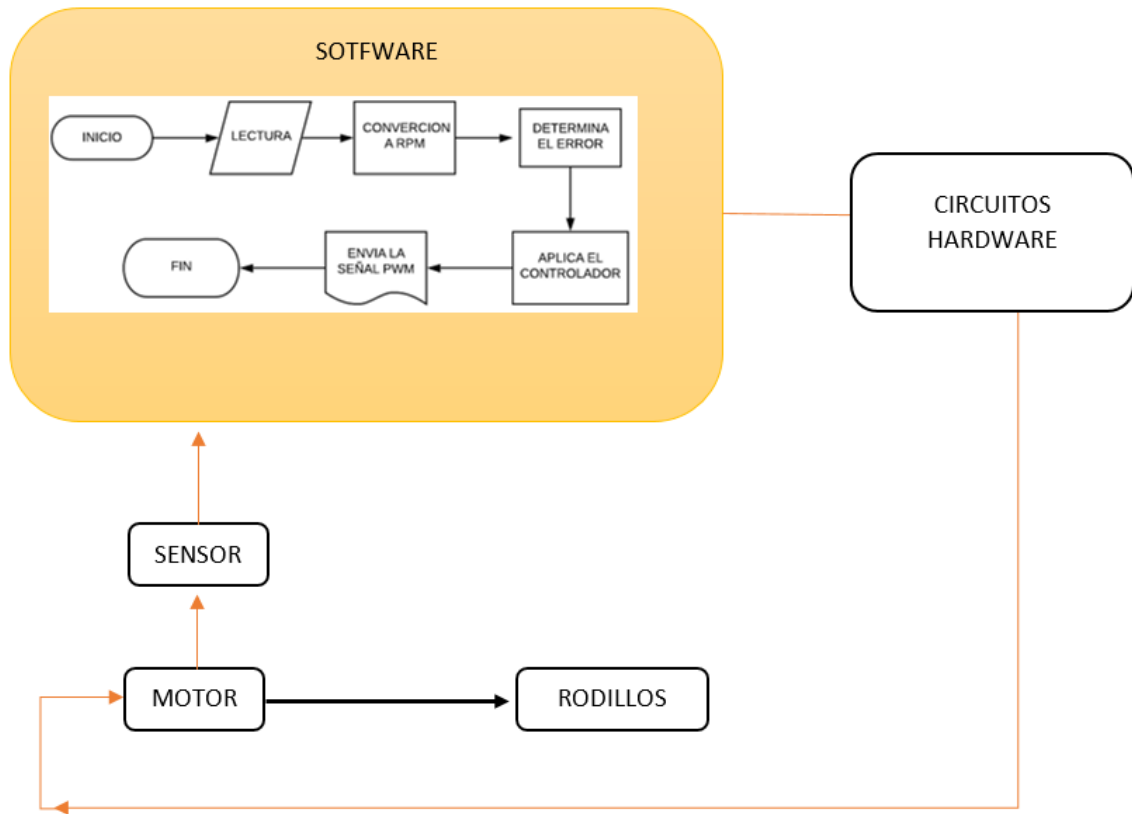


Figura 52. Algoritmo del sistema mecánico

#### 4.6.8. Hardware de control de velocidad

Luego de programar el controlador en la tarjeta de ARDUINO UNO, se diseña un circuito para llevar el pulso del pwm directamente al control de voltaje sobre el motor. Aquí se tiene en cuenta que el motor consume alta corriente por lo que es conveniente aislar eléctricamente el circuito de control y el arduino. Esto se lleva a cabo por medio de optoaisladores, cuyo uso ya fue explicado e implementado en los circuitos de control del sistema de aspersión.

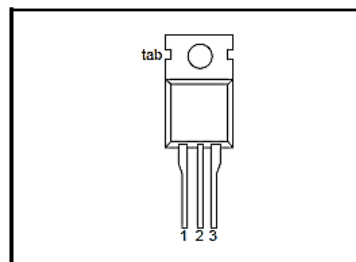
##### 4.6.8.1. Mosfet de alta potencia

Debido a la alta potencia consumida por el motor dc de 100W es necesario implementar un componente tipo transistor que cumpla con los requerimientos de voltaje corriente y potencia necesarios para el control de velocidad. Las características del motor son, voltaje de 24V corriente hasta de 12 amperios, y potencia de 100W. Por lo tanto, se usa un MOSFET IRFZ44N, que es un transistor de tecnología MOS-FET (Metal–Oxide–Semiconductor –

Field Effect Transistor) y de alta potencia que posee destacadas características que lo hacen ideal para aplicaciones de conmutación y en la modulación por ancho de pulso (PWM).

SYMBOL	PARAMETER	MAX.	UNIT
$V_{DS}$	Drain-source voltage	55	V
$I_D$	Drain current (DC)	49	A
$P_{tot}$	Total power dissipation	110	W
$T_j$	Junction temperature	175	$^{\circ}\text{C}$
$R_{DS(ON)}$	Drain-source on-state resistance $V_{GS} = 10\text{ V}$	22	$\text{m}\Omega$

**PIN CONFIGURATION**



**SYMBOL**

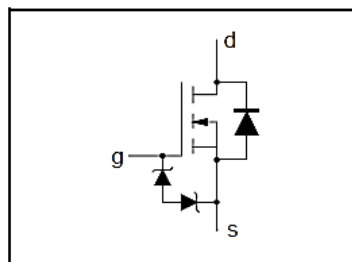


Figura 53. Configuración, símbolo y parámetros de MOSFET  
Fuente: (Semiconductors, 2015)

Se hace una verificación del tiempo de conmutación de un MOSFET IRFZ44N en comparación con la frecuencia con la que trabaja el PWM de un ARDUINO UNO y se encuentra que la frecuencia máxima de conmutación de un MOSFET IRFZ44N es de 1MHz mientras que la frecuencia del PWM de un ARDUINO UNO es de 500Hz, así entonces se comprueba que el MOSFET trabaja cómodamente en ese aspecto.

Se mide la corriente máxima del motor, abriendo el circuito y frenando completamente el eje del motor para verificar que el MOSFET seleccionado tolere el valor máximo de corriente exigida por el motor. Así entonces se tiene que la corriente máxima del motor es de 12 amperios y el MOSFET IRFZ44N trabaja hasta los 49 amperios, lo cual indica que el MOSFET trabaja cómodamente.

#### 4.6.8.2. Diagrama de conexión, circuito de control de velocidad

Como se muestra en la figura 54, el voltaje del motor es regulado por medio del voltaje de compuerta en el terminal gate del MOS-FET. Este voltaje a su vez está regulado por la señal de PWM a través del optoacoplador 4N25.

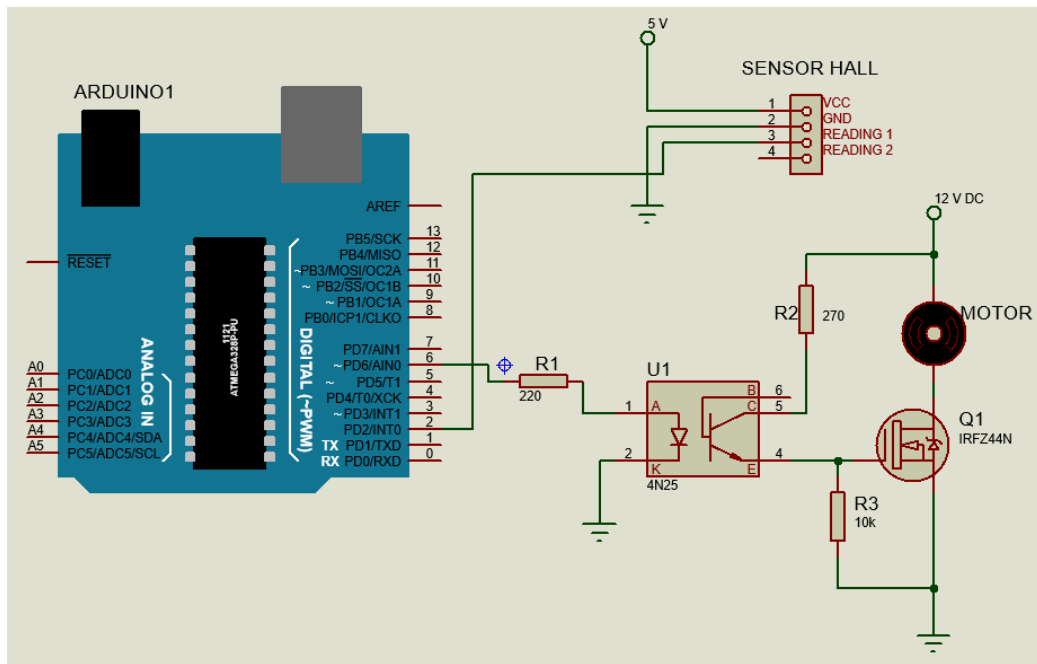


Figura 54. Diagrama de conexión del sistema

#### 4.7. INTERACCIÓN MÁQUINA HOMBRE

La comunicación entre la máquina y la persona que la estará operando es de gran importancia debido a que el operario debe conocer información básica del proceso que está llevando el sistema para obtener mejor rendimiento. Conocer si la velocidad a la que están girando los rodillos es realmente más eficiente, saber en qué momento se debe abastecer el tanque de almacenamiento de la cera, y saber con qué frecuencia se debe alimentar la tolva de entrada de limones para tener el máximo rendimiento, hará que el operario logre obtener el mayor rendimiento que ofrece el sistema. Por esta razón se implementa el uso de una pantalla LCD en la que se muestran datos del proceso en tiempo real.

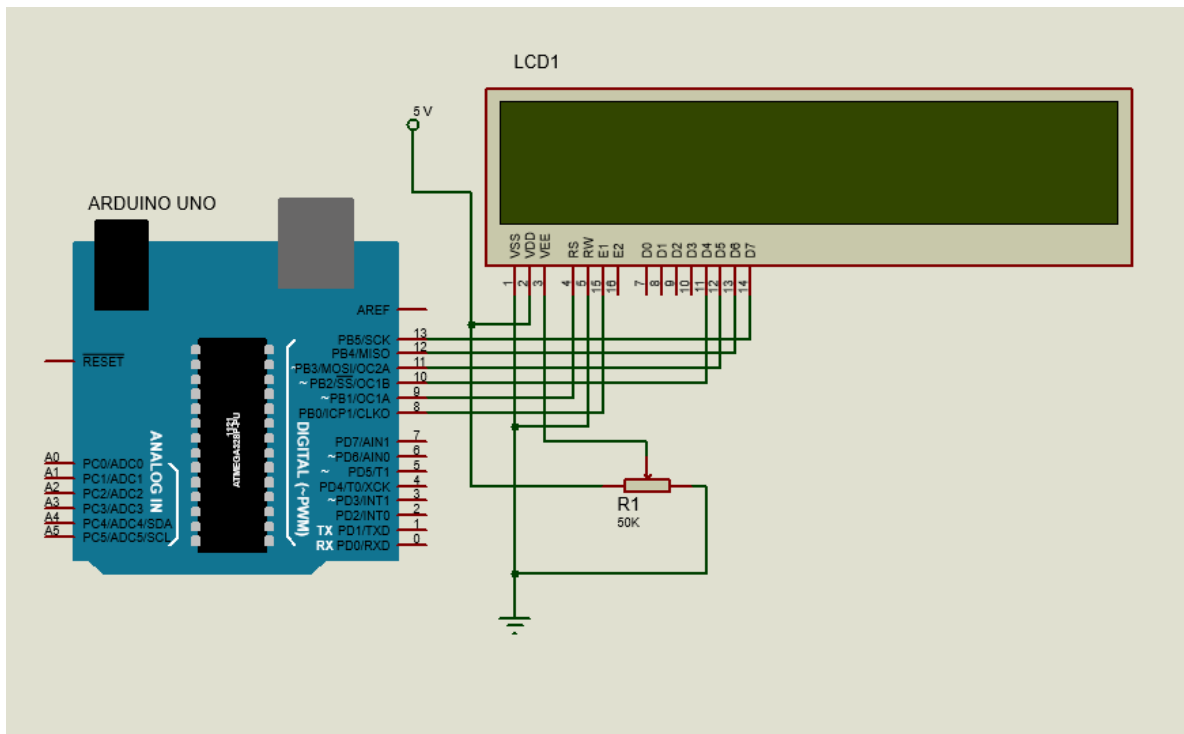


Figura 55. Conexión pantalla LCD implementada en el sistema

En la pantalla se mostrarán puntualmente los siguientes datos: velocidad de giro de los rodillos, cantidad de limón que se procesara por unidad de tiempo, tiempo de abastecimiento de cera y frecuencia con la cual se debe alimentar la tolva de entrada. Para esto se crea un algoritmo que imprima en la pantalla cada uno de los datos procesados previamente. Adicional a los datos que se podrán ver en la pantalla, se incorpora un parlante zumbador (Buzzer) para ser usado como timbre cada vez que se cumpla el tiempo de alimentación por canastilla de 20kg. El esquema es el que se muestra en *figura 56*.



