



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y
MECÁNICA**

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO EN MECATRÓNICA**

**TEMA: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA
CLASIFICADORA DE MAÍZ DURO SECO MEDIANTE UN
SISTEMA DE VISIÓN ARTIFICIAL PARA LA DISTRIBUIDORA
DE GRANOS Y HARINAS DANHALU**

AUTORES:

ALCOCER TELLO LUIS GUSTAVO

IZA CARVAJAL ALEXIS DAVID

DIRECTOR:

ING. IBARRA JÁCOME OSWALDO ALEXANDER MSC.

SANGOLQUÍ

2017



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA CLASIFICADORA DE MAÍZ DURO SECO MEDIANTE UN SISTEMA DE VISIÓN ARTIFICIAL PARA LA DISTRIBUIDORA DE GRANOS Y HARINAS DANHALU” realizado por los señores LUIS GUSTAVO ALCOCER TELLO y ALEXIS DAVID IZA CARVAJAL, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar a los señores LUIS GUSTAVO ALCOCER TELLO y ALEXIS DAVID IZA CARVAJAL para que lo sustenten públicamente.

Sangolquí, 25 de agosto de 2017

Ing. Alexander Ibarra

DIRECTOR



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, LUIS GUSTAVO ALCOCER TELLO, con cédula de identidad No 172066053-7 y ALEXIS DAVID IZA CARVAJAL, con cédula de identidad No 172259849-5, declaramos que este trabajo de titulación “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA CLASIFICADORA DE MAÍZ DURO SECO MEDIANTE UN SISTEMA DE VISIÓN ARTIFICIAL PARA LA DISTRIBUIDORA DE GRANOS Y HARINAS DANHALU” ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaramos que este trabajo es de nuestra autoría, en virtud de ello nos declaramos responsables del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Sangolquí, 25 de agosto de 2017

Luis Gustavo Alcocer Tello

C.I. 172066053-7

Alexis David Iza Carvajal

C.I. 172259849-5



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

AUTORIZACIÓN

Nosotros, LUIS GUSTAVO ALCOCER TELLO y ALEXIS DAVID IZA CARVAJAL, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca Virtual de la institución el presente trabajo de titulación “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA CLASIFICADORA DE MAÍZ DURO SECO MEDIANTE UN SISTEMA DE VISIÓN ARTIFICIAL PARA LA DISTRIBUIDORA DE GRANOS Y HARINAS DANHALU” cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 25 de agosto de 2017

Luis Gustavo Alcocer Tello

C.I. 172066053-7

Alexis David Iza Carvajal

C.I. 172259849-5

DEDICATORIA

Dedico este trabajo especialmente a mis padres, Gustavo y Graciela quienes con su amor y apoyo incondicional supieron encaminar mi vida por el sendero del bien, este trabajo es por ustedes y para ustedes. A mi amada esposa quien me supo comprender en todo momento y me apoyo para cumplir juntos esta meta. A ti Danielito por ser mi fuente de inspiración y dar alegría a mis días. A mis hermanas Nathaly y Valentina, espero que muy pronto ustedes también nos llenen de orgullo cumpliendo sus metas. A mis abuelitos Galo, Susana y Bertha por quererme tanto y darme esas palabras de aliento en cada momento.

Luis Gustavo Alcocer Tello

Dedico el presente trabajo a Dios por guiarme por buen camino hasta culminar éste proceso, a mi familia, amigos que han estado a lo largo de mi carrera universitaria y han sido motivo de gozo en mi vida.

Alexis David Iza Carvajal

AGRADECIMIENTO

A Dios por permitirme compartir este momento de dicha con las personas que más amo.

A mi madre por quererme tanto, por ser mi confidente, y por apoyarme siempre que la necesité, a mi padre por ser un ejemplo de perseverancia y enseñarme desde pequeño tantas cosas que hoy en día me han servido en cada tarea que he ido realizando.

A ti Diana, gracias mi vida por todo el amor que me brindas cada día, muy pronto habremos cumplido juntos una de las metas más importantes en nuestras vida y junto a nuestro Danielito iremos en busca de más retos por cumplir.

A toda mi familia quienes de una u otro manera me han ayudado a salir adelante, aunque el camino no haya sido fácil con su ayuda y sus consejos pude superar todas las adversidades que se presentaron durante este proyecto.

A mi director de tesis Ing. Alexander Ibarra por todo el tiempo y apoyo brindado en el desarrollo de este trabajo, de igual manera a todos los Docentes y expertos que suplieron nuestras dudas y colaboraron con sus conocimientos.

Y por último agradezco a todos mis amigos y compañeros que compartieron conmigo tiempo durante mi vida universitaria, gracias por su amistad chicos y por su apoyo en cada etapa de esta carrera.

Luis Gustavo Alcocer Tello

Agradezco a Dios por bendecirme con mis estudios, por darme fuerzas para continuar cuando las mías no eran suficientes, y por poner en mi camino a personas que me han ayudado en mi crecimiento personal y profesional. A mis padres por apoyarme en todas las decisiones que he tomado y por su ejemplo de esfuerzo que lo llevo presente en todo momento. A todos los que conforman el club ESPE al Máximo porque con su amistad he aprendido a afrontar la vida, tomar decisiones correctas y dedicar mi vida al bien de otros.

Alexis David Iza Carvajal

ÍNDICE

| | |
|---|------|
| DEDICATORIA..... | v |
| AGRADECIMIENTO..... | vi |
| ÍNDICE..... | vii |
| ÍNDICE DE ILUSTRACIONES..... | x |
| ÍNDICE DE TABLAS..... | xiii |
| RESUMEN..... | xv |
| ABSTRACT..... | xvi |
| CAPÍTULO I..... | 1 |
| GENERALIDADES..... | 1 |
| 1.1. Definición del proyecto..... | 1 |
| 1.2. Antecedentes..... | 3 |
| 1.3. Justificación e importancia..... | 4 |
| 1.4. Área de influencia..... | 5 |
| 1.5. Objetivos..... | 5 |
| 1.5.1. Objetivo general..... | 5 |
| 1.5.2. Objetivos específicos..... | 5 |
| 1.6. Alcance..... | 6 |
| CAPÍTULO II..... | 7 |
| MARCO TEÓRICO..... | 7 |
| 2.1. Introducción a los sistemas de visión artificial..... | 7 |
| 2.1.1. Fundamentos de la imagen digital..... | 8 |
| 2.1.2. Color de la luz..... | 9 |
| 2.1.3. Material de la superficie..... | 11 |
| 2.1.4. Sensibilidad de la cámara..... | 12 |
| 2.1.5. Representación de la imagen..... | 13 |
| 2.1.6. Elementos de un sistema de visión artificial..... | 14 |
| 2.2. Sistemas Mecatrónicos en la Agroindustria..... | 21 |
| 2.3. Normativa de materiales en contacto con alimentos..... | 24 |
| 2.4. Tecnologías y máquinas existentes..... | 27 |
| CAPÍTULO III..... | 30 |

| | |
|--|-----|
| DESARROLLO DEL PRODUCTO | 30 |
| 3.1. Desarrollo del concepto..... | 31 |
| 3.2. Diseño a nivel sistema | 34 |
| 3.3. Diseño a detalle | 36 |
| 3.3.1. Diseño del hardware | 38 |
| 3.3.1.1. Diseño de los componentes mecánicos..... | 38 |
| 3.3.1.2. Diseño de los componentes eléctricos y/o electrónicos y de control | 97 |
| 3.3.2. Diseño del software | 111 |
| 3.3.2.1. Diseño de la lógica de programación del sistema..... | 111 |
| 3.3.2.2. Programación del sistema de control..... | 117 |
| 3.3.2.3. Diseño de HMI..... | 119 |
| 3.3.3. Implementación..... | 122 |
| 3.3.3.1. Implementación de la máquina..... | 122 |
| 3.3.3.2. Implementación de los componentes eléctricos y/o electrónicos y de control..... | 134 |
| CAPÍTULO IV..... | 138 |
| Pruebas y resultados..... | 138 |
| 4.1. Pruebas y resultados..... | 138 |
| 4.1.1. Pruebas en el ducto de salida de grano | 138 |
| 4.1.2. Pruebas en la banda transportadora | 139 |
| 4.1.3. Pruebas en el sistema neumático | 140 |
| 4.1.4. Pruebas del software | 140 |
| 4.1.5. Pruebas del sistema de clasificación..... | 141 |
| 4.2. Diseño robusto..... | 141 |
| CAPÍTULO V..... | 145 |
| Análisis económico y financiero | 145 |
| 5.1. Análisis de flujo de caja..... | 145 |
| 5.1.1. Tamaño de inversión..... | 146 |
| 5.1.2. Ingresos..... | 149 |
| 5.1.3. Egresos | 151 |
| CAPÍTULO VI..... | 158 |
| Conclusiones y recomendaciones..... | 158 |

| | |
|---------------------------|-----|
| 6.1. Conclusiones | 158 |
| 6.2. Recomendaciones..... | 159 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | 160 |
| ANEXOS..... | 164 |
| 1. Anexo 1 | 164 |
| 2. Anexo 2 | 164 |
| 3. Anexo 3 | 164 |
| 4. Anexo 4 | 164 |
| 5. Anexo 5 | 164 |
| 6. Anexo 6 | 164 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Mazorcas de maíz duro de diferente color..... | 1 |
| Figura 2. Almacenamiento de los granos para procesar | 2 |
| Figura 3. Diseño esquemático de la clasificadora de granos, Vista lateral | 2 |
| Figura 4. Binarización de la imagen de los granos a descartar | 3 |
| Figura 5. Campos de aplicación de la visión artificial..... | 8 |
| Figura 6. Colores de acuerdo a la Longitud de Onda λ (nm)..... | 10 |
| Figura 7. Espectro Electromagnético..... | 10 |
| Figura 8. Inspección térmica de tuberías. | 11 |
| Figura 9. Reflejo de la luz blanca de diferentes materiales | 11 |
| Figura 10. Sectores del espectro que cubren los sensores RGB | 12 |
| Figura 11. Ubicación de pixeles en la imagen digital..... | 13 |
| Figura 12. Hardware del sistema de visión artificial | 14 |
| Figura 13. Software de un sistema de visión artificial..... | 18 |
| Figura 14. Técnicas de Procesamiento de imágenes..... | 19 |
| Figura 15. Imagen Binaria de granos de arroz por el método de umbral..... | 20 |
| Figura 16. Técnicas de Segmentación | 20 |
| Figura 17. Encasillamiento de objetos | 21 |
| Figura 18. Planta afectada por una plaga..... | 22 |
| Figura 19. Interfaz de usuario en un invernadero | 23 |
| Figura 20. AMR™ de DeLaval | 24 |
| Figura 21. Clasificadora por tamices | 27 |
| Figura 22. Clasificadora densimétrica | 28 |
| Figura 23. Clasificadora SORTEX A | 29 |
| Figura 24. Clasificadora SEA ECHO Max | 29 |
| Figura 25. Proceso genérico de desarrollo de productos. | 30 |
| Figura 26. Matriz QFD | 33 |
| Figura 27. Esquema del ensamblaje final | 35 |
| Figura 28. Cálculo experimental de la densidad del maíz | 40 |
| Figura 29. Ángulo de tolva y ancho mínimo | 42 |
| Figura 30. Ángulo de reposo experimental..... | 42 |
| Figura 31. Ancho mínimo de boca para tres tipos de tolva..... | 43 |
| Figura 32. Corte transversal de la tolva | 45 |
| Figura 33. Vista en perspectiva de la tolva..... | 46 |
| Figura 34. Presiones en un silo | 48 |
| Figura 35. Presiones en la tolva | 49 |
| Figura 36. Presiones que actúan en la tolva..... | 53 |
| Figura 37. Simulación de tensiones y desplazamientos para espesor 1.5mm..... | 56 |
| Figura 38. Simulación del factor de seguridad | 57 |
| Figura 39. a) Bandas modulares POM y PA b) Bandas de acero inoxidable..... | 58 |
| Figura 40. Bandas sólidas | 59 |
| Figura 41. Disposición de granos sobre la banda | 59 |