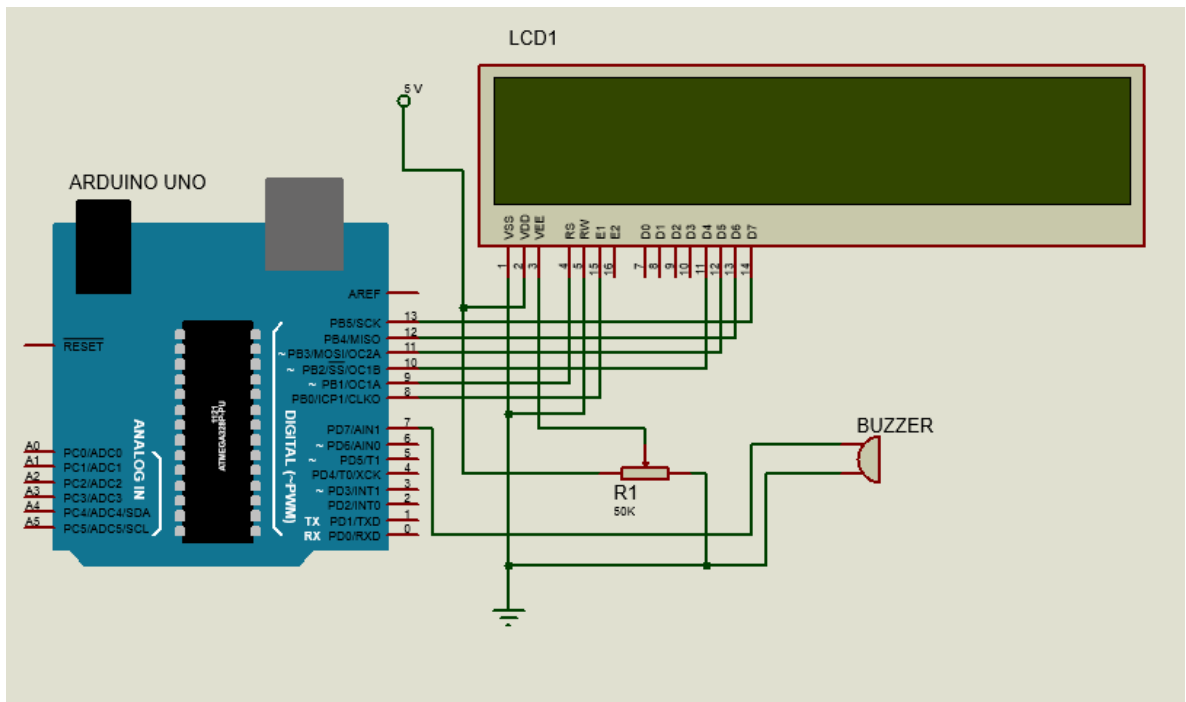


Figura 56. Conexión parlante para timbre

Así entonces el operario sabrá cada cuanto debe vaciar una canastilla de limón para alimentar la máquina y lograr un máximo rendimiento.

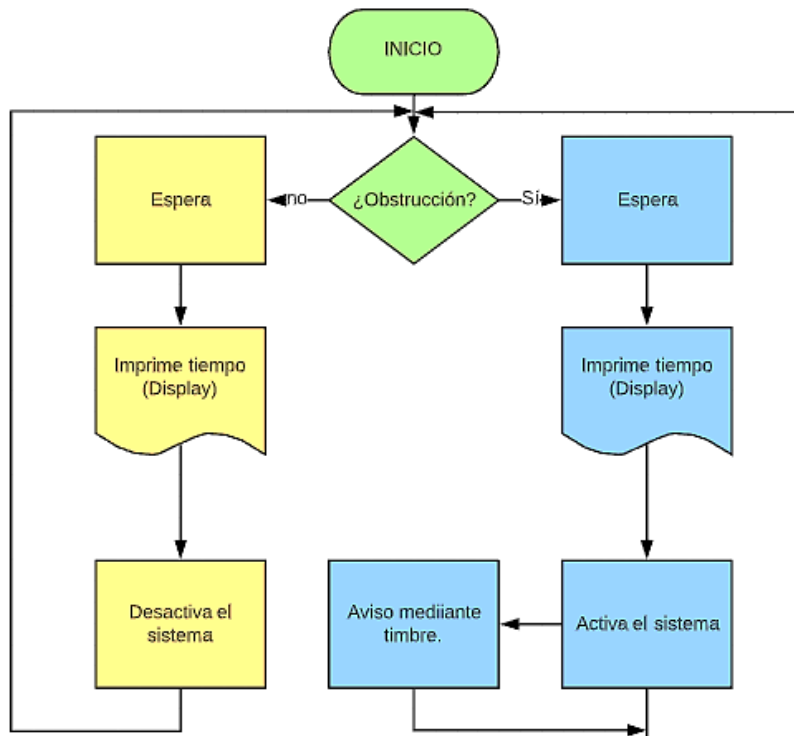


Figura 57. Algoritmo impresión datos en pantalla LCD y timbre

#### 4.8. FUENTE DE VOLTAJE PARA EL SISTEMA.

En el mercado, una fuente de poder con conexiones a 3,3V 5V 12V y 24V cuesta a rededor de \$ 150.000 a \$ 400.000, por lo que se recurre al reutilizamiento de fuentes de computador desechados. Una fuente de voltaje de corriente continua de un computador contiene conexiones para voltajes desde los 3.3, 5 12 -12 y -5 voltios y alimenta con una corriente hasta los 13 amperios.

Durante el diseño de las anteriores etapas se usa una fuente de alimentación variable de laboratorio, lo cual obligo a pensar en una fuente comercial que reemplazara la anterior con las mismas cualidades de alimentación, la cual pudiese usarse en el sistema a la hora de implementarlo.

Se hacen pruebas de funcionamiento con una fuente de computador y todos los componentes del sistema conectados y funcionando para analizar el comportamiento de la fuente, encontrando que esta sufre de apagones debido a la alta corriente que consume el motor principal y la motobomba.

Para compensar el consumo de corriente se consigue una segunda fuente de computador de las mismas características y se hace una conexión en paralelo para garantizar la estabilidad de los niveles de voltaje y sumar la capacidad de corriente de ambas fuentes. De esta forma se obtiene una fuente capaz de alimentar la totalidad de componentes del sistema que funcionan con corriente directa.

Para facilitar la conexión de los componentes con las fuentes, se adecuan puntos externos de conexión en una de las fuentes, como se observa en la figura 58 puntos de conexión.



*Figura 58. Fuentes de voltaje en paralelo*

## CAPÍTULO V

### 5. CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO.

#### 5.1. CONSTRUCCIÓN

##### **Máquinas, herramientas y equipo utilizado.**

Durante el proceso de construcción, montaje e instalación del sistema automático para limpieza y tratamiento de frutas, aplicado al cultivo de limones, se utilizaron los siguientes equipos, herramientas y accesorios:

##### **5.1.1 Estructura base**

La base metálica es en forma rectangular, es elaborado en hierro; sobre el cual se va a apoyar el sistema para garantizar firmeza y evitando movimientos bruscos al momento de la puesta en marcha.

**Medidas:** mide 59 cm de largo x 50 cm de alto y 47 cm de ancho

##### **5.1.2. Base de motor y sistema de riego**

Es una lámina metálica sobre la cual irán puestos y ajustados el motor DC y el sistema de riego, esto para evitar movimientos bruscos a la hora de encender el motor. La lámina estará atornillada a lo ancho de la base metálica.

**Medidas:** 60 cm x 10 cm.

##### **5.1.3. Láminas laterales (dos)**

Son parte de la estructura del sistema como tal, están hechas en acero inoxidable, cada lámina lateral lleva ocho orificios donde estarán puestos los rodamientos o chumaceras en las que a su vez irán sujetos los ejes de cada uno de los rodillos de felpa.

**Medidas:** 70 cm de largo x 12 cm de altura.



*Figura 59. Láminas en acero, estructura del sistema*

#### **5.1.4. Lámina frontal**

Esta parte de la estructura es una lámina elaborada en acero inoxidable que va atornillada por la parte interna y uniendo las dos láminas laterales nombradas anteriormente.

**Medidas:** 31 cm de ancho x 6 cm de alto

#### **5.1.5. Lámina (tolva entrada)**

Lámina en acero inoxidable que hace la función de tolva para la entrada del limón, está ubicado de tal forma que la fruta rueda hacia los rodillos de felpa.

**Medidas:** 32 cm x 23 cm x 5 cm

#### **5.1.6. Lámina (tolva salida)**

Lámina en acero inoxidable que hace la función de tolva para la salida del limón, está ubicado de tal forma que la fruta rueda hacia las canastillas de recolección (donde termina el proceso).

### **5.2. ACCESORIOS MECÁNICOS**

#### **5.2.1 Piñón de 2" y 25 dientes**

Son 8 piñones de acuerdo a la cantidad de rodillos que se usaron, hacen parte de la estructura mecánica del sistema, están sujetos a los ejes que van dentro de cada uno de los rodillos de felpa. Estos ejes llevan a cada extremo un rodamiento o chumacera para su adecuado giro.



*Figura 60. Piñón de 2 pulgadas implementado en los ejes de los rodillos*

### **5.2.2. Piñón de 1.5" y 18 dientes**

Está ubicado en el eje del motor, es el encargado de transmitir el movimiento desde el eje del motor hacia los otros piñones.



*Figura 61. Piñón de 1,5 pulgadas implementado en el eje del motor*

### **5.2.3 Piñón de 3" y 34 dientes**

Está ubicado en el primer eje o rodillo, es el encargado de ser el receptor del movimiento que proviene desde el eje del motor para así transmitirlo hacia los 7 rodillos restantes.



*Figura 62. Piñón de 3 pulgadas implementado en el eje del primer rodillo*

#### **5.2.4. Cadena de transmisión**

Son dos, la primera cadena está ubicada desde el eje del motor hacia el primer piñón que está ubicado en el primer rodillo.



*(a)*



*(b)*

*Figura 63. Cadena de transmisión implementado entre piñones de cada eje; (b) cadena de transmisión implementada entre eje del motor y primer piñón*

La segunda cadena está ubicada desde el primer eje o rodillo, hacia los otros piñones que están en los otros ejes.

### 5.2.5. Rodamientos o balineras

Se usaron 16 balineras, están ubicados en los extremos de cada uno de los ejes que conforman los rodillos, es decir, 8 en el lado derecho y 8 en lado izquierdo, se encargan de permitir el soporte para la rotación del eje de cada rodillo.



*Figura 64. Rodamiento o balinera usado a los extremos de los ejes*

### 5.2.6. Acoples para los rodamientos

Son 16, su función principal es apoyar y sostener las chumaceras o rodamientos sobre la pared de las láminas laterales de la estructura del sistema.

### 5.3. EJES

Son 8 varillas roscadas con su respectiva chumacera o rodamiento; hacen la función de ejes que pasan por el medio de cada uno de los rodillos de felpa. Están puestos dentro de los orificios que están en la mitad de las láminas laterales.



*Figura 65. Varilla roscada, usada como eje en cada uno de los rodillos de felpa*

### 5.4 TAPÓN

Son 16 tapones, están ubicados a cada uno de los extremos de los rodillos y su función es hacer presión para sujetar los ejes roscados y así garantizar la rotación de los rodillos.





*Figura 66. Tapón usado en los extremos de cada rodillo*

## **5.4. RODILLOS**

Los rodillos de felpa van con su correspondiente eje y sus dos tapones a cada extremo, el eje va dentro de los orificios que tienen las láminas laterales de acero y dentro de las chumaceras.



*Figura 67. Rodillo de felpa*

## **5.6. SISTEMA DE ASPERSIÓN**

### **5.6.1 Motobomba**

Está ubicada en la misma base metálica junto con el motor DC, se ajustó con abrazaderas plástica para evitar así el movimiento por la vibración, la constituyen diferentes elementos que se nombrarán a continuación.



*Figura 68. Motobomba*

### **5.6.2. Tubo PVC**

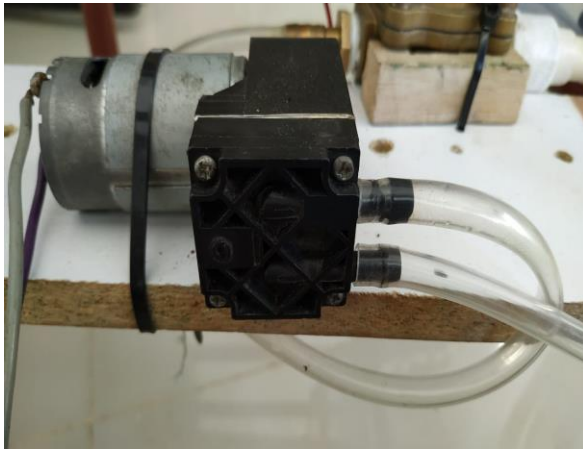
El líquido del sistema de aspersión pasará desde la motobomba hasta el tubo de PVC el cual tiene tres orificios en los que van unidos tres boquillas de abanico plano para garantizar una debida distribución del líquido hacia los limones.



*Figura 69. Tubo PVC con sus respectivas boquillas de abanico*

### **5.6.3 Manguera**

Para este proceso usamos una manguera de nivel, la cual dividimos en dos partes y la distribuimos de tal manera que una manguera alcance desde el recipiente del líquido hasta la entrada de la motobomba y la otra manguera está ubicada desde la salida de la motobomba hasta la entrada de la válvula.



(a)



(b)

*Figura 70. (a) Manguera conectada desde el recipiente del líquido hasta la entrada de la motobomba; (b) manguera conectada desde la salida de la motobomba, hasta la entrada de la válvula.*

#### **5.6.4 Adaptador**

Fue necesario instalar un adaptador que irá desde la entrada de la válvula hacia la manguera que sale de la motobomba



*Figura 71. Adaptador ubicado en la entrada de la válvula*

### 5.6.5 Válvula

Está ubicada en la misma base metálica junto con el motor DC y la motobomba, se ajustó con abrazaderas plásticas para evitar así el movimiento por la vibración. En la entrada de la válvula, va conectado el adaptador junto con la manguera que viene desde la motobomba y en la salida de la válvula se encuentra conectado el tubo de PVC



*Figura 72. Válvula implementada en el sistema*

### 5.7. Ensamblado final del sistema

Después de seleccionar cada uno de los componentes que constituyen las etapas del sistema, se procede a ensamblar pieza por pieza la estructura de la máquina. Teniendo en cuenta las medidas de seguridad con el debido uso de las herramientas necesarias para sujetar correctamente las partes del sistema. El ensamble final se muestra en las figuras 73.



*Figura 73. Ensamble final del sistema*

## CAPÍTULO VI

### 6. PRUEBAS Y RESULTADOS

#### 6.1. PLAN DE PRUEBAS

Fue necesario hacer diferentes tipos de pruebas para definir los parámetros en los cuales se alcanzará un rendimiento óptimo de la máquina.

##### 6.1.1. Funcionamiento del sistema

- a) Verificación de funcionamiento etapa de limpiado y brillado.
- b) Verificación de funcionamiento etapa encerado.
- c) Verificación de funcionamiento del sensor para activación sistema de aspersion.
- d) Comparación limones con procesado manual y procesado automático.

##### 6.1.2. Velocidad.

- a) Control de velocidad
- b) Velocidad eficiente

##### 6.1.3. Tiempos óptimos

- a) Tiempo mínimo de brillado
- b) Tiempo mínimo de encerado
- c) Cantidad de limón por hora proceso completo
- d) Tiempo de frecuencia de alimentación.

##### 6.1.4. Comparaciones de rendimiento.

- a) Comparación cantidad de limón por hora brillado
- b) Comparación cantidad de limón por hora brillado y encerado.
- c) Comparación costo por cantidad de limón.
- d) Proceso automático propio vs proceso contratado

## 6.2. PRUEBAS Y RESULTADOS

### a) Verificación de funcionamiento etapa de limpiado y brillo

El sistema es ensamblado y transportado hasta la Hacienda La Aurora en el municipio de Alvarado Tolima, donde se realizan las pruebas correspondientes al debido funcionamiento del sistema. Se inicia con una prueba básica de funcionamiento en la cual se pone en marcha el motor que mueve los rodillos y se ingresa sobre estos la máxima cantidad de limón con el fin de verificar que la potencia del sistema es suficiente para trabajar a su máxima capacidad. *Ver figura 73.*



*Figura 74. Funcionamiento del sistema a máxima capacidad*

Se analiza el estado de las frutas antes de entrar al sistema y luego de permanecer sobre este un determinado tiempo, para evidenciar el proceso de limpieza y brillo y verificar así que la máquina logra llevar a cabo este proceso satisfactoriamente. *Ver figura 74.*



*Figura 75. De izquierda a derecha: limón sin brillar; limón brillado*

**b) Verificación de funcionamiento etapa de encerado.**

Con el fin de verificar el correcto funcionamiento de la etapa de encerado, se ingresa al sistema la máxima cantidad de limón sobre los rodillos y se pone en marcha, esta vez poniendo en funcionamiento también el sistema de encerado. Se analiza el tiempo mínimo en que la mezcla de agua y cera cubre la totalidad de la superficie de cada fruta. *Ver figura 76.*





*Figura 76. Funcionamiento etapa de encerado del limón*

**c) Verificación de funcionamiento del sensor para activación del sistema de aspersión.**

El diseño de la etapa de encerado incluye un sensor de movimiento en la entrada del sistema, para detectar el ingreso de fruta y posteriormente actuar, activando los componentes del sistema de aspersión. Se hace una prueba del funcionamiento de este proceso encendiendo la máquina e ingresando limón, como normalmente se hará durante el procesamiento. Al ser detectado el limón en la entrada del sistema, el programa previamente cargado en el arduino, espera 30 segundos mientras el limón llega al sexto rodillo donde debe activarse el sistema de aspersión para rociar debidamente la tanda de limones que activo el sensor anteriormente. De esta forma se verifica que mientras el sensor es obstruido, el sistema de encerado funciona

satisfactoriamente, y luego de 50 segundos de no detectar ninguna obstrucción se desactiva el sistema de encerado automáticamente. Ver figura 77

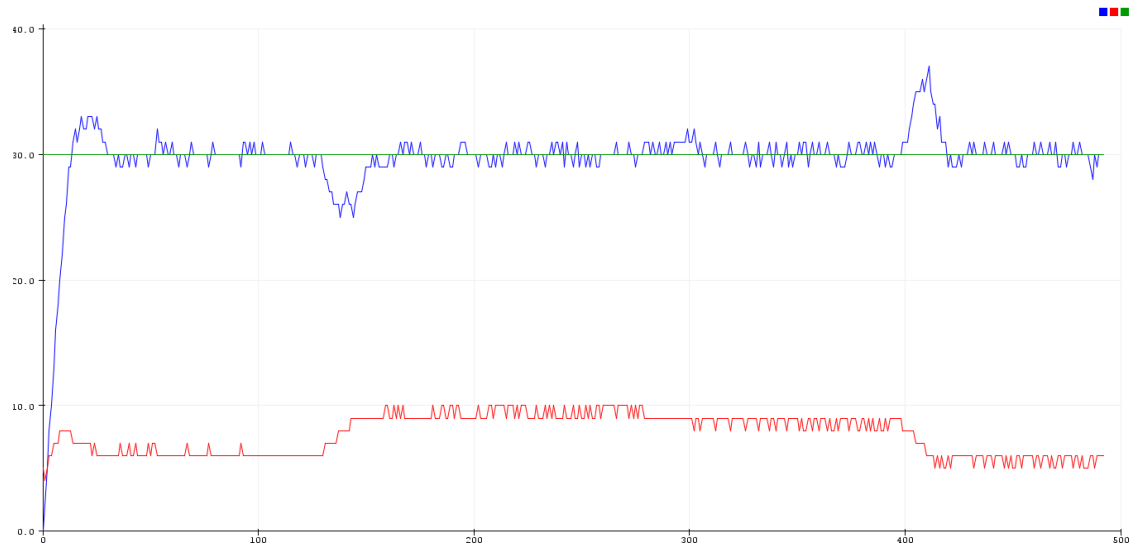


*Figura 77. Se activa el sistema de aspersión 30 segundos después de haber detectado que el limón pasa por el sensor.*

#### **d) Control de velocidad**

Se establece una velocidad de referencia de 420rpm para el controlador, con el fin de verificar su comportamiento ante las perturbaciones que pueda tener el sistema. El sistema se pone en funcionamiento y luego de 13 segundos se coloca sobre los rodillos un peso total de 4 kg equivalente a 40 limones, esta es la cantidad máxima de limones que se pueden acumular sobre el tren de rodillos. La velocidad baja en cuanto el peso es recibido y automáticamente la señal de PWM aumenta para compensar la velocidad pérdida logrando estabilizarse de nuevo en menos de 3 segundos. Se dejan pasar 20 segundos y se retira el peso observando un aumento en la velocidad, que es compensado de nuevo por la señal PWM para lograr estabilizar el sistema en un tiempo menor a 3 segundos. El comportamiento de estas señales

se observa en la *figura 78*. Donde la línea azul representa el comportamiento de la velocidad, y la línea roja el comportamiento del PWM



*Figura 78. Gráfica control de velocidad*

### e) Velocidad eficiente

Se busca determinar la velocidad más adecuada para limpiar y brillar una muestra de limones en el menor tiempo posible, así que se hace la siguiente secuencia de pruebas. Se ingresa al sistema una cantidad de 40 limones y se pone en marcha con una velocidad de 20 RPM contabilizando el tiempo que esta cantidad de limones debe estar sobre los rodillos para lograr un brillo y una limpieza uniforme sobre la totalidad de su superficie. El dueño de la producción es quien determina que el limón está totalmente limpio y con un brillo uniforme. Así entonces se toma una nueva muestra de limones, y se hace la misma prueba con una velocidad mayor, obteniendo reducción de tiempo de limpieza y brillado. Se observa que al aumentar la velocidad por encima de 460 RPM el tiempo empieza a aumentar de nuevo. Esto debido a que la alta velocidad provoca saltos en las frutas evitando el rose continuo con los rodillos y necesitando así mayor tiempo girando sobre estos para una limpieza y brillado uniformes.

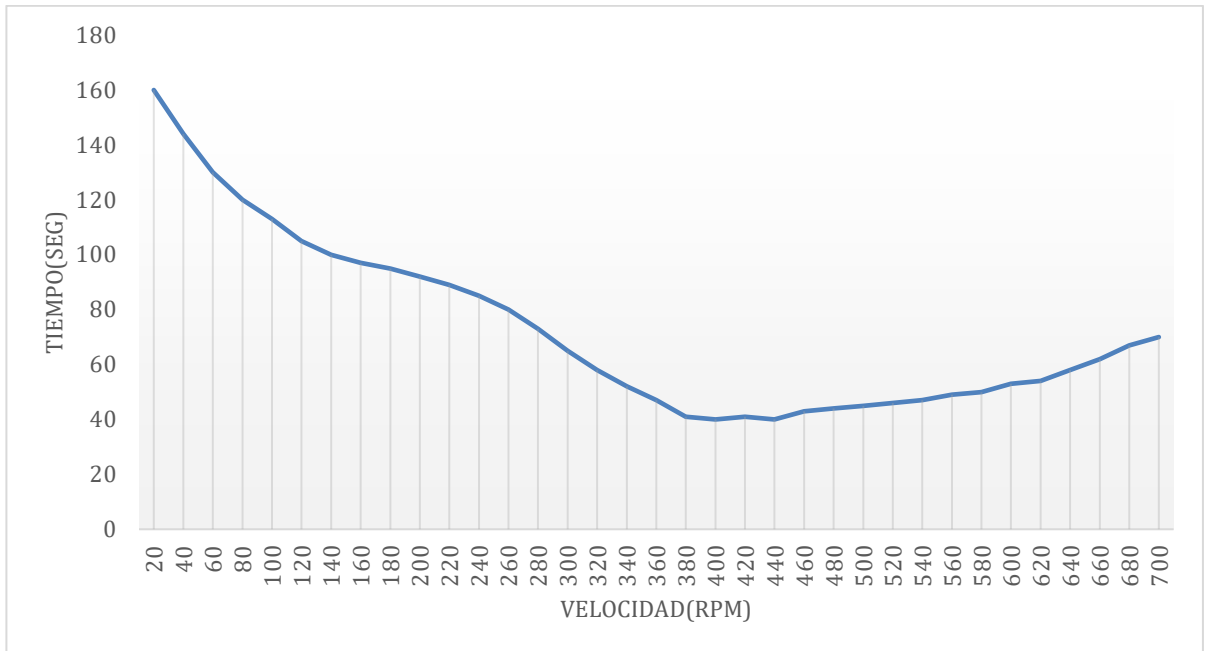


Figura 79. Gráfica velocidad eficiente

**f) Tiempo mínimo de brillado**

Con una velocidad de 400 RPM se varía el tiempo de permanencia de una muestra de limones sobre los rodillos, para establecer el mínimo tiempo en alcanzar limpieza y brillo parcial. Se observa la muestra cada 5 segundos, y se determina el porcentaje de brillado parcial que tiene la muestra según criterio del dueño de la producción. Para dar un porcentaje más exacto se compara cada muestra con un limón sin ningún tipo de brillado y luego con otro limón con brillo total y uniforme.



*Figura 80. Comparación limón.  
Izquierdo, antes de pasar por el sistema. Limón derecho; después de pasar por el sistema*

Se puede observar en la *figura 80* la diferencia entre un limón sin ningún tipo de tratamiento como el que se observa en la parte izquierda y un limón con brillado total sobre toda su superficie, el cual se observa a la izquierda de la figura. En esta diferencia se basa, para definir el porcentaje de brillo de las muestras procesadas en esta prueba.