| | |
|--|-----|
| Figura 42. Diseño inicial de banda transportadora | 62 |
| Figura 43. Volumen máximo de grano sobre la banda | 64 |
| Figura 44. Propuesta para dimensiones de la banda | 65 |
| Figura 45 Cargas en parada de servicio | 71 |
| Figura 46 Cargas en estado de funcionamiento para accionamiento de cola..... | 72 |
| Figura 47 Esquema del tambor motriz..... | 73 |
| Figura 48. Diagrama de cuerpo libre del tubo para los tambores motriz y de retorno..... | 75 |
| Figura 49 Diagramas de fuerzas cortantes y momento flector del tubo..... | 76 |
| Figura 50. Diagrama de cuerpo libre de la flecha de los tambores motriz y de retorno | 79 |
| Figura 51 Diagramas de fuerzas cortantes y momento flector de la flecha | 80 |
| Figura 52. Sistema tensor..... | 84 |
| Figura 53. Análisis estático de la placa..... | 85 |
| Figura 54. Estructura de la máquina | 86 |
| Figura 55. Análisis estático de la estructura | 87 |
| Figura 56. Caja de visión artificial..... | 88 |
| Figura 57. Ubicación de las cámaras del sistema | 89 |
| Figura 58. Cálculo de la altura en las cámaras..... | 89 |
| Figura 59. Salida del grano hacia la banda transportadora | 90 |
| Figura 60. Flujo del grano en la banda transportadora | 91 |
| Figura 61. Flujo del grano dentro del separador | 92 |
| Figura 62. Separador de granos | 92 |
| Figura 63. Sistema de eyección del grano | 93 |
| Figura 64. Unidad de mantenimiento FR EMC EW2000-02..... | 94 |
| Figura 65. Caudal vs Presión de trabajo | 95 |
| Figura 66. Placa del compresor | 97 |
| Figura 67. Comparación de los tiempos de ejecución del programa en el ordenador y Raspberry Pi..... | 102 |
| Figura 68. Controllino MINI | 105 |
| Figura 69. Electroválvula 3/2 EMC | 106 |
| Figura 70. Módulo LED Easy I6310..... | 106 |
| Figura 71. Cámara Greentree GT-V55 | 108 |
| Figura 72. Esquema de conexiones eléctricas 1/2 | 109 |
| Figura 73. Esquema de conexiones eléctricas 2/2 | 110 |
| Figura 74. Diagrama de flujo del sistema de clasificación | 111 |
| Figura 75. Compuerta para el paso de grano | 112 |
| Figura 76. Diagrama de flujo del algoritmo de programación..... | 114 |
| Figura 77. Imagen suavizada | 115 |
| Figura 78. Imagen binarizada | 116 |
| Figura 79. Operaciones morfológicas en la imagen..... | 117 |
| Figura 80. Ubicación del grano no deseado en la imagen en hileras. | 117 |
| Figura 81. Diagrama de bloques del sistema de control | 118 |
| Figura 82. Ventana principal | 120 |
| Figura 83. Ventanas secundarias..... | 121 |

| | |
|--|-----|
| Figura 84. Alarmas | 121 |
| Figura 85. Corte de perfiles de acero | 123 |
| Figura 86. Soldadura de la estructura | 123 |
| Figura 87. Taladrado de agujeros para placas..... | 124 |
| Figura 88. Pie de máquina | 124 |
| Figura 89. Corte por chorro de agua | 125 |
| Figura 90. Maquinado de los rodillos | 126 |
| Figura 91. Manufactura de la tolva 1/2..... | 127 |
| Figura 92. Manufactura de la tolva 2/2..... | 127 |
| Figura 93. Ducto de salida | 128 |
| Figura 94. Ensamble del tambor | 128 |
| Figura 95. Placa de tambor motriz..... | 129 |
| Figura 96. Placa del motor..... | 130 |
| Figura 97. Implementación del sistema tensor | 130 |
| Figura 98. Base para electroválvulas. | 131 |
| Figura 99. Ensamble de sistema neumático..... | 132 |
| Figura 100. Separador de granos final | 132 |
| Figura 101. Elaboración de tapas laterales | 133 |
| Figura 102. Elaboración del soporte para el computador | 133 |
| Figura 103. Conexión de las puntas del motor` | 134 |
| Figura 104. Organización de gabinete eléctrico | 135 |
| Figura 105. Parte exterior del gabinete | 136 |
| Figura 106. Cableado del gabinete eléctrico..... | 136 |
| Figura 107. Conexiones del sistema de visión..... | 137 |
| Figura 108. Implementación de la máquina completa | 137 |
| Figura 109. Salida de ducto corregida | 139 |
| Figura 110. Ranurado en los tambores | 139 |
| Figura 111. Forma del eyector | 140 |
| Figura 112. Forma del separador | 141 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|--------------------------|
| Tabla 1. Tipos de iluminación en visión artificial | 15 |
| Tabla 2. Tipos de cámara..... | 16 |
| Tabla 3. Necesidades del cliente..... | 32 |
| Tabla 4. Especificaciones técnicas..... | 32 |
| Tabla 5. Resultado de la matriz QFD..... | 34 |
| Tabla 6. Descripción funcional de los componentes..... | 35 |
| Tabla 7. Modelo de tabla comparativa..... | 37 |
| Tabla 8. Método de evaluación de características técnicas..... | 37 |
| Tabla 9. Características técnicas de materiales para tolvas | 38 |
| Tabla 10. Matriz de selección para material de la tolva..... | 39 |
| Tabla 11. Características del acero AISI 304..... | 39 |
| Tabla 12. Ángulo de rozamiento interno | 44 |
| Tabla 13. Propiedades de los materiales granulados..... | 50 |
| Tabla 14. Lámina de acero inoxidable AISI 304 | 55 |
| Tabla 15. Resultados de deformación en la simulación..... | 55 |
| Tabla 16. Características del maíz | 57 |
| Tabla 17. Comparativa entre materiales de revestimiento de bandas | 61 |
| Tabla 18. Matriz de selección de material de la banda | 61 |
| Tabla 19. Características de la banda 1PURB65/FW | 62 |
| Tabla 20. Coeficientes de fricción estática U_s para diferentes recubrimientos | (valores aproximados) 63 |
| Tabla 21. Dimensiones de rodillos Rotrans | 66 |
| Tabla 22. Factor C1 para tambor motriz..... | 67 |
| Tabla 23. Factor C3 para tambor motriz..... | 68 |
| Tabla 24. Velocidades lineales de cajas reductoras para el motor 63B-4..... | 70 |
| Tabla 25. Selección y cálculo de los factores de modificación para el tubo..... | 77 |
| Tabla 26. Selección y cálculo de factores de modificación para la flecha..... | 81 |
| Tabla 27. Propiedades del Rodamiento FAG 6205 | 84 |
| Tabla 28. Masa de los componentes..... | 86 |
| Tabla 29. Especificaciones técnicas EW2000-02 | 94 |
| Tabla 30. Datos técnicos de la electroválvula..... | 95 |
| Tabla 31. Características Motor Trifásico MOTIVE 63B-4 Serie DELPHI..... | 98 |
| Tabla 32. Características físicas y eléctricas conductores flexibles aislados..... | 99 |
| Tabla 33. Características de procesadores y controladores para el sistema de visión artificial... .. | 103 |
| Tabla 34. Tabla de selección para el sistema de control..... | 104 |
| Tabla 35. Características Controllino MINI | 105 |
| Tabla 36. Características del Módulo LED I6310 | 107 |
| Tabla 37. Características de la Cámara Greentree GT-V55..... | 108 |
| Tabla 38. Funciones de los botones | 120 |
| Tabla 39. Factores y niveles de prueba..... | 142 |

| | |
|---|-----|
| Tabla 40. Matriz ortogonal L8..... | 142 |
| Tabla 41. Matriz Anova | 143 |
| Tabla 42. Prueba experimental final | 144 |
| Tabla 43. Inversión total de la máquina clasificadora de granos | 146 |
| Tabla 44. Capacidad de procesamiento actual por cada proceso | 150 |
| Tabla 45. Costo del consumo mensual de la línea de producción del morocho | 152 |
| Tabla 46. Cálculo de VAN mediante flujo de caja | 156 |

RESUMEN

En la actualidad la industria alimentaria en nuestro país se encuentra en permanente desarrollo por lo que varias empresas optan por automatizar la mayoría de sus procesos sobre todo aquellos que son repetitivos o no poseen una eficiencia adecuada. En la Distribuidora de Granos DANHALU actualmente el proceso de clasificación de maíz es manual por lo que no resulta económicamente rentable la producción de morocho partido. Teniendo en cuenta estas premisas este proyecto tiene como objetivo fabricar una máquina automática que permita clasificar los granos de maíz que tengan diferente tonalidad a la requerida para garantizar la calidad en su producto final. Para cumplir con dicho objetivo se plantea un concepto en el cual los granos son colocados en una tolva, ésta abastece de producto a una banda transportadora en la cual los granos son encaminados hacia un sistema de visión por computador que consiste en un compartimiento artificialmente iluminado en el cual se capturan imágenes digitales con una cámara USB, dichas imágenes son procesadas con un algoritmo realizado en software libre que permite detectar la ubicación de los granos de diferente tonalidad dándoles una coordenada que, de acuerdo a su posición, activan válvulas electro neumáticas que expulsan dichos granos hacia otro compartimento. Este prototipo se desarrolla teniendo en cuenta parámetros de diseño mecatrónico y normas referentes a materiales para el manejo de alimentos, para su simulación se utilizará un programa CAD que permita corroborar el correcto funcionamiento del diseño.

Palabras clave:

- **BANDA TRANSPORTADORA**
- **VISIÓN ARTIFICIAL**
- **SOFTWARE LIBRE**

ABSTRACT

Nowadays food industry in our country is in permanent development so that several companies choose to automate most of their processes, especially those ones which are repetitive or don't have an adequate efficiency. At the present time, the classification process of grain corn in Distribuidora de Granos DANHALU is done manually so morocho partido production is not economically profitable. Taking into account these premises the present project aims to make an automatic machine which allows to classify the corn grain of the tone required to guarantee the quality in the final product. In order to get this objective, we propose a concept in which the grains are placed in a hopper, this one provides orderly the product on a conveyor belt. On this one the grains go through a computer vision system to get digital images using a USB camera, these images are processed through an algorithm using a free software in a way to detects the location of grains of different tonality in order to generate coordinates and according the position of each one active electro-pneumatic valves to eject those grains into another compartment. This prototype is developed taking into account the parameters of mechanical design and based on the standard of materials for the food handling, and we use a CAD program for its simulation, which allows corroborate that the design works correctly.

Key words:

- **CONVEYOR BELT**
- **COMPUTER VISION**
- **FREE SOFTWARE**

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1.1. Definición del proyecto

El presente proyecto tiene como objetivo clasificar granos de maíz duro seco en dos tonalidades, anaranjado y granos de color blanco que son la mayor parte de todo el producto (Figura 1), para lo cual se busca desarrollar una máquina con un sistema de visión artificial y un sistema neumático que agilice el proceso para disminuir tiempos de producción.



Figura 1. Mazorcas de maíz duro de diferente color

El proceso inicia con la recepción del producto en quintales de granos de maíz duro seco (Figura 2) adquiridos de varios distribuidores mayoristas provenientes de la costa del país, debido a la genética del maíz el producto se encuentra mezclado con granos de diferentes tonalidades: color crema y color anaranjado; siendo el principal y de mayor cantidad el maíz blanco, el cual es utilizado para la producción de morocho partido; mientras, el maíz anaranjado puede ser utilizado para balanceados.



Figura 2. Almacenamiento de los granos para procesar

La calidad del producto depende del uso de un mismo tipo de grano, por lo tanto, la máquina se colocará al inicio de la cadena de producción del morocho partido para asegurar la calidad del producto final y la eficiencia del proceso. El diseño de la máquina clasificadora por color (Figura 3) consta de una tolva de alimentación donde se descarga el producto a procesar, el mismo se desliza a través de un canal segmentado que distribuye los granos de forma uniforme a lo largo del canal hacia la banda transportadora.

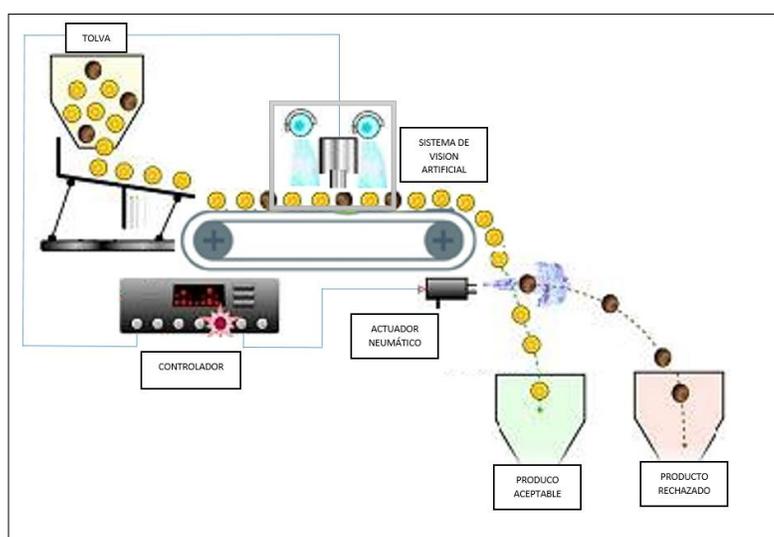


Figura 3. Diseño esquemático de la clasificadora de granos, Vista lateral

Una vez allí el grano es dirigido al sistema de visión artificial que realiza el procesamiento de imágenes capturadas por una cámara de video; mediante el software de procesamiento de imágenes OpenCV, desarrollado en C++ o Python, el sistema es capaz de localizar el producto a rechazar en determinado sector por medio de la binarización de la imagen (Figura 4) y con los datos recolectados enviar la señal de control para la activación del actuador neumático indicado.