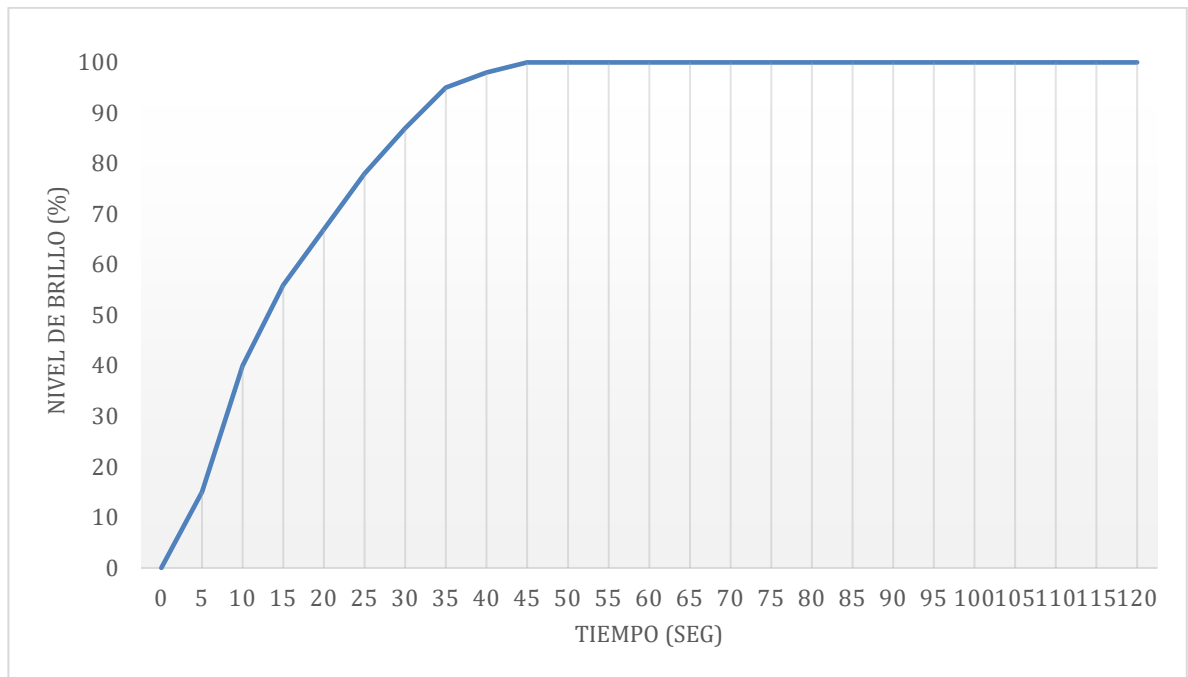


Figura 81. Gráfica tiempo mínimo de brillo

**g) Tiempo mínimo de encerado**

De igual forma se establece una velocidad de 400 RPM, y se varía el tiempo durante el cual una muestra de limones permanece bajo el sistema de aspersion activo. Así mismo cada 5 segundos se observa la muestra para determinar el porcentaje de la superficie que está cubierto parcialmente por la cera. Este proceso se realiza de forma similar a la prueba de brillo comparando la muestra con un limón sin encerar y uno encerado totalmente.

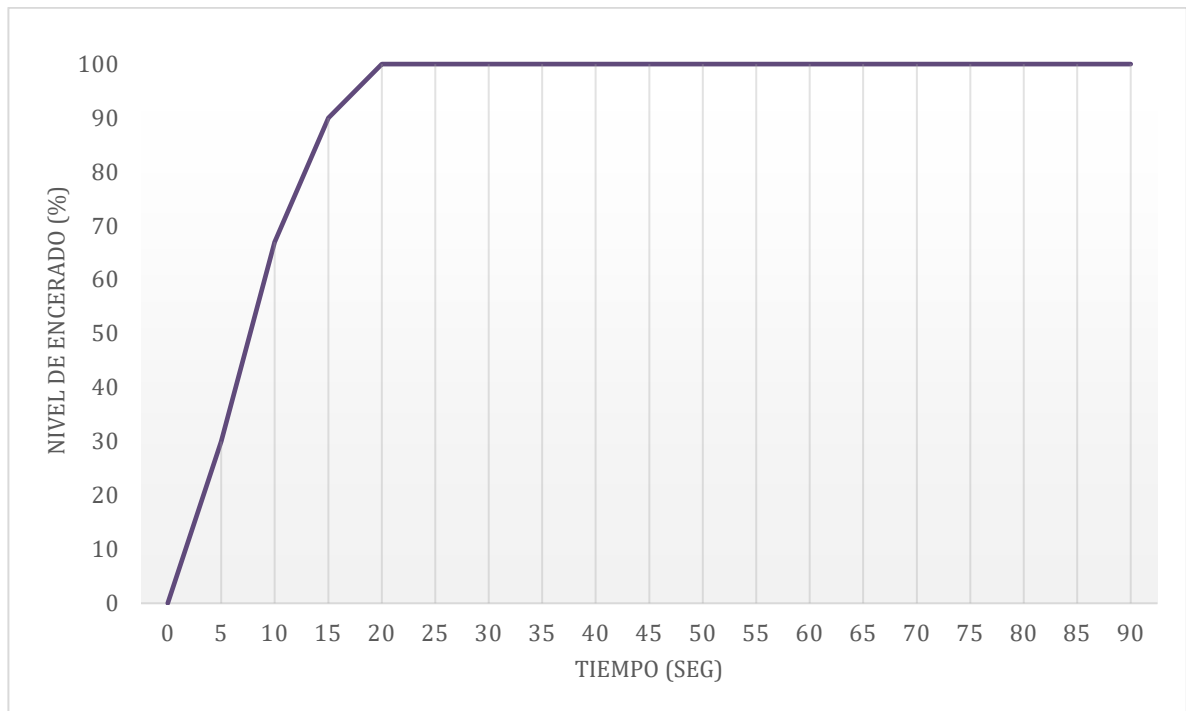


Figura 82. Gráfica tiempo mínimo de encerado

**e) Tiempo de frecuencia de alimentación.**

Con el fin de determinar el instante preciso en que se debe agregar una canastilla de limón más a la línea de procesamiento, se mide el tiempo que debe tardar una canastilla equivalente a 20 kilogramos de limón en ser procesada, obteniendo que cada 200 segundos se debe ingresar una canastilla más.

**f) Cantidad de limón por hora, proceso completo**

Esta es una prueba de rendimiento del sistema completo evaluando tanto la etapa de brillado y limpieza como la etapa de encerado. Se mide en kilogramos la cantidad de limón que se logra procesar durante una hora, variando la frecuencia con la que se alimenta la tolva de entrada. Se inicia con una frecuencia de 4kg cada 20 segundos. Así entonces se logra un rendimiento de 720 kg en una hora. Luego se aumenta 10 segundos el tiempo entre cada tanda de 4kg, observando que la cantidad de kg por hora disminuye en cada aumento de 10 segundos.

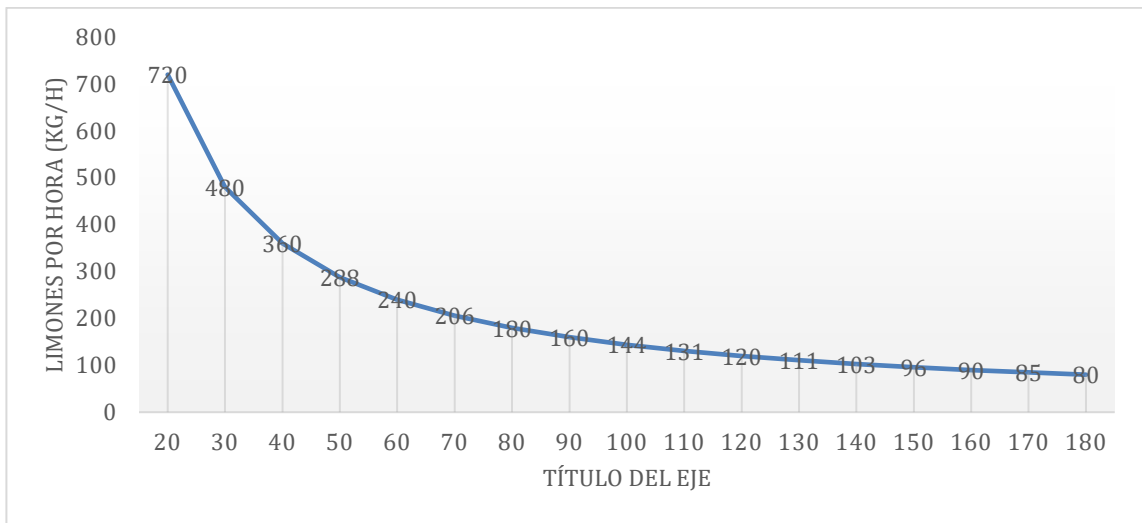


Figura 83. Gráfica; cantidad de limón por hora, proceso completo

### g) Comparación cantidad de limón por hora solo brillado

La siguiente prueba es la medida y proyección de la cantidad de limón en kilogramos que se procesará, aplicando únicamente el brillado, comparando los resultados con los obtenidos en el mismo proceso hecho manualmente. Esto con el fin de determinar el tiempo que se tardaría la máquina brillando hasta 4 toneladas, que es la máxima cantidad de limones producida actualmente en la finca. La línea azul es la proyección de la cantidad de limón procesada manualmente. Y la línea de color naranja es la proyección de la cantidad de limón procesada con el sistema.

Durante el periodo de prueba se procesaron cantidades de limón desde los 100 a los 500 kg. No hubo pruebas con más de 500 kg debido a que el limón no ha tenido un buen precio y además en durante el presente año no se han permitido las exportaciones en el país por un problema fitosanitario. Lo que ha causado alta oferta de limón y por lo tanto baja de precios.



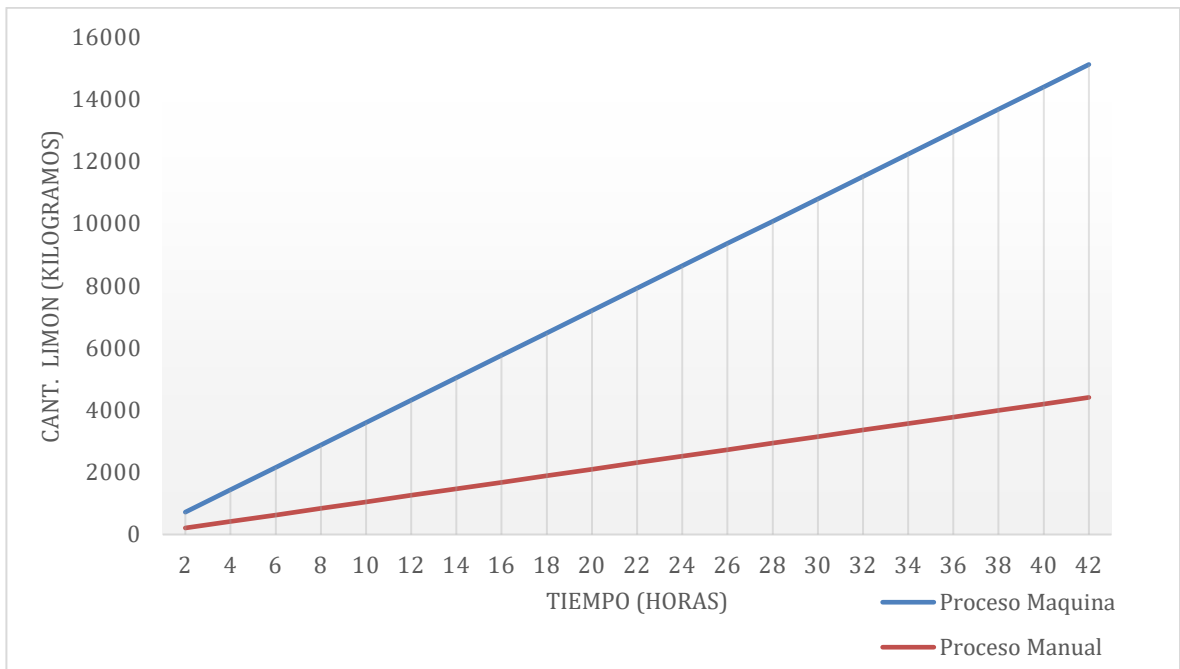


Figura 84. Gráfica, comparación; cantidad de limón por hora (solo brillado)

#### h) Comparación cantidad de limón por hora brillado y encerado.

Luego se implementa una prueba de medida y proyección de la cantidad de limón en kilogramos, que es procesada aplicando esta vez el proceso de brillado y el proceso de encerado a la vez. Los resultados son comparados con los obtenidos llevando a cabo ambos procesos manualmente. La línea azul representa la cantidad de limón procesado manualmente y la línea naranja representa la cantidad de limón procesada con el sistema automático.