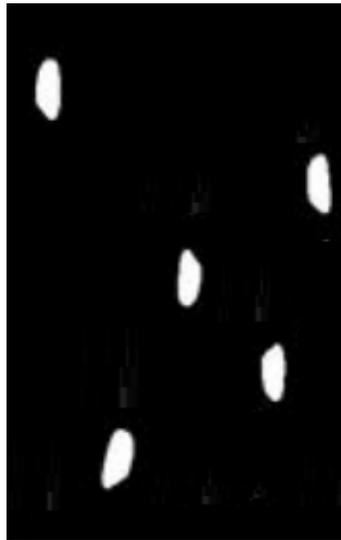


Figura 4. Binarización de la imagen de los granos a descartar

El programa realiza cálculos matemáticos para sincronizar el tiempo exacto en el que el actuador neumático debe activarse y ejecutar el soplado del grano. Al finalizar el recorrido de la banda el grano cae libremente. Aquí el producto aceptado continúa su recorrido por una tolva de descarga para su almacenamiento, mientras el producto rechazado es soplado con aire a presión dirigiéndolo hacia una tolva diferente. El grano clasificado se almacena en dos depósitos para la siguiente fase de procesamiento.

1.2. Antecedentes

La “Distribuidora de Granos y Harinas DANHALU” es una micro empresa ecuatoriana dedicada al procesamiento y distribución de granos y harinas a nivel de la ciudad de Quito

y sus valles. Los procesos que se realizan en su planta matriz son el tostado, trillado, triturado, molienda y procesamiento de granos. En una de sus líneas de producción se encuentra el procesamiento de maíz duro seco para obtener morocho partido, este proceso se ve afectado en la fase inicial ya que el grano de maíz es blanco, pero suele venir mezclado con granos de otras tonalidades que hace que el producto final no tenga la calidad que los clientes exigen.

En la actualidad el proceso se lo realiza manualmente por una persona la cual coloca el grano sobre un cedazo para proceder a su clasificación, dependiendo de qué tan mezclado este el maíz la capacidad de procesamiento es de apenas 25 kg por hora sin garantizar que este correctamente clasificado, lo cual hace que este proceso no sea económicamente rentable a la empresa. Para la producción de morocho partido la empresa cuenta con máquinas industriales encargadas de los procesos de pelado, triturado y procesado de morocho las cuales dejan el producto listo para su inspección final y empaçado.

1.3. Justificación e importancia

En torno al objetivo número 4 del Plan Nacional del Buen Vivir en el cual se pretende fortalecer las capacidades y potencialidades de la ciudadanía y en una de sus políticas promueve la interacción recíproca entre la educación, el sector productivo y la investigación científica y tecnológica para la transformación de la matriz productiva y la satisfacción de necesidades se enmarca este proyecto para aportar con la automatización de una empresa que actualmente tiene varios procesos artesanales que necesitan ser automatizados para generar una rentabilidad que le permita sobresalir en el mercado nacional y generar plazas de empleo en gran escala.

Este proyecto pretende colaborar al sector agroindustrial, directamente fabricando una máquina clasificadora de maíz duro seco mediante un sistema de visión artificial, será una máquina para la Distribuidora de granos y harinas DANHALU la cual ayudará a potenciar la elaboración de morocho partido en una de sus líneas de producción generando mayor rentabilidad a la empresa mejorando tiempos de ciclo y reduciendo costos de elaboración.

Al incluir una máquina clasificadora de granos en el inicio del proceso, la empresa podrá obtener una mejor rentabilidad de la venta y distribución del producto dado que en la actualidad el proceso se lo realiza manualmente presentando un alto grado de error y en tiempos muy elevados. Como proyecto futuro se propone que la empresa realice una automatización del proceso completo que incluiría el control en base a tecnología electrónica de los demás procesos y la carga y descarga automática del producto en las máquinas a través de elevadores de grano.

1.4. Área de influencia

Este proyecto ayudará a una micro empresa ecuatoriana la cuál es una de las tantas empresas que se dedican a la agroindustria en nuestro país, pero su desarrollo se ve truncado al no poseer maquinaria automatizada que facilite el procesamiento de sus productos a bajo costo para competir en el mercado.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

- Diseñar y construir una máquina clasificadora de maíz duro seco mediante un sistema de visión artificial para la Distribuidora de granos y harinas DANHALU.

1.5.2. Objetivos específicos

- Analizar diferentes sistemas de clasificación de granos por visión artificial mediante un estado del arte para determinar el sistema más óptimo.
- Generar un concepto adecuado que permita separar en 2 tipos de grano de acuerdo a su tonalidad realizando pruebas experimentales para realizar una selección del concepto con mayores prestaciones.

- Seleccionar los materiales a utilizar en la estructura de la máquina mediante un diseño CAD y un análisis de la norma de manejo de alimentos para la implementación de las diferentes partes que componen el sistema.
- Construir una máquina que clasifique granos de maíz separándolos mediante un sistema de actuadores neumáticos controlados para generar una mayor rentabilidad en la línea de producción de morocho partido.

1.6. Alcance

El prototipo de la máquina será capaz de clasificar alrededor de 100 kg por hora, separando dos tipos de producto de acuerdo a la tonalidad del grano: grano duro blanco y grano duro anaranjado. La caída del grano será de forma ordenada. La distribución del grano a lo largo de la banda será establecida por el diseño de la tolva de alimentación junto con el canal de deslizamiento, con el fin de direccionar el grano en áreas determinadas de la banda transportadora y optimizar así el soplado del grano.

El soplado del grano se ejecutará por un sistema neumático unido a una matriz de electro-válvulas a lo largo de la cortina del grano en descenso. La sincronización de los tiempos de caída hasta el soplado se realiza con el algoritmo de visión artificial.

El sistema de visión artificial trabajará en software libre: lenguaje de programación Python o C++, y librerías de procesamiento de imágenes OpenCV. Se realizará una distinción por color en base a los modelos RGB o HSV según la efectividad del modelo en la aplicación del proyecto. La distinción estará establecida por umbrales que representan rangos de color a los cuales los píxeles de la imagen pertenecen o no, con ello se logrará una binarización de la imagen para identificar el sector de la banda en que se encuentren.

Por lo tanto, la clasificación de granos por color está determinada por un sistema de alimentación ordenado, la sectorización del grano con un sistema de visión artificial, la sincronización de la caída del grano y la separación por soplado neumático en diferentes compartimientos.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

El desarrollo industrial de las empresas consiste principalmente en la capacidad de aumentar la producción a menor costo, junto con el cumplimiento de estándares de calidad exigidos en el producto final, al tener un mercado cada vez más competitivo, para mejorar dichos aspectos las pequeñas empresas buscan fortalecer sus procesos mediante la automatización.

Algunos de los procesos de la industria agrícola implican la discriminación entre los tipos de materia prima, como es el caso de los granos de maíz seco debido al uso que le damos a cada tipo de grano. La clasificación realizada por la persona se vuelve un trabajo tedioso tomando en cuenta dos factores:

- La naturaleza del producto. El grano es pequeño y viene en grandes cantidades.
- El grado de concentración. La persona requiere mucha concentración por largos períodos de tiempo para cumplir correctamente el trabajo.

Los sistemas de clasificación óptica suplen las necesidades mencionadas y son ideales para discriminar: color, tamaño, forma, entre otros; por lo que brindan una óptima solución al problema con la ventaja de aumentar la producción y tener un desempeño constante.

En el presente capítulo: se definen conceptos básicos de visión artificial y su funcionamiento, se describe la realidad actual de la Mecatrónica en la agroindustria en nuestro país, se cita máquinas similares disponibles en el mercado y se hace referencia a la norma utilizada para los materiales en contacto con alimentos.

2.1. Introducción a los sistemas de visión artificial

La visión artificial o visión computacional es un proceso que busca el empleo de imágenes digitales extraídas del mundo real para obtener determinadas propiedades del entorno útiles al usuario. (Marr, 1982) Está inspirada en la visión humana y surge del desarrollo de la inteligencia artificial; se ayuda de técnicas adecuadas con el propósito de analizar el entorno para tomar decisiones sin la necesidad de asistencia.

Los sistemas de visión artificial son cada vez más usados en los diferentes campos de la ciencia debido a su capacidad de procesar información relevante en cada área de estudio. Casi todas las disciplinas de la ciencia tienen sub-disciplinas encargadas de recolectar información de los fenómenos de estudio en forma de imágenes como se muestra en la Figura 5 por lo que en el presente trabajo se muestra solo una de sus posibles aplicaciones. (Bovik, 2009)

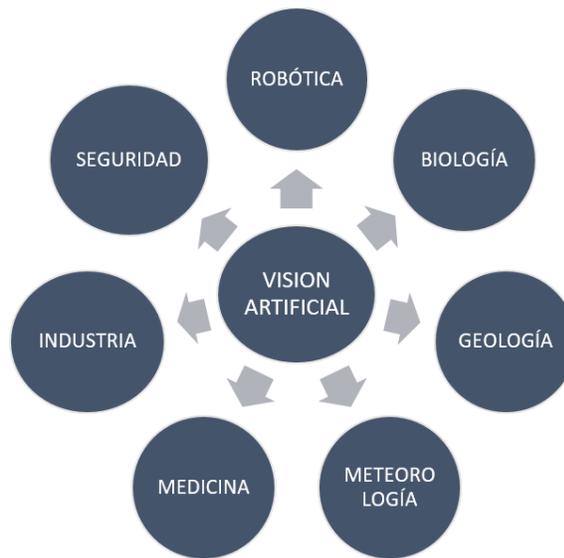


Figura 5. Campos de aplicación de la visión artificial

Los avances computacionales y el desarrollo de las cámaras para la obtención de imágenes, así como su diversidad, hacen de los sistemas de visión artificial flexibles, adaptativos y de menor coste para el usuario.

2.1.1. Fundamentos de la imagen digital

Las imágenes digitales a color son generadas por cámaras a partir de la luz del ambiente, dichas imágenes son receptadas directamente en el computador y están constituidas por una matriz de elementos llamados píxeles (Picture element) que contienen tres valores numéricos de 0 a 255 denominados RGB, correspondientes a los colores: rojo, verde y azul.

El cero significa la ausencia del color y 255 la máxima presencia. (Gonzalez & Woods, 2008).

El color que adquiere un pixel dentro de la imagen digital depende de tres componentes:

- El color de la luz de la fuente
- El material de la superficie
- La sensibilidad de la cámara

En algunos casos se trabaja con la intensidad del color, que es la cantidad de luz emitida por ese punto en la imagen. Se procura normalizarla al máximo para mantenerse en el rango de 0 a 255. La intensidad viene dada por:

$$I_C = (R + G + B) * \frac{255}{\max(R + G + B)}$$

2.1.2. Color de la luz

La luz es una forma de energía definida dentro de un modelo ondulatorio, utilizado en procesamiento digital de imágenes; ésta se encuentra determinada completamente por dos propiedades:

- Amplitud y,
- Longitud de Onda [λ] periodicidad con la que se repite la señal

La característica fundamental de la luz es la longitud de onda, debido a que determinará si la onda electromagnética es o no visible al ojo humano. (Vélez Serrano, 2003). El ojo humano solo puede percibir un subconjunto de estas componentes espectrales llamadas el espectro visible (Figura 6). Las energías visibles son las que se encuentran dentro del rango de 400 a 700 (nm) en su longitud de onda $\lambda(nm)$.

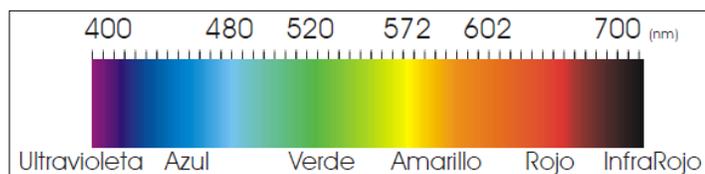


Figura 6. Colores de acuerdo a la Longitud de Onda λ (nm)

Fuente: (Vélez Serrano, 2003, pág. 3)

Dentro de este intervalo están todos los colores que pueden ser vistos, definiendo color como: la cantidad de energía reflejada por el objeto que puede ser observada por el ojo humano y depende de la longitud de onda. Los colores presentes en el mundo real (Figura 7) no tienen un valor fijo dentro del espectro ya que la energía reflejada sufre pequeñas fluctuaciones, además se pueden notar seis regiones dentro del espectro: violeta, azul, verde, amarillo, naranja y rojo; que no desaparecen abruptamente ni por completo, sino que se mezclan suavemente con los siguientes.

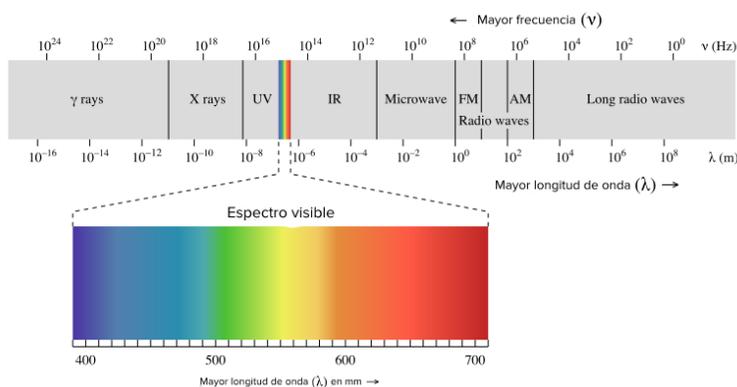


Figura 7. Espectro Electromagnético

Fuente: (KHANACADEMY, 2015)

Actualmente es posible capturar imágenes que se encuentren fuera del espectro visible, haciéndolas visibles mediante sensores especializados, por ejemplo, cámaras térmicas (Figura 8). La descripción de los objetos se centra en su apariencia visual dentro de la imagen donde las técnicas de visión por computador son aplicables independientemente del origen de la imagen.

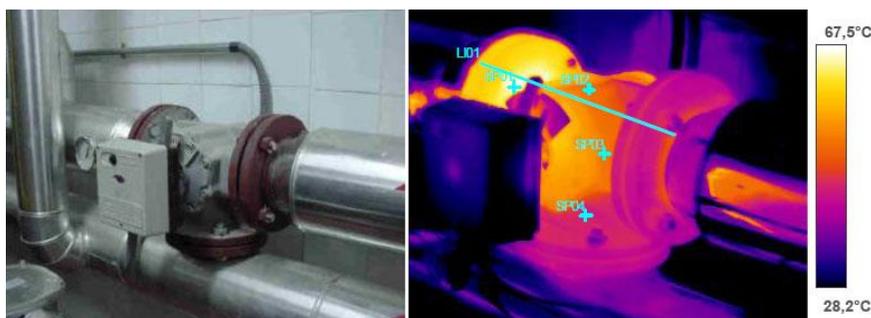


Figura 8. Inspección térmica de tuberías.

Fuente: (Termalia, 2015)

2.1.3. Material de la superficie

Todo material tiene la capacidad de absorber y reflejar la luz que incide sobre él. El tipo de material de la superficie determina las longitudes de onda que son reflejadas y las que se absorben, debido a los pigmentos de la superficie (Figura 9).



Figura 9. Reflejo de la luz blanca de diferentes materiales

Fuente: (Caleidoscopio, 2014)

La luz reflejada por el material, es decir el color, es un porcentaje de la luz que incide sobre el mismo, dicho porcentaje se representa como una función de la longitud de onda $S(\lambda)$. Así mismo el color de la fuente de luz viene dado por una función $I(\lambda)$.

Teniendo en cuenta estas dos funciones, la luz que finalmente llega a la cámara es un producto matricial de estas dos funciones.

$$L(\lambda) = S(\lambda) * I(\lambda)$$

Por ejemplo, un material normalmente azul, con luz blanca, iluminado con una luz amarilla como resultado en la imagen de la cámara representará componentes de color verde. (Gonzalez & Woods, 2008)

2.1.4. Sensibilidad de la cámara

Las cámaras estándar CCD (Charge Coupled Devices) tienen tres sensores sensibles a cierta longitud de onda, la sensibilidad de cada sensor viene dado por una función $R(\lambda), G(\lambda), B(\lambda)$, las cámaras intentan cubrir todo el espectro visible con estos tres sensores (Figura 10). Por lo tanto, los valores finales de RGB que se asigna a cada pixel vienen dado por:

$$(R, G, B) = \left(\int I(\lambda)S(\lambda)R(\lambda) d\lambda, \int I(\lambda)S(\lambda)G(\lambda) d\lambda, \int I(\lambda)S(\lambda)B(\lambda) d\lambda \right)$$

Los sensores de color (Red, Green, Blue) están basados en tecnología de silicio y filtros específicos en el espectro.

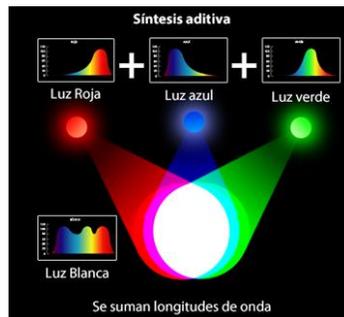


Figura 10. Sectores del espectro que cubren los sensores RGB

Fuente: (Sanchez, 2014)

Esta tecnología está inspirada en el sistema de visión humano con tres tipos de células sensibles al color llamados conos. Los conos son células foto receptoras ubicadas en la retina y las hay de tres tipos: L, M y S. Se diferencian por las longitudes de onda a las que son sensibles (Long, Medium, Short).

2.1.5. Representación de la imagen

Las imágenes digitales están formadas por un conjunto de píxeles que contienen información del mundo físico. Esta información del píxel está representada por un arreglo $T(R, G, B)$ con tres valores que corresponden a los colores: rojo, verde, azul; cuya combinación puede reproducir fielmente el color que se percibe con la vista, dentro del mundo digital. Entonces se puede decir que, se puede extraer la información del píxel conociendo su ubicación dentro de la imagen en un tiempo determinado.

El espacio físico de la imagen donde se encuentra el píxel de interés viene dado por una matriz $P(n1, n2)$ con dimensión $N1$ y $N2$, dicha matriz tiene similitud con un sistema cartesiano de coordenadas y se puede recorrer la imagen para procesarla y reconstruirla (Figura 11).

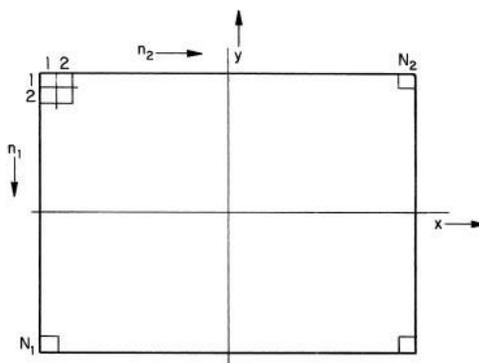


Figura 11. Ubicación de píxeles en la imagen digital

Fuente: (Pratt, 2001, pág. 122)

Junto con los datos de píxel la matriz de la imagen digital está dada por:

$$P(n1, n2) \begin{bmatrix} T_{1,1}(R, G, B) & \cdots & T_{1,N2}(R, G, B) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ T_{N1,1}(R, G, B) & \cdots & T_{N1,N2}(R, G, B) \end{bmatrix}$$

Con el conocimiento del modelo matricial es posible aplicar operaciones matemáticas que modifiquen a la imagen a fin de obtener características relevantes como la forma, el

tamaño e incluso la posición del objeto respecto a una referencia, esto último es lo que se busca principalmente. Una vez obtenida la posición del grano dentro del sistema, se procede a su extracción.

2.1.6. Elementos de un sistema de visión artificial

Los sistemas de visión artificial varían de acuerdo a su aplicación, sin embargo, un análisis desde el punto de vista del hardware y software describen la funcionalidad general de los sistemas como un factor común entre los diferentes modelos. El hardware del sistema, independientemente del problema de análisis, consta de tres elementos: fuente de luz, cámara y objeto (Figura 12). (Sobrado, 2003)

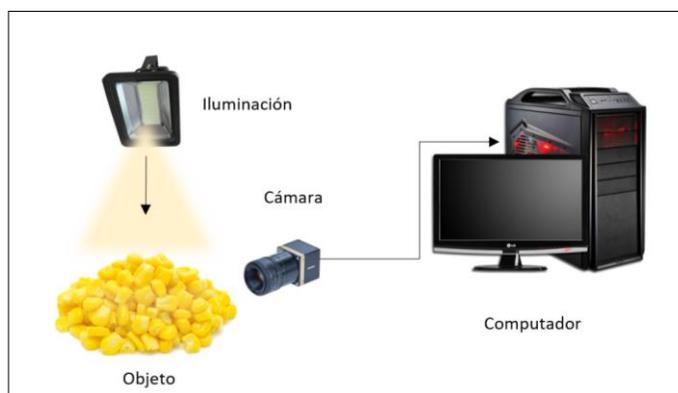
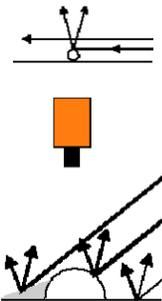
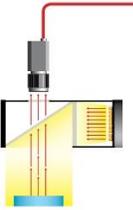
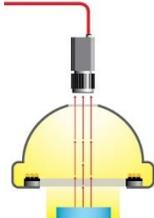


Figura 12. Hardware del sistema de visión artificial

- *Fuente de luz:* Se refiere al origen de la luminosidad en el medio donde se encuentra el objeto, puede provenir de forma natural o artificial

Tabla 1.

Tipos de iluminación en visión artificial

| ILUMINACIÓN | DESCRIPCIÓN | ESQUEMA |
|--|--|---|
| POSTERIOR (BACKLIGHT) | Permite resaltar contornos y perforaciones pasantes, que permiten la visualización de la silueta del objeto |  |
| FRONTAL OBLICUA Y DIRECCIONAL | Maximiza el contraste entre los relieves y las caras planas del objeto. |  |
| FRONTAL AXIAL (DIFUSA) | Ilumina de forma uniforme superficies reflectivas para realzar detalles y crear contraste. |  |
| DÍA NUBLADO (CLOUDY DAY ILUMINATION, CDI) | Proporciona iluminación difusa en la misma dirección que el eje de la cámara, sistema con más prestaciones de iluminación difusa. |  |
| CAMPO OSCURO (DARK FIELD) | Luz directa de alta intensidad con ángulo pequeño respecto de la superficie donde descansa, en superficies con elevaciones y hendiduras se produce zonas brillantes. |  |

Continúa siguiente pág.

ARRAY DE LUCES

Luz que directamente incide en el objeto, resaltando relieves, fisuras y que produce sombras definidas



- *Objeto de análisis:* El objeto de análisis puede ser de cualquier naturaleza, y depende del campo de estudio al que se aplica la tecnología. Se seleccionan del objeto, las características de interés para: discriminarlo en la imagen, analizar los fenómenos que suceden sobre el mismo y reaccionar a los cambios o irregularidades identificados por el sistema.
- *Cámara:* Es el sensor encargado de captar la luz reflejada por el material de estudio a través de sensores especializados, envía la información análoga o digital hacia un dispositivo para procesarla. En el caso de las cámaras digitales el proceso de digitalización de la imagen se lo realiza internamente, mientras que lo concerniente a la señal análoga necesita un conversor A/D.

Tabla 2.
Tipos de cámara

| CÁMARA | DESCRIPCIÓN | APLICACIÓN |
|-----------------------|--|--|
| MATRICIALES | El sensor cubre un área, produciendo una imagen de área hasta completar la imagen total. | Varias aplicaciones de alta resolución y que requieran estabilidad en la imagen. |
| LINEALES | Construye la imagen línea a línea, el objeto se desplaza con respecto a la cámara. | Inspección de materiales fabricados en continuo: papel, tela, planchas metálicas, etc. |
| ALTA VELOCIDAD | Utilizan diferentes métodos para aumentar las imágenes por segundo que pueden capturar | Pruebas de choque, balística, control de turbulencia, biomecánica, etc. |

Continúa siguiente pág.

| | | |
|-------------------------------|--|---|
| 3D | Hace medidas de formas en 3D con un láser de línea que mide profundidad. | Drones, exploración, mapeo 3D, medida de formas irregulares, interacción por gestos. |
| INTELIGENTES | Se acompañan de un procesador, memoria y sistema de comunicación (Puerto Serial, I/O, Ethernet) | Inspección de empaçado, verificación de ensamblado, lectura de códigos |
| INFRARROJAS / TÉRMICAS | Capturan fuera del espectro visible, con longitudes de onda generalmente de 2 a 14 (um) | Uso militar, cartografía, mantenimiento predictivo, inspección de construcciones, control de temperatura. |
| MULTIESPECTRALES | Combinación del espectrógrafo con una cámara matricial. Tiene cobertura espectral desde el ultravioleta hasta el infrarrojo. | Control de calidad en LCD, paneles fotovoltaicos y materiales semiconductores, Alimentos, Biología, etc. |

- *Computador:* Es donde está programado el software y corre el programa para realizar el análisis de las imágenes junto con la toma de decisiones de acuerdo a la aplicación.