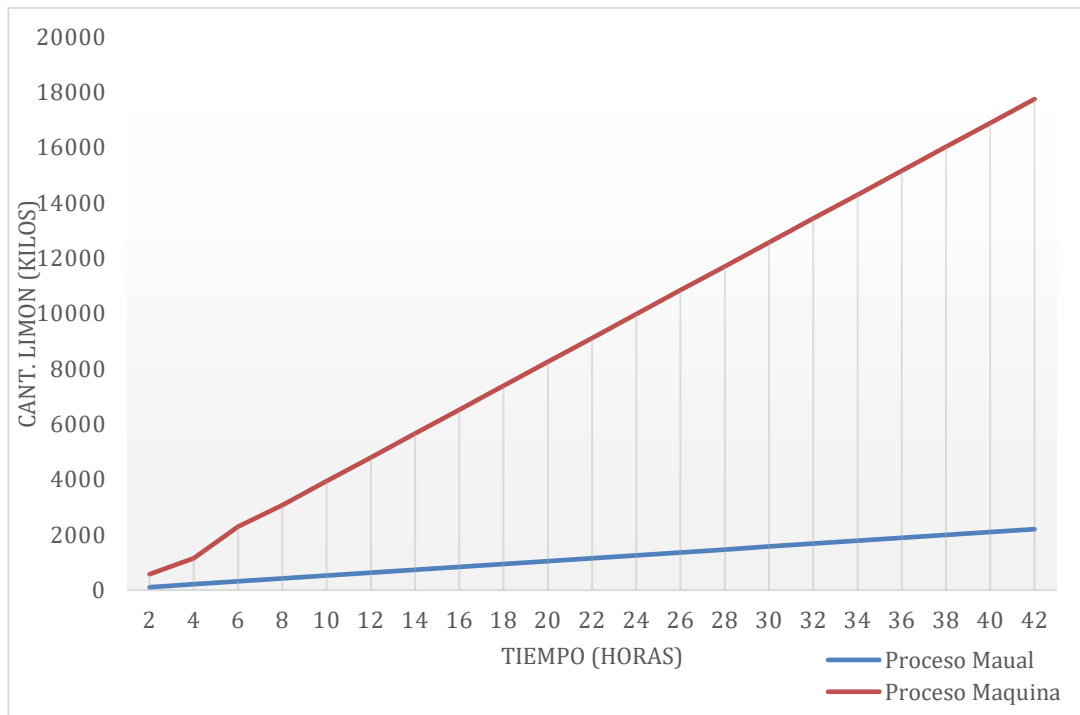


Figura 85. Gráfica comparación cantidad de limón por hora. Brillado y encerado

**i) Comparación costo por cantidad de limón.**

La prueba de costo de operación se hace teniendo en cuenta el número de operarios necesarios para el proceso manual y el proceso con el sistema procesando distintas cantidades de limón. La línea azul representa el costo de mano de obra que debe pagar el dueño de la producción con 3 obreros por hora limpiando brillando y encerando el limón. La línea naranja representa el costo de operación del sistema llevando a cabo el proceso completo de brillado y encerado teniendo en cuenta dos obreros y consumo de energía eléctrica por hora, más el costo de la cantidad de agua y cera utilizadas por cantidad de limón procesado.

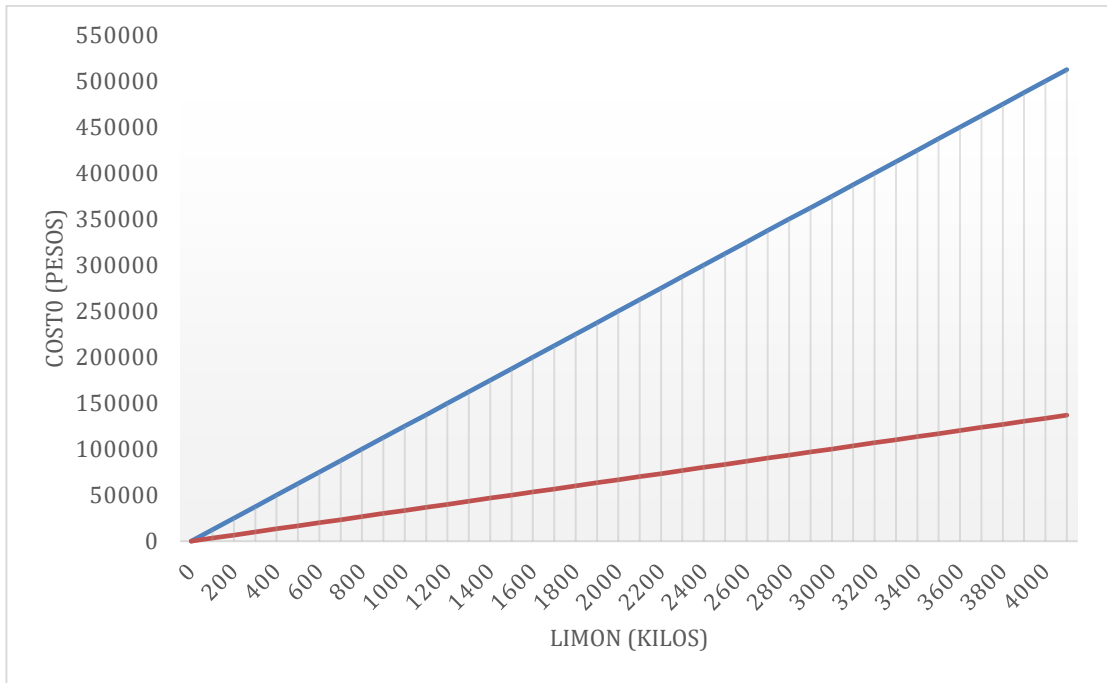


Figura 86. Gráfica costo por cantidad de limón

#### j) Proceso automático propio vs proceso contratado

La prueba de comparación de costos de operación del sistema propio con un proceso contratado se hace para proyectar la diferencia de costo que implica procesar grandes cantidades de limón en un sistema propio y el costo de usar un sistema alquilado para llevar a cabo el mismo proceso. Aquí se tiene en cuenta que el costo de alquiler de un sistema automático para procesamiento de limón es de \$650.000 por tonelada.

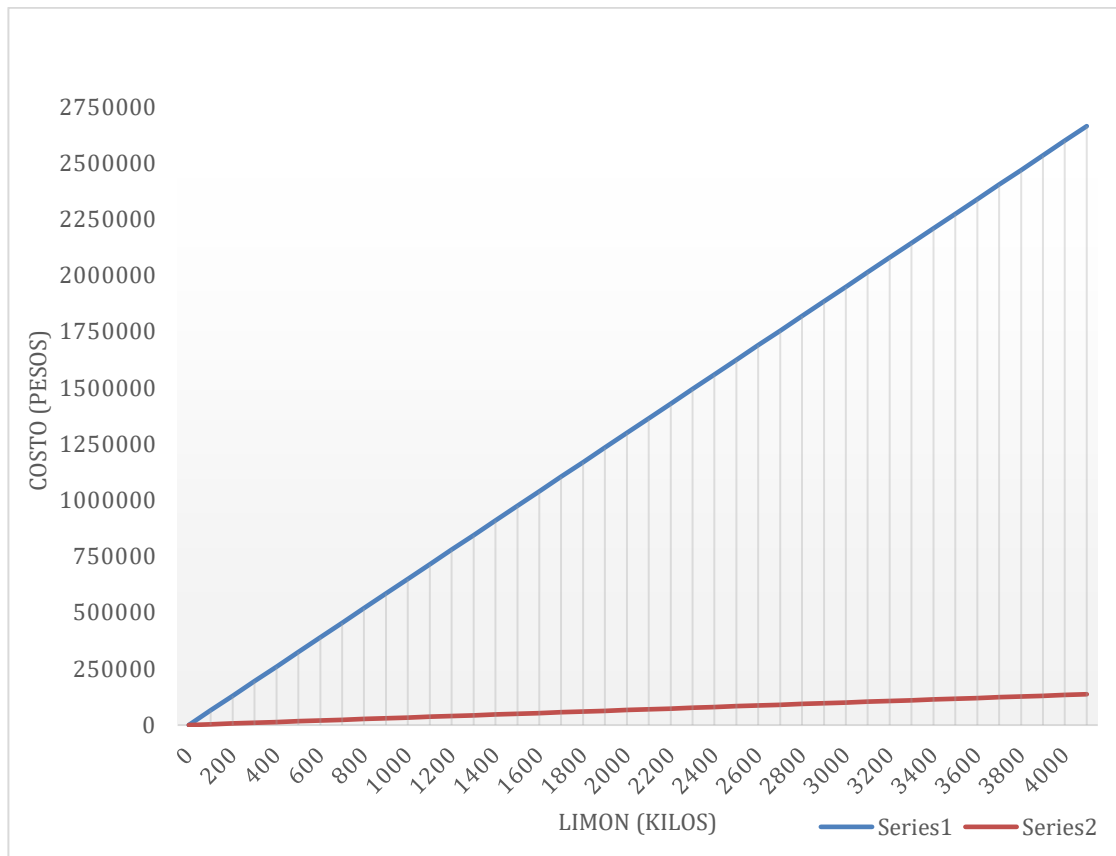


Figura 87. Gráfica comparación costo por cantidad de limón

### 6.3. ANALISIS DE RESULTADOS

Las pruebas del control de velocidad muestran cómo el software y hardware de control, cumplen con el objetivo para el cual fueron diseñados. La figura 78 muestra una respuesta de 2 segundos desde que se detecta la perturbación, hasta estabilizarse completamente, lo que lo hace eficiente en gran medida. Mientras no hay interrupciones no se alcanza una estabilidad perfecta, debido a las imperfecciones mecánicas que presenta el sistema. Sin embargo, el rango de error está entre el 6%, del valor estable, mientras en la gráfica de respuesta del sistema sin controlador se observa un rango de error de hasta el 10% del valor estable.

Buscando la velocidad más eficiente para lograr el proceso en el mínimo tiempo posible, se tiene que a velocidades menores a las 30 RPM se procesará muy poco limón debido a que el tiempo que debe permanecer cada limón sobre los rodillos para alcanzar una limpieza y brillo adecuado, llega hasta los 160 segundos. En cuanto la velocidad de los rodillos aumenta, es

lógico que el tiempo que debe permanecer cada limón en la máquina disminuye, encontrando que en velocidades desde las 380RPM hasta las 450RPM se logra limpiar y brillar satisfactoriamente cada limón con tiempos entre los 40 y los 42 segundos. Así entonces observando la gráfica 85, se tiene que si cada limón tarda 40 segundos sobre los rodillos se logrará procesar 360 kilogramos por hora, lo cual es 3.42 veces la cantidad de limones que se procesa manualmente. Adema si se tienen en cuenta los requerimientos productivos, en los cuales se estipula que el sistema debe procesar más de 210 kilos por hora, entonces se puede afirmar que la máquina logra satisfactoriamente procesar mayor cantidad de limón por unidad de tiempo.

Si la velocidad a la que giran los rodillos sobre pasa las 450 RPM, se observa que el tiempo que debe permanecer cada limón sobre los rodillos aumenta, debido a que las altas velocidades provocan sotos en los limones, causando dificultad para mantener el rose continuo entre rodillo y limones. Así entonces se empieza a disminuir la cantidad de limón que se puede procesar por hora, esto no es conveniente ya que el objetivo es adecuar satisfactoriamente la máxima cantidad de limón posible por unidad de tiempo.

Ahora, se tiene que la velocidad media para procesar mayor cantidad de limón por hora es 415RPM, no obstante, no es el único parámetro que influye en el rendimiento del sistema, ya que, aunque la velocidad sea la más óptima no se logrará el objetivo si la máquina no se alimenta de limón con la frecuencia correcta. Para esto se implementó el sistema de aviso por medio del buzzer, el cual emite un timbre en el instante preciso de ingresar una canastilla, además de la visualización por medio de la pantalla LCD. El tiempo que tarda una canastilla en ser procesada fue tomado de acuerdo a la velocidad a la que giran los rodillos teniendo en cuenta además el tiempo mínimo que debe tardar un limón sobre los rodillos para estar totalmente limpio y brillado, teniendo que se debe vaciar una canastilla cada 3 minutos con 20 segundos, para lograr el rendimiento más óptimo.

Se determina también el tiempo mínimo en que se puede lograr la limpieza total de la superficie de un limón siendo este de 40 segundos, si se deja menos de 35 segundos, el limón sale del sistema con menos del 90% de su superficie limpia, esto conlleva a una mala presentación y disminución de su precio en el mercado. Si por el contrario el limón tarda más de 40 segundos sobre los rodillos, se genera una disminución notable de la cantidad de limones procesados por hora, causando entonces mayor costo de procesamiento por tonelada.