2.1.7. Etapas de un proceso de visión artificial

El software del sistema de visión artificial tiene la capacidad de realizar: adquisición de imágenes, procesamiento de imágenes, segmentación, almacenamiento de información, detección de objetos y toma de decisiones, (Figura 13). (Sobrado, 2003)

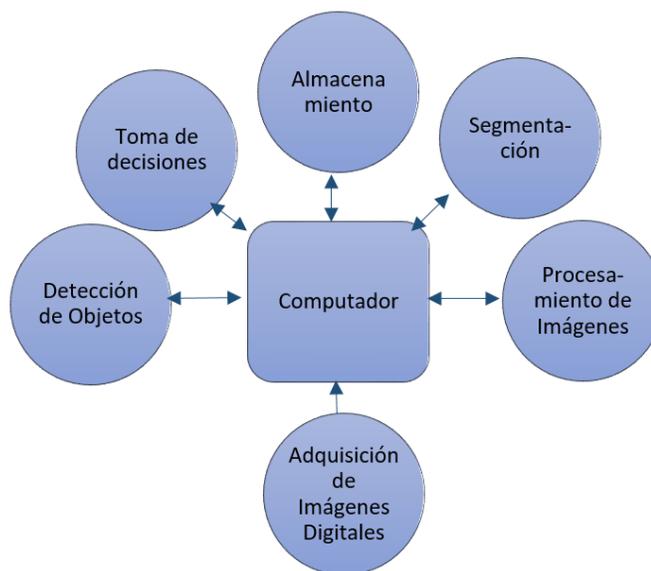


Figura 13. Software de un sistema de visión artificial

Las diferentes etapas no son indispensables para el correcto funcionamiento de un sistema de visión artificial, y su orden es de libre elección del programador según los requerimientos de la aplicación. La utilización de éstos está determinada por el criterio del usuario y la robustez del sistema; por ejemplo, si la calidad de la imagen es buena y el ruido es mínimo, se puede no requerir un procesamiento de imágenes para mejorarla.

- **Adquisición de Imágenes Digitales:** Se refiere a la captura de la imagen digitalizada mediante un sensor óptico: cámara fotográfica o de video. Incluye, de ser necesario, un convertor análogo-digital donde la imagen que se genera se compone de una matriz 2D de píxeles.
- **Procesamiento de Imágenes:** Uso de varias técnicas para tratar digitalmente a la imagen receptada, se enfocan en actuar dentro de tres áreas principales:
 - Mejoramiento: perfección de la apariencia para la percepción humana o conversión del formato de la imagen al más adecuado para el procesamiento
 - Restauración: modificación de la imagen para compensar errores de visualización

- **Modificación Geométrica:** magnificación, alineamiento, rotación, disminución del tamaño de la imagen, etc. (Pratt, 2001)

La flexibilidad de estas técnicas es suficiente para eliminar ruidos de mediano impacto, sin embargo, las condiciones en las que trabaje el sistema pueden hacer que se requiera el uso de otros filtros y técnicas de procesamiento como las que se muestran en la Figura 14.

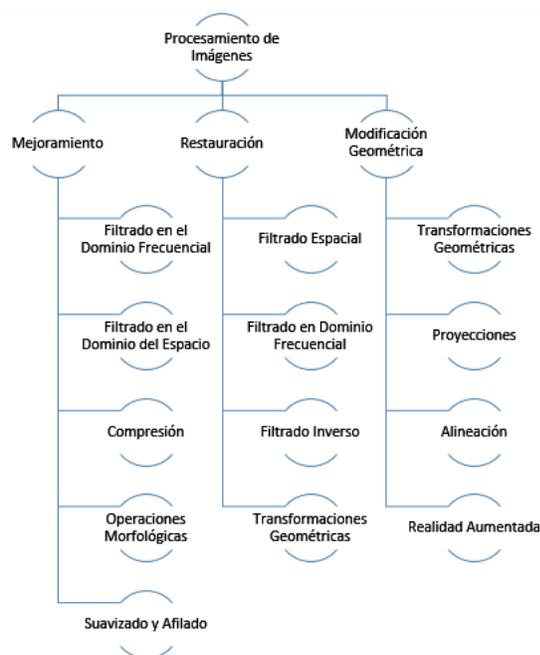


Figura 14. Técnicas de Procesamiento de imágenes

- **Segmentación:** Es una etapa donde se discriminan unos objetos de otros (Figura 15), según el criterio del programador, por ejemplo: tamaño, color, forma, etc. Sirve para focalizar el estudio en los objetos de interés. Algunas técnicas empleadas para realizar la segmentación se describen en la Figura 16.

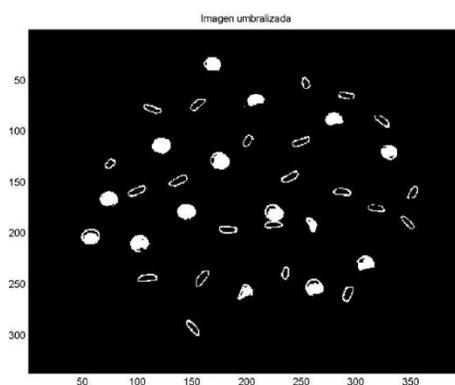


Figura 15. Imagen Binaria de granos de arroz por el método de umbral

Fuente: (Amchite & Moreira, 2004)



Figura 16. Técnicas de Segmentación

- **Almacenamiento:** Los datos de imágenes y video son guardados en un espacio de memoria para su posterior estudio y/o control de calidad.
- **Detección de Objetos:** Son técnicas que permiten identificar un determinado objeto dentro de la imagen independientemente de su tamaño, orientación y color (Figura 17). En muchas ocasiones se vale de la segmentación para focalizar su

aplicación. Se agregan ventanas para mostrar los resultados. (Gonzalez & Woods, 2008).

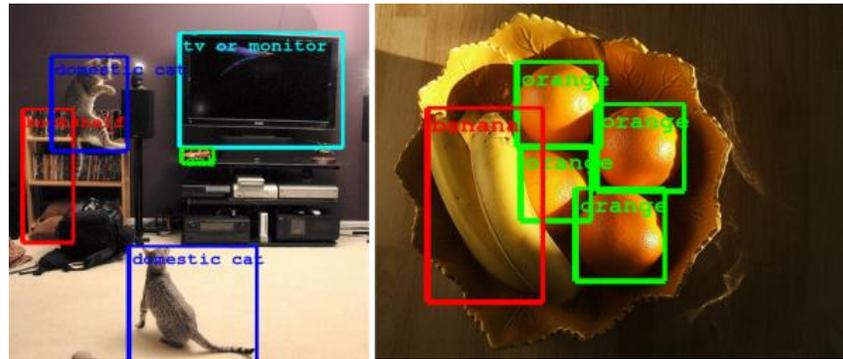


Figura 17. Encasillamiento de objetos

Fuente: (Hidalgo, 2014)

- **Toma de Decisiones:** De acuerdo a la programación, la máquina que utiliza visión artificial es capaz de reaccionar a los cambios externos identificados con el sistema. Esta etapa se encarga de enviar señales a las salidas de la máquina como: alarmas, indicadores de pantalla, motores, actuadores, etc. También se puede enviar información a un servidor, a fin de que la persona tome la decisión de acuerdo a su criterio.

2.2. Sistemas Mecatrónicos en la Agroindustria

La definición de mecatrónica ha evolucionado durante las últimas décadas, siempre intentado dar un concepto más claro de todo lo que abarca su campo de estudio, entre las definiciones más claras se tiene una publicada en la revista IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, en la cual uno de los autores la definió como: “La combinación sinérgica de la ingeniería mecánica de precisión, control electrónico y los sistemas inteligentes en el diseño de productos y procesos de manufactura” (Harashima, Tomizuka, & Toshio, 1996).

Años más tarde otro autor define que “un sistema mecatrónico no solo es la unión de sistemas electrónicos y mecánicos, y es más que sólo un sistema de control; es una integración completa de todos ellos en la cual existe un enfoque concurrente al diseño”

(Bolton, 2002), y sin lugar a duda esta integración de varias ramas del conocimiento hace que la fabricación de productos, procesos o sistemas sea mucho más eficiente en la actualidad.

La creación de productos inteligentes para satisfacer las necesidades humanas y la automatización de la maquinaria existente para mejorar la productividad de las mismas han sido las principales aplicaciones que hoy en día se le ha dado a esta disciplina, por lo que, desde la medicina, la industria mecánica, manufacturera, farmacéutica, automovilística, e incluso la alimentaria se han visto beneficiados por los avances tecnológicos que competen a esta disciplina.

Actualmente el sector agroindustrial entró en una nueva era, ya que de una forma innovadora los sistemas mecatrónicos han conseguido incrementar el rendimiento y la productividad de todo este sector, dándole así a los agricultores, agro ganaderos, e incluso a empresas dedicadas al procesamiento de productos alimenticios no solo una mayor rentabilidad económica sino una solución a la cantidad de problemas que tenían al realizar procesos manuales en el campo.

Un ejemplo de aplicación de la Mecatrónica en la agroindustria es el cuidado de los cultivos, los sistemas de visión artificial han sido de gran ayuda para detectar anomalías, plagas en frutos y hortalizas como las que se muestran en la Figura 18.



Figura 18. Planta afectada por una plaga

Fuente: (Marnetto, 2015)

En la revista Colombian Conference on Robotics and Automation publicada en la IEEE se muestra un artículo denominado “Procesamiento de imágenes para la identificación de plagas en los cultivos de espinaca” en el cual se realiza una investigación sobre diferentes técnicas de visión por computador para la detección de todo tipo de irregularidades en los cultivos. “Cuando una planta está afectada ya sea por una plaga o una enfermedad, se puede observar en la hoja o en el fruto, se evidencia un color diferente, las hojas marchitas o carcomidas, el fruto este podrido entre otras, ocasionando que el cultivo se vea afectado y generando pérdidas.” (Padilla, Pulido, & Leonardo, 2017). Como conclusión de esta investigación se desarrolla un algoritmo basado en la segmentación de imágenes, extracción de características y el reconocimiento de patrones para dar tratamiento a los cultivos en prueba.

Otra clara aplicación se tiene en los invernaderos, donde con la ayuda de varios sensores y actuadores se puede crear el ambiente ideal para que los cultivos se desarrollen de forma adecuada y generen una mejor rentabilidad. En la Figura 19 se observa una interfaz para el usuario la cual puede monitorear diferentes variables de un invernadero de una forma más eficiente y precisa para que el producto final cumpla con los requisitos de calidad que el consumidor final exige.



Figura 19. Interfaz de usuario en un invernadero

Fuente: (hermisan, 2015)

Si se considera a los sistemas mecatrónicos a gran escala, un claro ejemplo se puede observar en la Figura 20 en la cual muestra un sistema de ordeño y gestión global de la explotación de una empresa dedicada al sector lácteo en la cual se utiliza brazos robóticos y mecanismos de ordeño en trabajos rutinarios como lavado de pezones, colocación de pezoneras, y desinfección. Además, este sistema permite registrar parámetros como producción, calidad y salud en una base de datos para procesarlos y analizarlos de modo que el personal de la empresa pueda gestionar y tomar mejores decisiones.



Figura 20. AMR™ de DeLaval

Fuente: (DeLaval, 2010)

Si bien la modernización limita el uso de mano de obra, para que un sistema mecatrónico tenga un correcto funcionamiento es imprescindible la participación de los operarios.

2.3. Normativa de materiales en contacto con alimentos

Al momento de trabajar con alimentos hay que tener en cuenta que, en su etapa de producción, procesamiento, almacenamiento, y preparación estos entran en contacto con muchos materiales los cuales deben cumplir diferentes estándares que garanticen la calidad del producto final y que además sus propiedades eviten un efecto negativo en la salud de los consumidores. De acuerdo al reglamento (CE) No.1935/2004 se requiere que estos materiales no:

- liberen sus componentes a los alimentos en niveles que resulten perjudiciales para la salud humana,
- modifiquen la composición, sabor y olor de los alimentos de forma inaceptable.

A nivel nacional la Agencia Nacional de Regulación, Control y Vigilancia Sanitaria ARCSA, es el organismo regulador encargado de controlar que todas las industrias cumplan con lo dispuesto en la norma técnica sustitutiva de buenas prácticas de manufactura para alimentos procesados.

En esta norma en el capítulo 1 sobre el ámbito de aplicación dispone que la norma es aplicable a los establecimientos donde se procesen, envasen, almacenen, y distribuyan alimentos, también a los equipos, utensilios y personal que tengan contacto con el producto, y a todas las actividades que competen la fabricación del producto en cuanto a maquinaria y materias primas.