Tabla 9. Análisis de disminución de costos. Brillado

<b>1 TONELADA/ BRILLADO</b>	<b>PROCESO MANUAL</b>	<b>PROCESO AUTOMATICO</b>	<b>DISMINUCIÓN</b>
HORAS	4,76	2,78	41.59 %
OBREROS	3	2	33.3 %
COSTO MANO DE OBRA	\$ 62.500	\$ 24.325	61.08 %
COSTO TOTAL DEL PROCESO	\$ 62.500	\$ 26.727	57.32 %

El proceso manual de brillado sin encerado, genera un consumo de tiempo de 4,76 horas por tonelada, contratando a 3 obreros para realizar el mismo proceso, esto genera costos exactamente de \$62.500 por tonelada procesada, mientras que usando la máquina se emplean 2,78 horas con 2 obreros operando el sistema. Esto significa una reducción de tiempo del 41,59%, y una reducción de costos del 57,32% en el procesamiento por tonelada, como se puede apreciar en la *tabla 9*.

Si a esto se le suma el proceso de encerado, llevado a cabo por los mismos 3 obreros, el tiempo empleado es de 9,72 horas por tonelada procesada, elevando el costo de producción a 125000 pesos por cada 1000 kilogramos procesados. Mientras que usando la máquina se emplean 3,47 horas por tonelada contratando dos obreros, reduciendo el tiempo en un 64,3% y un el costo un 73.27%, teniendo en cuenta el consumo energético de KW/h a 872 pesos.

Tabla 10. Análisis de disminución de costos. Proceso completo

<b>1 TONELADA/ PROCESO COMPLETO</b>	<b>PROCESO MANUAL</b>	<b>PROCESO AUTOMATICO</b>	<b>DISMINUCIÓN</b>
HORAS	9.52	3.47	62.48 %
OBREROS	3	2	33.3 %
COSTO MANO DE OBRA	\$ 125.000	\$ 30.362	75.7 %
COSTO TOTAL DEL PROCESO	\$ 125.000	\$ 33.410	73.27 %

Tanto el costo como el tiempo de procesamiento de grandes cantidades de limón se reducen en gran medida, si se reemplaza el proceso manual por el sistema automático. Pero si no se cuenta con un sistema propio, la segunda opción que tiene el propietario del cultivo, es contratar un sistema automático. Esta segunda opción es relativamente la más rápida, en comparación con la construcción de un sistema propio, sin embargo, según datos proporcionados por el mismo propietario de la producción, el costo para procesar limón en un sistema contratado es de \$650.000 por tonelada. Cabe aclarar que el sistema contratado actualmente, consta con etapas desde la selección, lavado por aspersion, etapas de secado en túnel de aire, brillado y encerado.

Si se compara el costo de procesamiento del proceso manual y el proceso contratado, hay una gran diferencia en reducción de costos a favor del proceso manual, aunque esto se compensa con la cantidad de tiempo empleado por cada proceso, siendo mucho mayor el tiempo que gastan 3 obreros en adecuar una tonelada en comparación con el sistema contratado.

El sistema diseñado cumple con reducir el tiempo y costo de procesamiento de grandes cantidades de limón. En comparación con el sistema contratado es evidente una gran disminución de costos por tonelada procesada. Es importante también, tener en cuenta que el sistema contratado cuenta con varias etapas más de las que tiene el sistema diseñado, por ello el alto costo de alquiler y su facilidad para procesar cantidades de limón mucho más grandes.

La inversión para construcción de esta máquina llega a los \$1.060.141 en materiales más aproximadamente \$ 800.000 en mano de obra, para un total de \$ 1.860.141. Produciendo un promedio de 17 toneladas mensuales se tendría un ahorro de \$1.557.030 logrando recuperar el capital invertido en un promedio de 2 meses, con una producción constante.

## CAPÍTULO VII

### 7. COSTOS

En el siguiente análisis económico se pretende dar una descripción general de todos los gastos realizados para obtener el valor de la inversión realizada en el diseño y construcción de la máquina.

#### 7.1. COSTOS DIRECTOS.

En el análisis de costos directos se toman en cuenta los gastos por materiales, mano de obra, equipos o maquinarias utilizados y transporte, los mismos que se detallan en los literales siguientes:

- **Costos de materiales y accesorios mecánicos**

*Tabla 11. Costos de materiales y accesorios mecánicos*

MATERIAL	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	P.UNIT	COSTO
Piñón	2 pulgadas 25 dientes	unidad	8	\$10.000	\$80.000
Piñón	18 dientes	unidad	1	\$12.000	\$12.000
Piñón	34 dientes	unidad	1	\$15.000	\$15.000
Cadena		Unidad	3	\$15.000	\$45.000
Rodamientos	Balineras 5mm interno	Unidad	16	\$3.000	\$48.000
Acoples para rodamientos	Laminas y tornillos para sujetar balineras	Unidad	16	\$2.000	\$32.000
Ejes	Varilla roscada 3/8	100cm	4	\$2.500	\$10.000
Tapón	2 pulgadas de diámetro externo. 4mm diámetro interno.	Unidad	16	\$3.000	\$48.000
Rodillos	Felpa	120 cm	2	\$8.000	\$16.000
<b>TOTAL</b>					<b>\$306.000</b>



- **Costo de materiales y accesorios eléctricos y electrónicos**

*Tabla 12. Costo de materiales y accesorios eléctricos y electrónicos*

MATERIAL	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	P.UNIT	COSTO
Motor	24V-100W Bidireccional	Unidad	1	\$200.000	\$200.000
Fuente	3-24V - 8ª	Unidad	2	\$35.000	\$70.000
Arduino	Microcontrolador	Unidad	1	\$16.641	\$16.641
Optoacoplador	4N25	Unidad	2	\$1.500	\$3.000
Optoacoplador	MOC3010	Unidad	1	\$3.500	\$3.500
Transistor	BJT TIP120	Unidad	1	\$500	\$500
Transistor	MOSFET IRFZ44N	unidad	1	\$3.000	\$3000
TRIAC	BTA08	Unidad	1	\$2.000	\$2.000
Resistencias	220Ω	Unidad	3	\$100	\$300
Resistencias	10KΩ	Unidad	3	\$100	\$300
Display	ICD 12x2	Unidad	1	\$20.000	\$20.000
Potenciómetro	100 K	Unidad	1	\$400	\$400
Sensor	Laser	Unidad	1	\$2.000	\$2.000
Fotorresistencia	LDR	Unidad	1	\$800	\$800
Sensor	Efecto HALL	Unidad	1	\$7.000	\$7.000
Cable	UTP	3 m	1	\$2.500	\$2.500
Jumper	Hembra-Hembra	Unidad	10	\$300	\$3.000
Borneras	2 pines	Unidad	5	\$600	\$3.000
Borneras	3 pines	Unidad	3	\$700	\$21.000
Regleta	Pines	Unidad	2	\$1000	\$2.000
Soldadura	Estaño	1m	1	\$2.500	\$2.500
Otros	Componentes para impresión de circuitos	Unidad	Varios	\$7.000	\$7.000
Cable	Calibre 18	3m	1	\$3.000	\$3.000
Electroválvula	120VAC	Unidad	1	\$125.000	\$125.000
Pulsador hongo con retención	Parado de emergencia	unidad	1	\$27.000	\$27.000
Pulsador verde 1 NA	Inicio	Unidad	1	\$10.100	\$10.100
Pulsador rojo 1 NC	Stop	Unidad	1	\$10.100	\$10.100
<b>TOTAL</b>					<b>\$545.641</b>

- **Costos de estructura base**

*Tabla 13. Costos de estructura base*

MATERIAL	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	P.UNIT	COSTO
Base metálica	Soporte hecho en hierro para el sistema	1	1	\$70.000	\$70.000
Base de motor y sistema de riego	Soporte metálico para el motor y el sistema de riego	1	1	\$15.000	\$15.000
Lámina	Láminas laterales en acero inoxidable	74 cm	2	\$50.000	\$50.000
Lámina	Lámina frontal en acero inoxidable	31 cm	1	\$7.000	\$7.000
Lámina	Lámina en forma de tolva para entrada y salida del limón	23 cm x 32 cm	2	\$33.000	\$33.000
Tornillos	Tornillos para láminas de acero	Unidad	14	\$2.000	\$2.000
<b>TOTAL</b>					<b>\$177.000</b>

- **Costo de accesorios de sistema de aspersión**

*Tabla 14. Costo de accesorios de sistema de aspersión*

MATERIAL	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	P.UNIT	COSTO
Tubo PVC	½ pulgada	Unidad	1	\$10.000	\$10.000
Codo PVC	½ pulgada	Unidad	2	\$3.000	\$6.000
Tapón PVC	½ pulgada	Unidad	1	\$2.000	\$2.000
Manguera	Entrada/salida de agua	1 m	1	\$3.000	3.000
Boquillas	Aspersión abanico plano 80°	Unidad	3	\$3.000	\$9.000
Adaptador	Rebose de ½ pulgada	Unidad	1	\$1.500	1.500
TOTAL					\$31.500

El costo total por materiales para la máquina automática para el lavado de limones es:

- **Valor total costos directos**

*Tabla 15. Valor total de costos directos*

Materiales	Valor
Mecánicos	\$306.000
eléctricos y electrónicos	\$545.641
Estructura	\$177.000
Accesorios sistema de aspersión	\$31.500
Total	\$1.060.141

- **Costos de operación**

La siguiente tabla muestra los costos de operación por tonelada de limón procesada.

*Tabla 16. Costos de operación por tonelada*

<b>RECURSO</b>	<b>CONSUMO/HORA</b>	<b>COSTO</b>	<b>TONELADA</b>
MANO DE OBRA	2 PERSN/H	\$ 8.750	\$ 30.362
CONSUMO ELECTRICO	2KW/H	\$ 1.048	\$ 3.144

## CAPÍTULO VIII

### 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 8.1 CONCLUSIONES

El uso de rodillos de felpa reemplazando los tradicionales rodillos hechos con fibras de nylon, disminuye en gran medida el costo de fabricación del sistema y cumplen satisfactoriamente con el objetivo de limpiar y brillar los limones empleando menor tiempo de procesamiento en comparación con el proceso llevado a cabo manualmente.

No se recomienda la implementación de rodillos de felpa en la etapa de encerado, debido que el peso que adquieren los rodillos al empaparse de cera, afecta directamente el rendimiento del motor. Adicional a esto el líquido para encerado se desperdicia siendo salpicado gran parte afuera del sistema de recolección.

La implementación del control de velocidad aplicado al giro de los rodillos se suma a la lista de factores para lograr el máximo rendimiento del sistema, gracias a que mantiene la velocidad constante sin importar la cantidad de limón que haya sobre los rodillos. En caso de no implementarlo se reduciría el tiempo de procesamiento debido a que a mayor peso sobre los rodillos, menor será la velocidad a la que giren.

Se logra reducir el tiempo de procesamiento de limón por toneladas, gracias al balance exacto entre velocidad y tiempo mínimo de procesado de cada limón, basado en el análisis de resultados según las pruebas realizadas al sistema en funcionamiento.

Gracias a la reducción de tiempo de limpieza, brillo y encerado de grandes cantidades de limón Tahití, en la hacienda la Aurora, se logran reducir así mismo los costos de producción notablemente, en comparación con el proceso llevado a cabo manualmente. Esta reducción de costos se logra básicamente gracias a la reducción de mano de obra necesaria y tiempo.

La implementación de una interfaz visual mejora notablemente la interacción entre máquina y obreros, dando a estos la facilidad de conocer el balance perfecto entre velocidad y frecuencia de alimentación por canastilla para lograr el rendimiento máximo del sistema. Adicional a esto el aviso mediante timbre facilita esta comunicación permitiendo la interacción, aun a varios metros de distancia.

## 8.2. RECOMENDACIONES

Antes de encender la máquina y empezar a ingresar limones se debe asegurar que haya canastillas de empaque a la salida del sistema, para evitar que el limón que pasa por todo el proceso se caiga al piso y se ensucie nuevamente.

Para un mayor rendimiento del sistema se recomienda implementar una etapa de selección manual previa al proceso que realiza la máquina, descartando las frutas con imperfecciones, deformidades, manchas y de tamaño notablemente reducido, ya que estas no se comercializan en la misma categoría.

Mientras el sistema está en funcionamiento, no se recomienda manipular manualmente ninguno de sus componentes debido a riesgos eléctricos y riesgos de heridas por mecanismos de rotación a alta velocidad.

## 8.3. RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS

Para procesamiento de mayores cantidades de limón se recomienda incrementar las longitudes del sistema en todo sentido, así como la capacidad de cada uno de los componentes mecánicos y electrónicos para garantizar un mejor rendimiento.

Si se desea un proceso más completo puede agregarse al sistema actual etapas de selección y túneles de aire caliente para el secado más rápido de la cera aplicada sobre los limones.

Para protección y prolongación de la vida útil de los componentes electrónicos en los circuitos de conmutación, se recomienda el uso de redes Snubber y diodos de rueda libre como se muestra a continuación.