En el ámbito de las instalaciones y requisitos de buenas prácticas de manufactura se tiene varias recomendaciones de cómo deben estar diseñados los establecimientos donde se va a producir y manipular alimentos. Por ejemplo, en el artículo 5 se tiene que el diseño debe ofrecer protección contra polvo, materias extrañas, insectos, roedores, aves y otros elementos del ambiente exterior y que mantenga las condiciones sanitarias apropiadas según el proceso brindando todas las facilidades para cumplir con ello. En otros artículos realizan recomendaciones de cómo tener los pisos, paredes, techos y drenajes, de cómo manejar la iluminación, la calidad del aire y ventilación, las instalaciones eléctricas y redes de agua, etc., en sí este capítulo explica como diseñar de mejor forma el establecimiento donde se fabricará productos alimenticios. En lo referente al capítulo II de la norma sobre los equipos y utensilios se tiene que el artículo 8 específicamente recomienda que “La selección, fabricación e instalación de los equipos deben ser acorde a las operaciones a realizar y al tipo de alimento a producir” (ARCSA, 2015), por lo tanto, los materiales a utilizar para manipular alimentos dependerán de las necesidades de producción y cumplirán los siguientes requisitos:

- Construidos con materiales tales que sus superficies de contacto no transmitan sustancias tóxicas, olores ni sabores, ni reaccionen con los ingredientes o materiales que intervengan en el proceso de fabricación;
- En aquellos casos en los cuales el proceso de elaboración del alimento requiera la utilización de equipos o utensilios que generen algún grado de contaminación se deberá validar que el producto final se encuentre en los niveles aceptables;
- Debe evitarse el uso de madera y otros materiales que no puedan limpiarse y desinfectarse adecuadamente, cuando no pueda ser eliminado el uso de la madera debe ser monitoreado para asegurarse que se encuentra en buenas condiciones, no será una fuente de contaminación indeseable y no representará un riesgo físico;
- Sus características técnicas deben ofrecer facilidades para la limpieza, desinfección e inspección y deben contar con dispositivos para impedir la contaminación del producto por lubricantes, refrigerantes, sellantes u otras sustancias que se requieran para su funcionamiento;
- Cuando se requiera la lubricación de algún equipo o instrumento que por razones tecnológicas esté ubicado sobre las líneas de producción, se debe utilizar sustancias permitidas (lubricantes de grado alimenticio) y establecer barreras y procedimientos para evitar la contaminación cruzada, inclusive por el mal uso de los equipos de lubricación;
- Todas las superficies en contacto directo con el alimento no deben ser recubiertas con pinturas u otro tipo de material desprendible que represente un riesgo físico para la inocuidad del alimento;
- Las superficies exteriores y el diseño general de los equipos deben ser construidos de tal manera que faciliten su limpieza;
- Las tuberías empleadas para la conducción de materias primas y alimentos deben ser de materiales resistentes, inertes, no porosos, impermeables y fácilmente desmontables para su limpieza y lisos en la superficie que se encuentra en contacto con el alimento. Las tuberías fijas se limpiarán y desinfectarán por recirculación de sustancias previstas para este fin, de acuerdo a un procedimiento validado;

- Los equipos se instalarán en forma tal que permitan el flujo continuo y racional del material y del personal, minimizando la posibilidad de confusión y contaminación;
- Todo el equipo y utensilios que puedan entrar en contacto con los alimentos deben estar en buen estado y resistir las repetidas operaciones de limpieza y desinfección. En cualquier caso, el estado de los equipos y utensilios no representará una fuente de contaminación de alimento. (ARCOSA, 2015)

2.4. Tecnologías y máquinas existentes

En la industria alimentaria existen un sin número de máquinas y tecnologías particulares para cada aplicación, en cuanto a clasificadoras de granos se tiene máquinas que utilizan diferentes conceptos de acuerdo al tipo de producto considerando la forma, el color, la textura y el tamaño del mismo.

Uno de estos conceptos de clasificación es la utilización de tamices de diferente medida para clasificar granos por su tamaño, de acuerdo al modelo de las máquinas se puede tener varias salidas de productos con distintos tamaños dependiendo las necesidades el usuario. Conceptos mejorados como el que se muestra en la Figura 21 incorporan mecanismos de limpieza de tamices en operación con lo que se consiguen una capacidad máxima constante.



Figura 21. Clasificadora por tamices

Fuente: (Tecno Merced, 2012)

Un concepto más complejo de clasificación es en base a la densidad del grano para lo cual en el mercado se tienen mesas densimétricas como la que muestra en la Figura 22 cuyo principio permite clasificar granos que tienen similar granulometría, trabaja en base a movimientos elípticos en una mesa con diferentes inclinaciones la cual se ve afectada por aire desde la parte inferior. Son utilizadas para la clasificación de maíz, trigo, soya, frejol, café etc., y permite conseguir elevadas capacidades de producción.

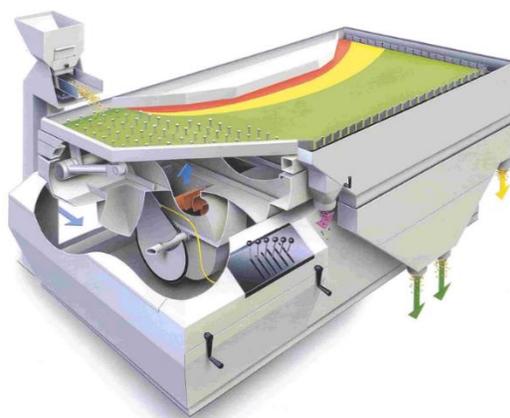


Figura 22. Clasificadora densimétrica

En cuanto a clasificadoras por medio de sistemas de visión artificial cada vez aparecen mejores tecnologías, por ejemplo, la tecnología PROfile™ propiedad de BUHLER, consigue detectar los defectos y materiales extraños del mismo color que el producto bueno y a la vez puede clasificar objetos por tamaño, color y forma. Otra tecnología como la InGaAs puede localizar defectos imperceptibles en el espectro visible, garantizando una mejor separación de producto bueno del material extraño con el mismo color. (BUHLER, 2017)



Figura 23. Clasificadora SORTEX A

Fuente: (BUHLER, 2017)

Actualmente en el mercado se encuentran sistemas de clasificación más sofisticados como por ejemplo la clasificadora por resonancia SEA ECHO Max mostrada en la Figura 24, que permite expulsar cuerpos extraños del producto, ya que cada material produce una resonancia diferente, incluso un mismo grano con cáscara y sin cáscara desarrolla una frecuencia distinta por lo que sin la necesidad de sensores ópticos ni iluminación puede separar piedras, metales y vidrio. (CIMBRIA, 2017).



Figura 24. Clasificadora SEA ECHO Max

Fuente: (CIMBRIA, 2017)

CAPÍTULO III

DESARROLLO DEL PRODUCTO

El éxito en la elaboración de un producto requiere que el mismo cumpla las necesidades propuestas por el cliente y cuya construcción sea económica y técnicamente viable con las tecnologías disponibles en la actualidad. El presente capítulo se basa en la metodología para el desarrollo de productos propuesta por (Ulrich & Eppinger, 2013) la cual integra varias disciplinas, como la mercadotecnia, el diseño de ingeniería y la manufactura, en un conjunto de actividades que permiten que el producto final sea de calidad, satisfaga las necesidades del cliente y sea competente en el mercado.

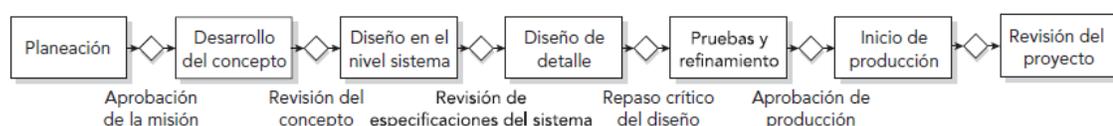


Figura 25. Proceso genérico de desarrollo de productos.

Fuente: (Ulrich & Eppinger, 2013)

El proceso genérico de desarrollo de producto se muestra en la Figura 25 y se define como “la secuencia de pasos o actividades que una empresa utiliza para concebir, diseñar y comercializar un producto” (Ulrich & Eppinger, 2013). La etapa de planeación consiste en identificar una oportunidad para crear un producto en base a una necesidad, en el presente proyecto en la Distribuidora de granos DANHALU se encuentra la oportunidad de mejorar el proceso manual de clasificación de granos de maíz, planteando la implementación de una clasificadora automática por visión artificial. En el CAPÍTULO I y

CAPÍTULO II se detallan el objetivo del producto, sus limitaciones y se recopila información de las tecnologías existentes en la actualidad.

La etapa de desarrollo del concepto busca seleccionar la mejor alternativa en base a las necesidades del cliente. El diseño a nivel sistema esquematiza un concepto seleccionado, y lo divide en subsistemas. El diseño a nivel detalle especifica todos los elementos a ser diseñados o dimensionados en base a estándares y normas vigentes, con el objetivo de simplificar procesos de elaboración, reduciendo costos de manufactura y ensamblaje sin dejar de lado un diseño responsable para el medio ambiente. La fase de pruebas y refinamiento consiste en ajustar las variables del producto final a fin de garantizar el correcto funcionamiento en las condiciones de trabajo propias de la empresa. En la fase de inicio de producción se evalúa los resultados del prototipo fabricado.

3.1. Desarrollo del concepto

De acuerdo a (Ulrich & Eppinger, 2013) el desarrollo de conceptos se aplica para obtener una alternativa de solución al problema planteado, basándose en la identificación de las necesidades del cliente para generar, seleccionar y probar un concepto adecuado. Los autores recomiendan realizar una matriz de necesidades vs. métricas para obtener valores ideales de las especificaciones que tendrá el producto final.

Otra vía para asegurar la calidad de la máquina es plantear una matriz QFD (Quality Function Deployment), metodología avalada internacionalmente, con la cual se pondera cada necesidad en base a su importancia y los requerimientos técnicos para orientar los recursos y poder seleccionar de forma más acertada los elementos que constituirán el diseño de cada subsistema. Una entrevista realizada en la empresa permitió obtener diferentes necesidades del usuario y la importancia que representa cada una de ellas en una escala del 1 al 5, siendo 5 las de mayor prioridad, las cuales se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3.
Necesidades del cliente

| NRO. | NECESIDADES | IMP. |
|------|---------------------------------------|------|
| 1 | Bajo costo | 5 |
| 2 | Que procese al menos 100 kg por hora | 4 |
| 3 | Que cumpla la normativa vigente | 4 |
| 4 | Que sea compacta y resistente | 3 |
| 5 | Que tenga larga vida útil | 5 |
| 6 | Disponibilidad inmediata de repuestos | 4 |
| 7 | Fácil mantenimiento | 3 |
| 8 | Que consuma poca energía | 3 |
| 9 | Fácil operación | 4 |
| 10 | Que sea precisa | 4 |

En base a las necesidades propuestas se define las especificaciones técnicas correspondientes en la Tabla 4

Tabla 4
Especificaciones técnicas

| NRO. | ESPECIFICACIONES TÉCNICAS |
|------|-----------------------------|
| 1 | Costo de fabricación |
| 2 | Velocidad de la banda |
| 3 | Tipo de material |
| 4 | Volumen |
| 5 | Robustez |
| 6 | Componentes estandarizados |
| 7 | Diseño modular |
| 8 | Eficiencia energética |
| 9 | Normas de diseño industrial |
| 10 | Porcentaje de error |

Se procede a realizar la matriz QFD

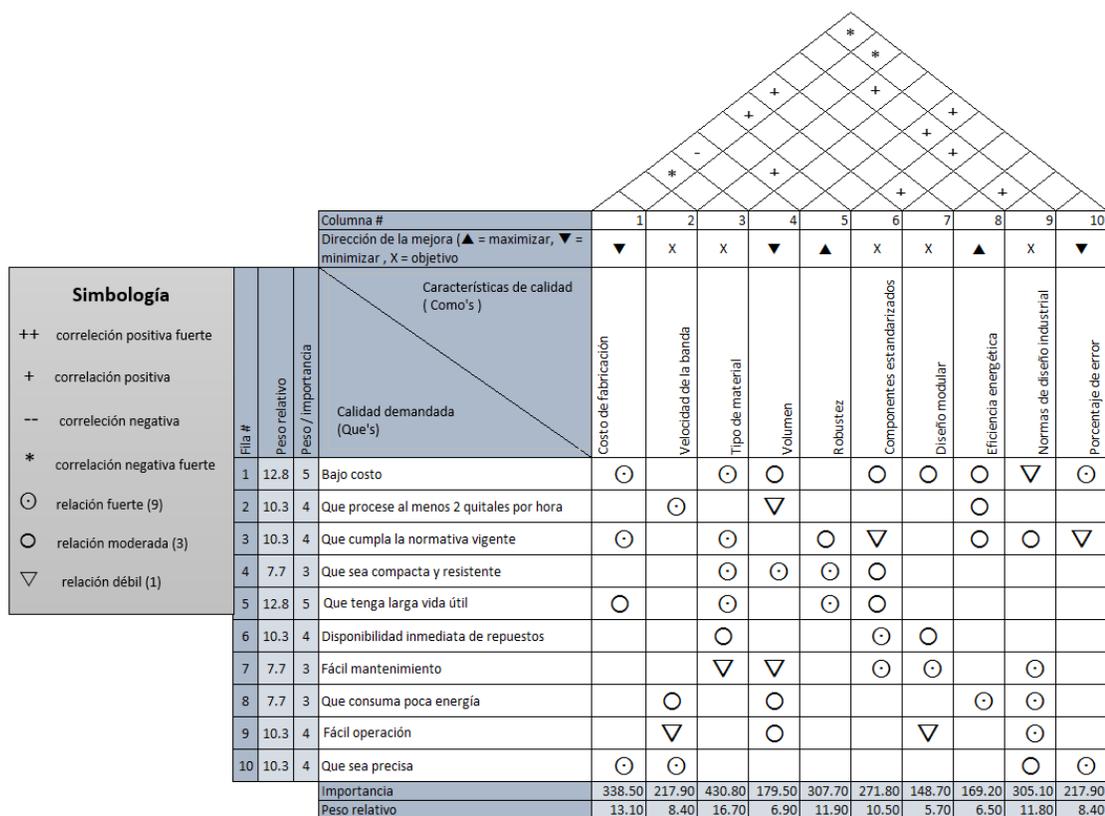


Figura 26. Matriz QFD

Dentro de la matriz QFD se definen las relaciones entre necesidades y características técnicas, así como las correlaciones existentes entre cada una de ellas, y se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 5, los cuales se encuentran ordenados de mayor a menor de acuerdo al porcentaje de incidencia para el desarrollo de la clasificadora. Las matrices de selección empleadas en la etapa de diseño a detalle serán evaluadas considerando estos porcentajes.

Tabla 5.
Resultado de la matriz QFD

| N | CARACTERÍSTICA TÉCNICA | PORCENTAJE |
|----|-----------------------------|------------|
| 1 | Tipo de material | 16.7 |
| 2 | Costo de fabricación | 13.1 |
| 3 | Robustez | 11.9 |
| 4 | Normas de diseño industrial | 11.9 |
| 5 | Componentes estandarizados | 10.5 |
| 6 | Velocidad de la banda | 8.4 |
| 7 | Porcentaje de error | 8.4 |
| 8 | Volumen | 6.9 |
| 9 | Eficiencia energética | 6.5 |
| 10 | Diseño modular | 5.7 |

3.2. Diseño a nivel sistema

La naturaleza de la clasificadora de granos por visión artificial consiste en agrupar varios elementos funcionales, independientes entre sí, para obtener el desempeño general de la máquina, por ende, se divide el producto en subsistemas, los cuales son:

- Sistema de almacenamiento
- Sistema de transporte
- Estructura de la máquina
- Sistema neumático
- Sistema eléctrico y electrónico
- Sistema de visión artificial
- Sistema de control

En la Figura 27 se muestra un esquema de los componentes que conforman la máquina clasificadora y su disposición geométrica. En la tabla se especifica la funcionalidad de cada componente para su posterior diseño a detalle.

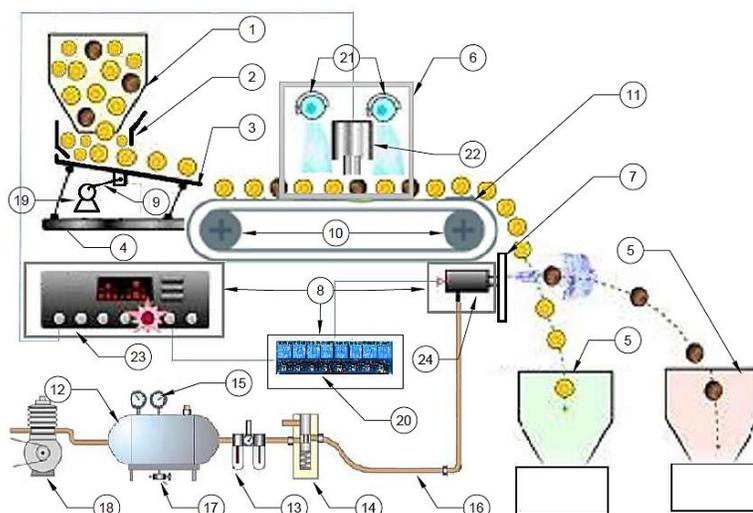


Figura 27. Esquema del ensamblaje final

Tabla 6.
Descripción funcional de los componentes

| Sistema de Almacenamiento | | |
|---------------------------|------|---|
| Componentes | Nro. | Descripción |
| Tolva de alimentación | 1 | Almacena los granos sin procesar |
| Embudo Dosificador | 2 | Impide el flujo descontrolado del grano sin procesar |
| Canal segmentado | 3 | Distribuye los granos de forma uniforme en áreas preestablecidas desde la tolva de alimentación hacia la banda transportadora |
| Guías de descarga | 5 | Guía por separado el grano procesado hacia sus respectivos depósitos |
| Sistema de Transporte | | |
| Componentes | Nro. | Descripción |
| Rodillos | 10 | Elementos de tensión y fricción que mueven la banda transportadora |
| Banda Transportadora | 11 | Dirige los granos a través del sistema de Visión artificial |
| Estructura de la máquina | | |
| Componentes | Nro. | Descripción |
| Estructura de la máquina | 4 | Soporta el peso de todos los módulos, paneles y componentes de la máquina. |
| Cámara de Oscuridad | 6 | Compartimiento cerrado, impide el ingreso de luminosidad externa, soporte de sensores y sistema de iluminación. |
| Cámara Matriz | 7 | Compartimiento perforado donde se apoyan las electroválvulas que forma la matriz para el despedido del aire comprimido |

Continúa siguiente pág.

| | | |
|--|--|---|
| Cajas de Paso | 8 | Contenedores individuales de los elementos neumáticos y de control. |
| Sistema Neumático | | |
| Componentes | Nro. | Descripción |
| Depósito Neumático | 12 | Almacenamiento de aire comprimido, mantiene una presión constante en el sistema neumático |
| Unidad de mantenimiento | 13 | Dispositivos para la purga, filtrado del aire, regulación y lubricación del sistema neumático |
| Válvula de alivio | 14 | Impide el aumento de presión en el sistema neumático |
| Manómetro | 15 | Mide la presión interna del sistema neumático |
| Mangueras | 16 | Vías de transporte del aire por el sistema neumático |
| Elemento de purga | 17 | Elimina el agua acumulada en el sistema neumático |
| Sistema eléctrico y electrónico | | |
| Componentes | Nro. | Descripción |
| Compresor Neumático | 18 | Aumenta la presión de aire a lo largo del sistema neumático al tomar aire del ambiente |
| Matriz de relés | 20 | Integra los circuitos de control y de potencia, accionando las electroválvulas |
| Sistema de iluminación | 21 | Arreglo de focos led que iluminan la cámara oscura para generar contraste entre superficies |
| Sistema de Visión Artificial | | |
| Componentes | Nro. | Descripción |
| Cámara de video | 22 | Captura las imágenes de los granos a clasificar |
| Controlador | 23 | Direcciona la señal de control hacia los relés de las electroválvulas |
| Matriz de electroválvulas | 24 | Permite el flujo de aire comprimido que empuja el grano a clasificar |
| Software de control | | |
| Software | Descripción | |
| Python | Lenguaje de programación de código abierto donde se desarrolla el sistema de clasificación y accionamiento de las válvulas | |
| Open CV | Programa de adquisición y procesamiento de imágenes compatible con Python | |

3.3. Diseño a detalle

En esta etapa de diseño se realiza un análisis de ingeniería sobre cada componente a ser elaborado y las partes estándar de fabricantes a ser implementadas tomando en consideración los resultados de la matriz QFD para definir las dimensiones definitivas y los materiales apropiados en cada subsistema mediante matrices de selección. El desarrollo de las matrices de selección se apoya en cuadros comparativos de datos técnicos que

resumen información recogida de catálogos, manuales, normativas y directrices de diferentes fuentes, además, se especifica el número de característica técnica de la Tabla 5 sobre la cual el dato tiene influencia. El modelo de las tablas comparativas se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7.
Modelo de tabla comparativa.

| | RELACIÓN | OPCIÓN 1 | OPCIÓN 2 | ... |
|---------------|---------------------|------------------|-----------------|------------|
| DATO 1 | # de característica | Valor o cualidad | --- | --- |
| DATO 2 | ... | --- | --- | --- |
| ... | ... | --- | --- | --- |

La metodología de (Ulrich & Eppinger, 2013) para analizar matrices de selección consiste en escoger una alternativa referencial y comparar el desempeño de los competidores frente a dicha referencia, la calificación de cada uno viene dada en base a la Tabla 8 evaluando cada criterio individualmente y se selecciona el que mayor puntaje obtenga de acuerdo a la importancia del criterio mostrado en la Tabla 5.

Tabla 8.
Método de evaluación de características técnicas

| DESEMPEÑO RELATIVO | CALIFICACIÓN |
|-------------------------------|---------------------|
| Mucho peor que la referencia | 1 |
| Peor que la referencia | 2 |
| Igual que la referencia | 3 |
| Mejor que la referencia | 4 |
| Mucho mejor que la referencia | 5 |

3.3.1. Diseño del hardware

3.3.1.1. Diseño de los componentes mecánicos

- *Tolva*

La tolva es un componente en el cual el grano es depositado por la parte superior y sirve para alimentar de producto a la banda transportadora, por lo general en la industria se fabrican tolvas de materiales como los que se muestran en la Tabla 9. En este caso el diseño se lo realiza en base a la capacidad planteada por la empresa, el ancho necesario de la boca inferior de la tolva para que el grano fluya continuamente y el espesor adecuado de la chapa metálica.

Tabla 9.
Características técnicas de materiales para tolvas

| | Relación | AISI 304 | Aluminio T6 | Acero Galvanizado AISI 1018 |
|-----------------------------------|----------|-----------------------|-----------------------|--------------------------------|
| Resistencia a la fluencia | 1, 3, 2 | 276 Mpa | 169 Mpa | 370 Mpa |
| Densidad | 8, 1, 2 | 7,8 g/cm ³ | 2,7 g/cm ³ | 7,85 g/cm ³ |
| No tóxico | 4, 3, 2 | Excelente | Buena | Buena |
| Resistencia a la corrosión | 3, 2 | Excelente | Buena | Regular |
| Limpieza | 4, 1 | Excelente | Excelente | Regular |
| Reciclable | 9 | 100% | 100% | 70% |

Fuente: (Milvaquez, 2015) & (European Hygienic Engineering & Desing Group, 2007)

Para empezar con el diseño de la tolva se realiza un análisis del tipo de material a ser utilizado por lo que de acuerdo a la matriz de selección descrita en la Tabla 10 se escoge el acero AISI 304 como mejor opción y cuyas características se muestran en la Tabla 11.

Tabla 10.
Matriz de selección para material de la tolva

| Componente: Material de la tolva | | | Alternativas | | | | | |
|----------------------------------|----------|------------------|--------------|----------------------|--------------|----------------------|-----------------------------|----------------------|
| Criterios de Selección | Peso (%) | Nro. de criterio | AISI 304 | | Aluminio T6 | | Acero Galvanizado AISI 1018 | |
| | | | Calificación | Evaluación Ponderada | Calificación | Evaluación Ponderada | Calificación | Evaluación Ponderada |
| Tipo de Material | 16,7 | 1 | 4 | 0,668 | 3 | 0,501 | 4 | 0,668 |
| Costo de Fabricación | 13,1 | 2 | 1 | 0,131 | 3 | 0,393 | 3 | 0,393 |
| Robustez | 11,9 | 3 | 5 | 0,595 | 3 | 0,357 | 2 | 0,238 |
| Normas de Diseño Industrial | 11,8 | 4 | 4 | 0,472 | 3 | 0,354 | 1 | 0,118 |
| Volumen | 6,9 | 8 | 4 | 0,276 | 3 | 0,207 | 4 | 0,276 |
| Eficiencia Energética | 6,5 | 9 | 3 | 0,195 | 3 | 0,195 | 1 | 0,065 |
| Total Evaluación | | | | 2,337 | | 2,007 | | 1,758 |
| Lugar | | | | 1 | | 2 | | 3 |
| ¿Continuar? | | | Sí | | No | | No | |

Tabla 11.
Características del acero AISI 304

| Característica | Valor | Unidades |
|---------------------------|-------------|-------------------|
| Resistencia a la fluencia | 276 | Mpa |
| Densidad | 7,8 | G/cm ³ |
| Material reciclable | 100 | % |
| Dureza brinell | 160-190 | Hb |
| Dimensiones | 1,22 x 2,44 | M |
| Composición química | Fecr18ni10 | N/a |
| Espesor | 1 | Mm |
| Costo | 76,5 | USD |

Fuente: (Goodfellow, 2017)

El volumen de grano que la tolva soportará se calcula experimentalmente como se muestra en la Figura 28 considerando la densidad del maíz que se utiliza en la empresa y la masa que ocupa el grano en un recipiente específico.