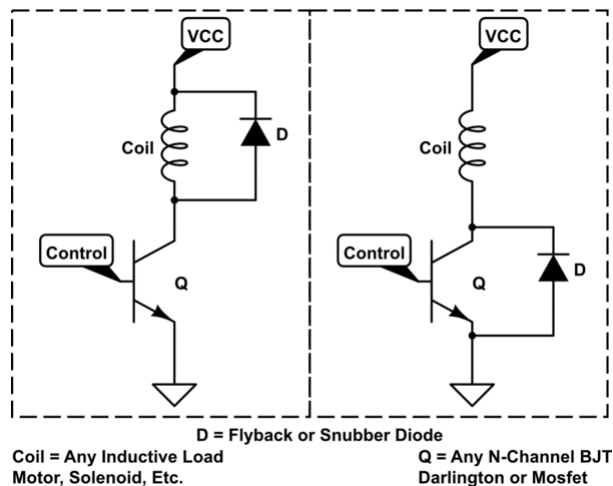


Figura 88. Diodo de rueda libre  
Fuente: (i-ciecias, 2013)

El diodo de rueda libre es usado comúnmente para proteger los transistores o componentes de conmutación en circuitos de control para cargas inductivas, debido a que al abrir el circuito las bobinas, que están en este caso en el motor, proporcionan una tensión elevada para mantener la corriente que circulaba un instante antes de ser abierto. En este caso se tienen tres componentes electromecánicos que contienen embobinados, los cuales producen sobretensiones que pueden dañar los transistores y triac.

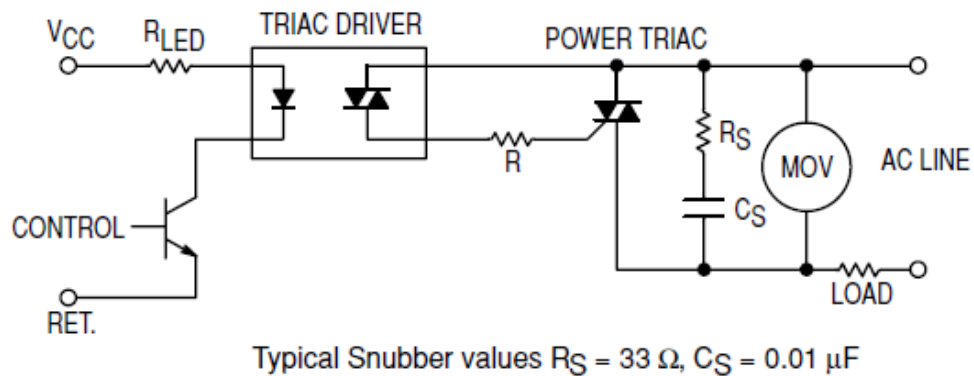


Figura 89. Redes Snubber  
Fuente: (Wikilibros, 2016)

El uso de redes snubber mejoran el rendimiento de los circuitos de conmutación de los convertidores de potencia, para suprimir los picos de voltaje. Además, esto ayuda a amortiguar la oscilación transitoria provocada por las mismas cargas inductivas cuando se abre un interruptor.

En el diagrama del circuito de control de velocidad se recomienda disminuir el valor de las resistencias R2 y R3 como se muestra en la *figura 90*, debido a que un valor muy alto de estas resistencias puede incrementar la transición de estado ON/OFF y por tanto aumento en las pérdidas por conmutación.

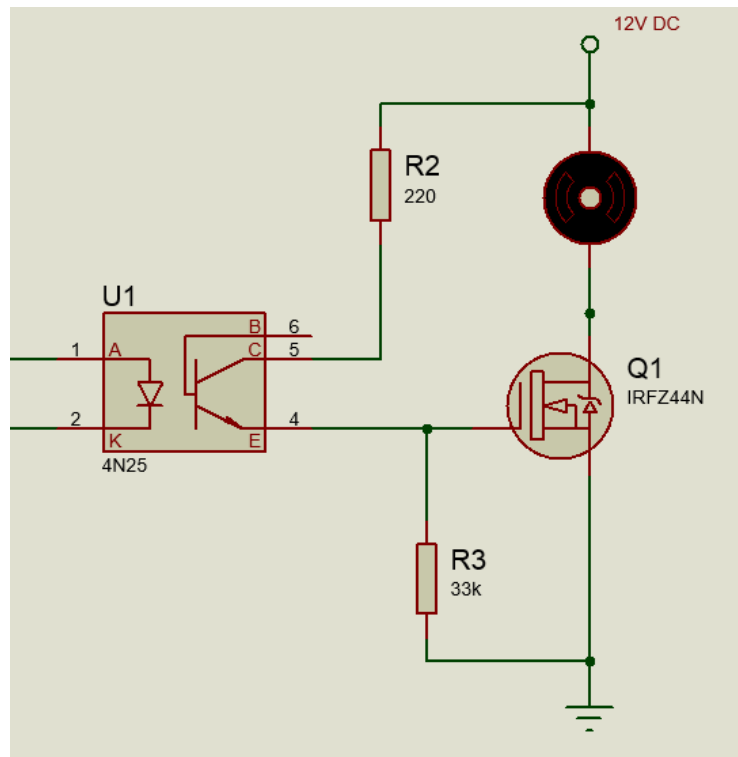
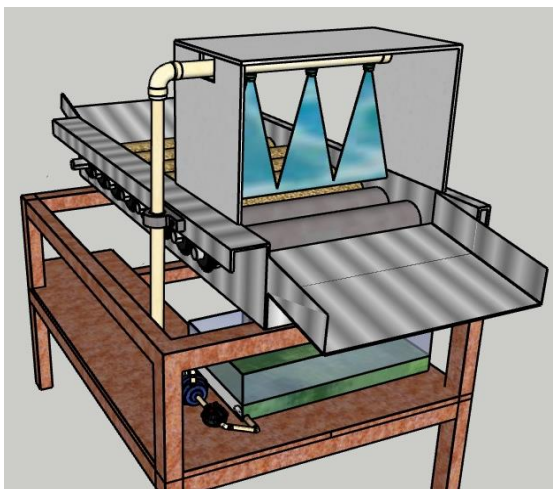
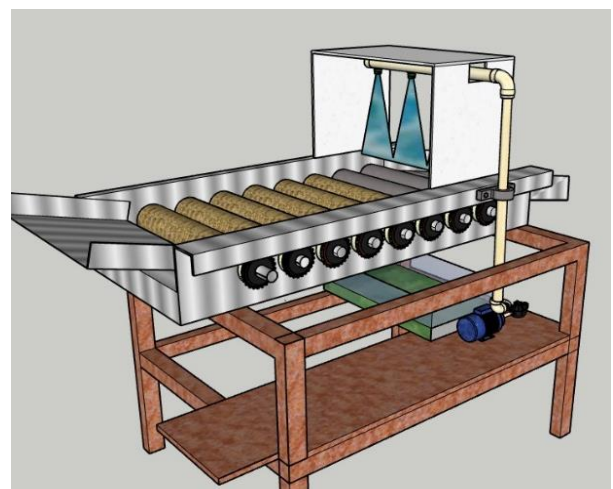


Figura 90. Cambio de valor de resistencias

En la etapa de encerado se recomienda implementar una lámina tipo túnel, ver figura 91. Que cubra el área en el cual se aplica el proceso de aspersión, esto para evitar mayores pérdidas por salpicadura debido al movimiento de los limones.



(a)



(b)

Figura 91. Diseño e implementación de lámina acrílica



## BIBLIOGRAFÍA

- (2012). En *CÍTRICOS: CULTIVO, POSCOSECHA E INDUSTRIALIZACIÓN* (pág. 367). Caldas: Serie Lasallista Investigación y ciencia.
- BATALLER VENTA, Mayra, S. C. (2010). *El ozono: una alternativa sustentable en el tratamiento poscosecha de frutas y hortalizas*. Ciudad de Habana, Cuba.
- Catarina Pedro Pássaro Carvalho, P. N. (2012). *CÍTRICOS: CULTIVO, POSCOSECHA E INDUSTRIALIZACIÓN*. Caldas.
- Conocimientosweb.net*. (18 de julio de 2013). Obtenido de <https://www.conocimientosweb.net/dcmf/ficha20365.html>
- ESCOLAR REINA, A. (2016). *España Patente nº 2 631 192*.
- ESCOLAR REINA, A. (2016). *España Patente nº ES 2 631 192 B2*.
- GALÍ MASCARILLA, David, e. a. (2016). *tratamiento y desinfección del agua de lavado de vegetales mediante electro-oxidación. Caso de estudio: agua de lavado de espinacas y lechuga*.
- GARCIA PORTILLO, M. (2015). *España Patente nº P201430263*.
- los divinos*. (06 de octubre de 2009). Obtenido de <http://los-divinos.over-blog.es/article-capitulo-2-limpieza-de-las-materias-primas-el-rossman-37846799.html>
- MALDONADO ALVARADO, E. (2016).
- Malvino, A. P. (s.f.). *principios de electrónica*. Mc Graw Hill.
- Mazzone, V. (2002). *Automatización y Control Industrial*. Quilmes .
- NORMA TÉCNICA COLOMBIANA (NTC 4087)*. (26 de Febrero de 1997). Obtenido de [https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/2020/81502\\_59928.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/2020/81502_59928.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- OH, H.-S. (2014). *Patente nº EP 1651064*.
- PATRICIA, P. M., & IVAN, S. I. (2004). *ANÁLISIS DEL POTENCIAL EXPORTADOR DE LIMA TAHITI EN FRESCO PRODUCIDA EN EL DEPARTAMENTO DE BOLIVAR*. CARTAGENA.
- Vega, R. (19 de 04 de 2017). *interacciones en arduino*. Obtenido de <https://ricveal.com/blog/arduino-interrupciones/>
- VERO, G. G. (2006). *Métodos para la desinfección de frutas y hortalizas*. Uruguay.



## ANEXO A. CODIGO DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA.

```
// SISTEMA AUTOMATICO PARA LAVADO Y ENCERADO DE LIMON

//Daniel Gomez

//Yeison Gaona

// CODIGO FUENTE ARDUINO UNO

//-----DECLARACION DE VARIABLES-----

volatile int contador=0;

int rpmm;

int rpms;

int cont;

float velocidad;

float referencia;

float pwm1=0;

int rpmreal=0;

int senslasr;

int kph;

int atc;

int cal;

//-----PARA DISPLAY LCD-----

#include <LiquidCrystal.h>

LiquidCrystal lcd(13, 12, 11, 10, 9, 8);
```

```

//-----

float x1[6] = {0, 0, 0, 0, 0};

float y1[8] = {0, 0, 0, 0, 0,0,0};

void setup()
{
  pinMode(3,OUTPUT);
  Serial.begin(9600);
  attachInterrupt(0, Med_velocidad,CHANGE);
  pinMode(4, INPUT);
  pinMode(5, OUTPUT);
}
//-----

void Med_velocidad()
{
  contador++;
}

//----- MEDICION DE VELOCIDAD -----

void rpm()
{
  delay(99.9);
  //Serial.print("contador");
  //Serial.println(contador);
}

```

```

rpm= (contador*25);

cont=contador;

//Serial.print(" RPM= ");
//Serial.print(rpm);

contador = 0;
}

//-----
void loop()
{
  rpm();

  velocidad=cont;    //VELOCIDAD EN EL MOTOR

  referencia=30 ;

  rpmreal=((18*rpm)/34); // VELOCIDAD EN LOS RODILLOS

//----- CONTROLADOR -----

x1[1] = referencia - velocidad;

y1[1] = 1*y1[2] + 0.8951*x1[1] -0.982259*x1[2] + 0.35816*x1[3];

if (y1[1] > 1023)

```

```

{
  y1[1] = 1023;
}

pwm1 = map(y1[1], 0.0, 1023.0, 0.0, 255.0);

//-----IMPRESION POR SERIAL PLOTER -----

analogWrite(3,pwm1);

Serial.print(velocidad);

Serial.print(",");

Serial.print(pwm1);

Serial.print(",");

Serial.println(referencia);

//-----

x1[3] = x1[2];
x1[2] = x1[1];

y1[3] = y1[2];
y1[2] = y1[1];

//-----SENSOR LASER-----

senslasr=digitalRead(4);

if(senslasr==HIGH)
{
  delay(30000);
}

```

```

digitalWrite(13, HIGH);

delay(50000);
}
else
digitalWrite(13,LOW);
//-----

t=millis()/1000;
digitalWrite(5, HIGH);// señal de timbre
delay (2000);
// Serial.println(t);

kph=(0.08*t)*3600;
atc=t;
cal=t/50;

//-----IMPRESION EN PANTALLA-----
lcd.begin(16, 2);
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("RPM:");
lcd.setCursor(5, 0);
lcd.print(rpmreal); // revoluciones por minuto en los rodillos

```

```
lcd.setCursor(0, 1);  
lcd.print("K/H:");  
lcd.setCursor(5, 1);  
lcd.print(kph); // rendimiento en kilos por hora  
  
lcd.setCursor(10, 0);  
lcd.print("ATC:");  
lcd.setCursor(14, 0);  
lcd.print(atc); // abastecimiento del tanque de cera  
  
lcd.setCursor(10, 1);  
lcd.print("CAL:");  
lcd.setCursor(14, 1);  
lcd.print(cal); // contador para alimentación por canastilla de limón.  
  
delay (10);  
}
```



## ANEXO B. CODIGO PARA ANALISIS DE FUNCION DE TRANSFERENCIA

```
%CODIGO FUENTE PARA ANALISIS DE LA FUNCION DE TRANSFERENCIA
%Yeison Gaona
%Daniel Gomez
%%
clear all
close all
clc
% ts=0.3
% Gz = tf([0 0.1295 -0.192 0.07116],[1 -2.217 1.65 -0.4066],ts,
'variable', 'z^-1');
%%ts=1
%%Gz = tf([0 0.0122 0.01252],[1 -2.25 0.6512 2.303 -2.952 1.469 0.5078 -
1.468 0.9758 -0.2324],ts, 'variable', 'z^-1');

ts=0.1
Gz= tf([0 0.008338 0.008338 0.008338],[1 -2.253 0.6566 2.304 -2.957
1.475 0.504 -1.47 0.9797 -0.234],ts,'variable','z^-1');
step(Gz)
Gz
y = step(Gz);
Vest=y(end)
%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
b = (Vest*50)/100; %calcula el 50% del valor estable
text(0,b, '\rightarrow -----
50%');
disp('50% del valor estable:');
disp(b);
[x1 y1]= ginput (1); % define puntos de interpolacion
[x2 y2]= ginput (1);
c = (b*5)/100; % 5% del 50% del valor estable
rangen = b+c;
rangde = b-c; % se define el rango con 5% mas y 5% menos
i = 1;
%% interpolacion para el 50%
int = (y1 + y2)/2;
TD= (x1 + x2)/2;
while int > rangen || int < rangde
    while int > rangen
        int = (y1 + int)/2
        TD= (x1 +TD)/2
    end

    while int < rangde
        int = (int + y2)/2;
        TD= (TD+x2)/2;
    end
end
```

```

        i = i + 1 ;

end
text(TD,0, '\downarrow Td');
%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
b1 = (Vest*10)/100; %calcula el 10% del valor estable
text(0,b1, '\rightarrow -----
10%');
disp('10% del valor estable:');
disp(b1);
[x3 y3]= ginput (1); % define el puntos de interpolacion para el 10%
[x4 y4]= ginput (1);
c1 = (b1*5)/100;
rangen1 = b1+c1; % define rango por arriba y por abajo de 5% del 10%
rangdel = b1-c1;
i = 1;
%% interpolacion para el 10%
int1 = (y3 + y4)/2;
Tr10= (x3 + x4)/2;
while int1 > rangen1 || int1 < rangdel
    while int1 > rangen1
        int1 = (y3 + int1)/2
        Tr10= (x3 +Tr10)/2

    end

    while int1 < rangdel
        int1 = (int1 + y4)/2;
        Tr10= (Tr10+x4)/2;
    end
    i = i + 1 ;

end

text(Tr10,0, '\downarrow Tr10');
%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
b9 = (Vest*90)/100; % calcula el 90% del valor estable
text(0,b9, '\rightarrow -----
90%');
disp('90% del valor estable:');
disp(b9);
[x5 y5]= ginput (1); % define puntos para interpolar
[x6 y6]= ginput (1);
c = (b9*5)/100;
rangen9 = b9+c; % define rango de 5% por arriba y por abajo del 90%
rangde9 = b9-c;
i = 1;
%% interpolacion para el 90%
int9 = (y5 + y6)/2;
Tr90= (x5 + x6)/2;
while int9 > rangen9 || int9 < rangde9

```

```

while int9 > rangen9
    int9 = (y5 + int9)/2
    Tr90= (x5 +Tr90)/2

end

while int9 < rangde9
    int9 = (int9 + y6)/2;
    Tr90= (Tr90+x6)/2;
end
i = i + 1 ;

end
Trtotal=Tr90-Tr10;
Trtotal
text(Tr90,0, '\downarrow Tr90');

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%
%% calculo para el sobre paso maximo
[x7 y7]= ginput (1);
[x8 y8]= ginput (1);
Vmax= y7
tp= (x7+x8)/2
MP=( (Vmax-Vest)/Vest)*100
text(0,Vmax, '\rightarrow -----
----- MP');
text(tp,0, '\downarrow Tp');
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%
%% calculo para cuando entre al rango estable de 2% sobre y bajo el nivel
estable
E=(Vest*2)/100;
w=Vest+E;
s=Vest-E;
text(0,w, '\rightarrow -----
----- (+2%) ');
text(0,s, '\rightarrow -----
----- (-2%) ');

[x9 y9]= ginput (1);
Ts=x9

```



**UDEC**  
**UNIVERSIDAD DE**  
**CUNDINAMARCA**

**Manual de usuario**

**DESARROLLO DE UN SISTEMA AUTOMÁTICO PARA LIMPIEZA Y  
TRATAMIENTO DE FRUTAS, APLICADO AL CULTIVO DE LIMONES**

**AUTORES: DANIEL GOMEZ R, YEISON A. GAONA R**

Versión: 01.00  
Fecha: **24/08/2018**

**INTRODUCCIÓN**

**INSTRUCCIONES DE SEGURIDAD**

**ADVERTENCIA: LEER CON ANTERIORIDAD EL MANUAL DE USUARIO ANTES  
DE TRABAJAR CON EL SISTEMA.**

No leer las siguientes instrucciones puede ocasionar lesiones personales o daños en el sistema.

- No utilizar la máquina sin una toma de tierra apropiada para eliminar peligros de choque eléctrico.
- Cuando la máquina está en mantenimiento y/o siendo reparada la tensión debe estar desconectada.
- No manipular la parte mecánica del sistema cuando esté en funcionamiento.
- Utilizar guantes de protección a la hora de arrojar el limón en el sistema para su debido lavado.

NOTA: es responsabilidad del usuario el estar seguro de que la maquinaria está en perfectas condiciones de seguridad en todo momento y que el operario cumpla todas las normas de seguridad y mantenimiento apropiadas que se indican en el manual y en las placas de advertencia y/o instrucciones.

## 1. DESCRIPCIÓN

### 1.1. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

A continuación, se describen las características de los diferentes componentes de la máquina.

El sistema consiste en una banda transportadora de rodillos de espuma; la cual traslada limones hacia un sistema de aspersión que se encuentra ubicado al final del recorrido de dicha banda. El sistema es puesto en marcha por un motor DC; a través de una cadena que transmite la potencia entre ejes (piñones) que giran a una determinada velocidad. Estos piñones van **sujetados** al eje de cada uno de los rodillos que componen la banda transportadora, por lo tanto, estos irán sincronizados a la misma velocidad; el sistema de aspersión se activa automáticamente una vez se haya detectado que el limón pasa por la entrada del sistema.

Las características generales del sistema son:

- Alimentación eléctrica 110 Vac-60 Hz
- Fuente de alimentación 24 V a 12 A
- Sensor laser
- Sensor efecto Hall
- Motobomba
- Etapa de potencia
- Arduino
- Válvula
- Rodillos

- Deposito
- Filtro de partículas
- Pantalla LCD

## INSTALACIÓN

### OBRAS PREVIAS

Se debe disponer de una toma corriente a 110 VAC con toma de tierra para el buen funcionamiento del sistema.

Es aconsejable instalar el sistema en un lugar amplio con el suelo nivelado, cerca de la recolección final de la fruta.

### PROCESO DE INSTALACIÓN

Para instalar el sistema se deberá seguir los pasos correspondientes para facilitar el montaje.

1. Instalar la canastilla en la salida del sistema a una distancia prudente para no llegar a maltratar el limón.
2. Revisar que el filtro no esté obstruido por partículas de polvo, tierra u otro objeto que impida la recirculación de agua hacia la motobomba.



*Figura 92. Filtro*

## FUNCIONAMIENTO

### DESCRIPCIÓN

La función principal del sistema es realizar el debido proceso de limpieza del limón Tahití, cuenta con un sensor el cual se activa cuando detecta el paso de la fruta y envía la señal para

que la motobomba se encienda y empiece a recircular el líquido con el que va a ser lavado el limón.

El sistema se divide en tres etapas, inicio o caída del limón, lavado y/o brillado del limón, salida del limón.

En el *inicio o caída del limón* se realiza con una tolva la cual verterá por gravedad el limón en el sistema y/o manualmente por el operario el cual verterá la cantidad de fruta que se desea limpiar.

En el *lavado y/o brillado del limón* se tendrá en movimiento la banda transportadora de ocho rodillos por los cuales van pasando los limones. A medida que los rodillos van girando, se van retirando las partículas de polvo o tierra que están adheridas a la fruta. Al final de la banda transportadora entre el séptimo y el octavo rodillo está situado el sistema de aspersion el cual se activa cuando el sensor detecta que hay fruta en el sistema. Este sistema de aspersion se encarga de impregnar al limón con una mezcla entre agua y cera especial para el brillo de la fruta.

Por último, en la *salida del limón*. La fruta es recogida en canastillas para ser seleccionada por los operarios de acuerdo al tamaño del limón.

Se recomienda que la última tanda de limones que va a ser limpiada, sea empujada por el operario, ya que al no haber más fruta en la entrada del sistema, no se va a generar el empuje hacia la salida y quedaran girando constantemente en medio de los rodillos.

## INICIALIZACIÓN

Cada vez que el usuario desee trabajar con el sistema deberá seguir una secuencia de encendido y ejecutar unas operaciones de inicialización.

Secuencia de encendido y apagado

Para iniciar asegúrese de tener el sistema conectado a una red de 110V / 50- 60Hz. Enseguida siga las siguientes instrucciones.

1. Accionar el interruptor ON (verde) de la caja de mando del sistema.

## TEST DE FUNCIONAMIENTO

Tras haber realizado el proceso de Inicialización se procederá a realizar unas acciones que permitan comprobar el correcto funcionamiento del sistema y así localizar errores o anomalías.

1. Cargar el Arduino con el código actualizado.

2. Visualizar en la en la PC los datos recibidos por los sensores en el entorno de Arduino.
3. Luego de verificar el debido funcionamiento de los sensores, se debe comprobar que la pantalla LCD nos muestra la cuenta regresiva para la activación del sistema de aspersión (10 segundos) y las RPM de la banda transportadora de rodillos. Es importante aclarar que el conteo regresivo dará inicio después que el sensor laser se active al presentarse una obstrucción.

## Alimentación eléctrica

En caso de que al accionar el interruptor y dejarlo en ON, no se encienda el sistema:

1. Verifique la conexión a la red, probablemente el cable alimentación de la máquina no esté conectado.
2. Conexiones internas de alimentación erróneas, el cableado del sistema puede estar averiado.

## MANTENIMIENTO

### 4.1. GENERAL

La mayor parte del mantenimiento general a realizar por los usuarios: se da una limpieza básica y unas rutinas de trabajo que tiene que realizar para comprobar su comportamiento a la hora de encender el sistema, con la finalidad de establecer unos hábitos generales para el buen funcionamiento de la máquina

El usuario deberá leer el manual del sistema así podrá observar los cambios en su funcionamiento, siendo de ayuda inestimable para describir las fallas.

El mantenimiento general se traduce en:

1. Mantener el sistema en buenas condiciones de aseo
2. Verificar que el sistema electrónico no este expuesto a polvo, insectos y humedad.
3. Lubricar periódicamente la cadena de transmisión para un funcionamiento fiable y una prolongada duración de vida de los rodamientos.

## SEGURIDADES

### PRECAUCIONES GENERALES DE SEGURIDAD

Las presentes precauciones de seguridad para este sistema han sido preparadas para ayudar al operario y al personal de mantenimiento a la puesta en práctica de procedimientos de seguridad en el trabajo. El operario y el personal de mantenimiento deben leer y comprender



completamente dichas precauciones antes de la puesta en marcha, puesta a punto, funcionamiento realización de operaciones de mantenimiento del sistema.

Estas precauciones deben ser utilizadas como complemento a las precauciones de seguridad y avisos de atención incluidos en:

- a) Reglamentos y códigos locales, de fábrica y de sección.
- b) Leyes y reglamentaciones nacionales.

**ATENCIÓN:** Lea las precauciones de seguridad pertinentes antes de poner en marcha el sistema. El incumplimiento de las instrucciones de seguridad puede ser causa de lesiones a las personas y/o daños a los componentes del sistema.

#### i. Seguridad personal

El personal de operación puesta a punto, mantenimiento y servicio, deben ser conscientes de que los procedimientos diarios de seguridad son una parte vital del sistema y de mantener en marcha el sistema.

La prevención de accidentes debe ser uno de los principales objetivos del trabajo independientemente de la actividad en cuestión. Asegúrese que todos cumplan los procedimientos y precauciones de seguridad cuando operan el sistema o sus componentes por separado.