Figura 28. Cálculo experimental de la densidad del maíz

Recipiente de forma cúbica con las siguientes medidas

$$a = 0.1095[m]$$

$$b = 0.0548 [m]$$

$$h = 0.01965 [m]$$

El volumen V que tiene el recipiente es:

$$V = a * b * h$$

Donde:

$V =$ Volumen en un prisma cuadrangular

$a =$ largo

$b =$ ancho

$h =$ altura

Por lo que:

$$V = 0.1095 * 0.0548 * 0.01965$$

$$V = 1.1791 * 10^{-4} [m^3]$$

La masa m de maíz que ocupa el recipiente se mide en una balanza electrónica en la misma empresa de lo que se obtiene el valor:

$$m_T = 0.103 [Kg]$$

$$m_{Rec} = 0.014 [Kg]$$

Donde:

m_T = Masa del recipiente + masa del grano

m_{Rec} = Masa del recipiente

Disminuyendo la masa del recipiente se tiene:

$$m = 0.089 [Kg]$$

Por lo que la densidad ρ del maíz es determinada por la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{0.089 Kg}{1.1791 * 10^{-4} m^3} = 754.85 \left[\frac{Kg}{m^3} \right]$$

Para satisfacer las necesidades del cliente se diseña una tolva con una capacidad de al menos 100 Kg por lo que:

$$V_{total} = \frac{m}{\rho}$$

$$V_{total} = \frac{100}{754.85} \left[\frac{Kg}{\frac{Kg}{m^3}} \right]$$

$$V_{total} = 0.1325 [m^3]$$

Se propone un diseño de una tolva de sección cuadrada de lado 0.61 m, dado esto:

$$V_{total} = a * b * h$$

$$0.1325 = 0.61 * 0.61 * h$$

$$h = 0.356m \approx 0.36 m$$

Una vez que se determinó las dimensiones de la tolva de sección cuadrangular se procede a diseñar la boca que tendrá una forma de tronco piramidal invertido para lo cual se considera un ángulo β adecuado para que el grano fluya y un ancho mínimo de la boca b_{min} , (Figura 29), para evitar el puenteo formado en esta zona y así no obstruya la salida del mismo.

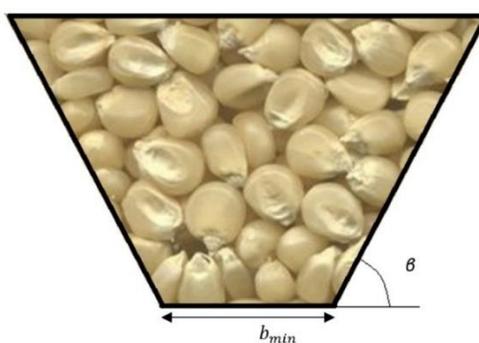


Figura 29. Ángulo de tolva y ancho mínimo

El ángulo α es determinado a partir del ángulo de reposo del material el cuál se lo determina experimentalmente dejando caer el producto sobre una superficie plana logrando que se forme un talud (Figura 30) del cual se puede obtener un ángulo θ , realizando varias pruebas se selecciona un ángulo aproximado de 30 grados. El ángulo más adecuado para que el grano fluya continuamente es 15 grados más elevado que el ángulo de reposo. (Siuice, 2016)

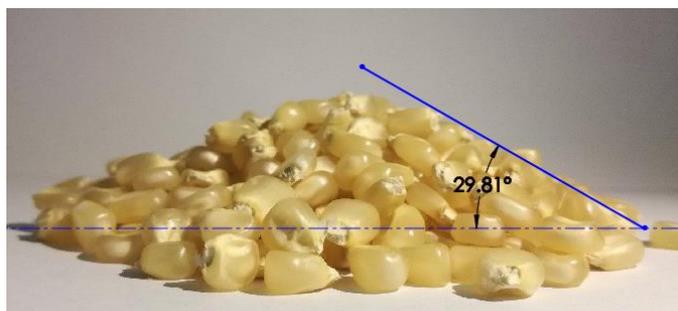


Figura 30. Ángulo de reposo experimental

$$\theta \approx 30^\circ$$

$$\alpha = \theta + 15^\circ = 45^\circ$$

Una vez definidas las dimensiones de la sección cuadrangular y la inclinación de la sección piramidal truncada se determina el ancho mínimo que debe tener la boca de la tolva para lo cual se realiza un análisis en base a estudios previos realizados (UNIVERSIDAD MAGDEBURG , 2014), donde se plantean varias ecuaciones para diseño de tolvas y silos. (Figura 31)

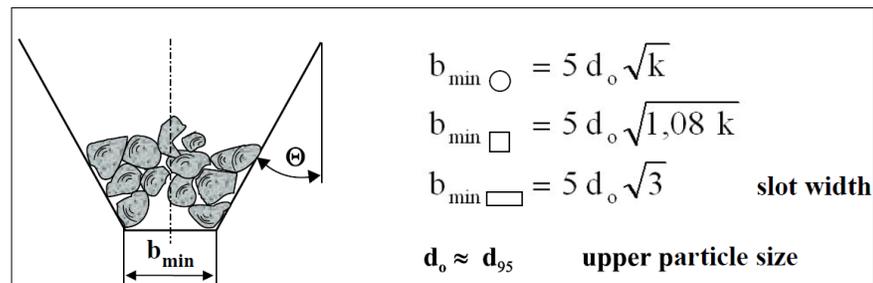


Figura 31. Ancho mínimo de boca para tres tipos de tolva

Fuente: (UNIVERSIDAD MAGDEBURG , 2014)

La ecuación a utilizar para este diseño por tener una boca con sección cuadrangular es:

$$b_{min} = 5d_o\sqrt{1.08k}$$

Donde:

b_{min} = ancho mínimo

d_o = 95 % del largo de la partícula de mayor tamaño

k = parámetro dependiente de la forma

El tamaño máximo de una partícula se determina experimentalmente:

$$d \approx 0.016 \text{ m}$$

$$d_0 = 95\% (d)$$

$$d_0 = 0.95 * 0.016 = 0.0152[m]$$

El factor k es una relación entre las presiones laterales y verticales existentes en la tolva y aunque no existe una única teoría para calcular su valor este diseño se basa en la teoría de empuje de tierras de RANKINE (ETSIEB, 2014).

$$k = \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi}$$

Donde ϕ es el ángulo de rozamiento interno el cual se puede determinar mediante un ensayo experimental, que no amerita ser realizado ya que en diferentes bibliografías se tiene valores similares. Para este proyecto se considera el ángulo de la Tabla 12, en la cual se puede constatar que el valor de la densidad del maíz es similar al calculado experimentalmente.

Tabla 12.
Ángulo de rozamiento interno

| PESO ESPECIFICO Y ANGULO DE ROZAMIENTO INTERNO DE DIVERSAS MATERIAS | | |
|---|---|------------------------------|
| Material | Peso especifico aparente Kg/m ³ | Angulo de rozamiento interno |
| C. Productos agricolas | | |
| Avena | 450 | 30° |
| Azúcar | 750 | 35° |
| Cebada | 650 | 25° |
| Centeno | 800 | 35° |
| Guisantes | 800 | 25° |
| Harina y salvado | 500 | 45° |
| Heno prensado | 170 | -- |
| Judias | 750 | 30° |
| Maíz | 750 | 25° |
| Malta triturada | 400 | 45° |
| Patatas | 750 | 30° |
| Remolacha azucarera desecada y cortada | 300 | 40° |
| Remolacha, nabos o zanahorias | 750 | 30° |
| Sémola | 550 | 30° |
| Trigo | 750 | 25° |

Fuente: (*Miliarium.com, 2008*)

Con lo cual:

$$k = \frac{1 - \sin 25}{1 + \sin 25^\circ}$$

$$k = 0.4058$$

El ancho mínimo de la tolva:

$$b_{min} = 5d_0\sqrt{1.08k}$$

$$b_{min} = 5 * 0.0152 * \sqrt{1.08 * 0.4058} = 0.05m$$

Para determinar la altura de la sección piramidal truncada se realiza los siguientes cálculos trigonométricos:

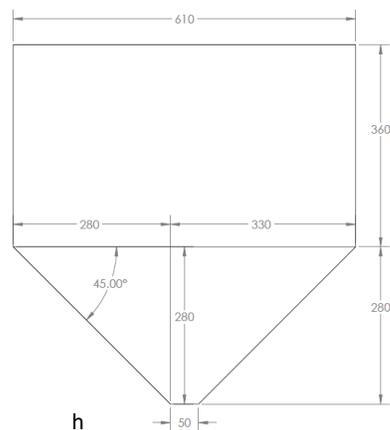


Figura 32. Corte transversal de la tolva

$$h = \tan(45^\circ) * 280 = 280mm = 0.28 m$$

Visto en perspectiva la tolva queda como se muestra en la Figura 33, donde se ha adicionado una extensión a la boca de la tolva para facilitar la distribución del grano en la banda transportadora.

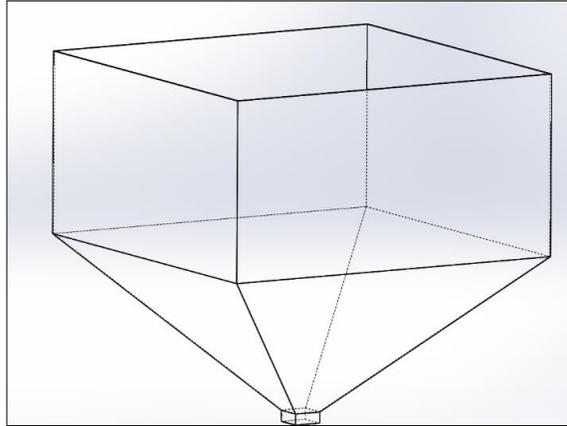


Figura 33. Vista en perspectiva de la tolva

Para dimensionar el espesor de la chapa metálica de la tolva se toma en cuenta la presión máxima que ejercerá el producto sobre las paredes de la misma, para lo cual se desarrolla un análisis analítico en base a la norma europea (AENOR, 1998) que comprende un conjunto de especificaciones técnicas experimentales relacionadas al almacenamiento de líquidos y productos granulares.

En un principio el desarrollo de tolvas y silos se basaba en el cálculo de presiones hidrostáticas con la ecuación $P = h * \gamma$ donde h era la altura y γ el peso específico del material a analizar asemejando que todo producto almacenado se comportaba de la misma manera que los líquidos, pero dichos cálculos no resultaban eficientes ya que los espesores de las paredes eran muy elevados porque no se consideraba los esfuerzos por rozamiento que presentan los materiales contra las paredes.

Posteriormente se estableció la formulación para el cálculo de presiones desarrollada por Janssen que se convirtió en la teoría clásica en el diseño de silos y tolvas de la cual se basan un sin número de trabajos y normas hasta la actualidad, esta teoría se fundamenta en el equilibrio de una sección diferencial del silo con el material en reposo. En años posteriores gracias a las contribuciones de Walker y Jenike se mejora el estudio de las presiones con el cálculo de presiones durante la carga y descarga del silo. (Gomez & Gonzalez, 2006)

En este caso basados en el Eurocódigo 1 parte 4 que es una recopilación de estas teorías, se calculan las presiones máximas que se producen para determinar un espesor adecuado de la chapa metálica, el análisis está dividido en dos partes, la parte vertical que vendría a

ser el silo donde se producen presiones de rozamiento sobre la pared p_{wf} , presiones horizontales p_{hf} y presiones verticales p_v y la parte con paredes inclinadas que sería la tolva donde se producen presiones perpendiculares a las paredes que dependen de las presiones antes mencionadas. Además, se debería calcular presiones de llenado y de vaciado para comparar entre estas y determinar la presión máxima, pero de acuerdo a la norma para silos cortos estas presiones son idénticas. (AENOR, 1998).

Las ecuaciones a utilizar basados en el Eurocódigo para las presiones en el silo (Figura 34) se las determina con las siguientes expresiones:

$$P_{wf}(z) = \gamma \frac{A}{U} C_z(z)$$

$$P_{hf}(z) = \frac{\gamma A}{\mu U} C_z(z)$$

$$P_V(z) = \frac{\gamma A}{K_s \mu U} C_z(z)$$

$$C_z(z) = 1 - e^{-\frac{z}{z_0}}$$

$$z_0 = \frac{A}{K_s \mu U}$$

Donde:

γ = peso específico de la carga

μ = el coeficiente de rozamiento de la pared

K_s = relación de presiones horizontal y vertical

Z = profundidad

U = perímetro interior

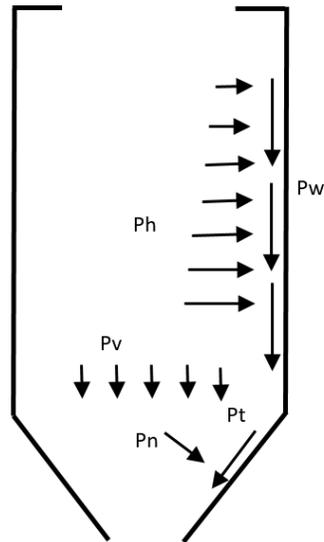


Figura 34. Presiones en un silo

Fuente: (AENOR, 1998)

Para la tolva (Figura 35) se calcula la presión perpendicular a la pared inclinada p_n y la presión de rozamiento p_t la cual se la determina de la siguiente manera:

$$p_n = p_{n3} + p_{n2} + (p_{n1} - p_{n2}) \left(\frac{x}{I_h} \right)$$

$$p_{n1} = p_{v0} (C_b \cos^2 \alpha + \text{sen}^2 \alpha)$$

$$p_{n2} = C_b p_{v0} \cos^2 \alpha$$

$$p_{n3} = 3,0 \frac{A}{U} * \frac{\gamma K_s}{\sqrt{\mu}} \text{sen}^2 \alpha$$

$$p_t = p_n \mu$$

Donde:

x = longitud entre 0 y I_h

p_{n1}, p_{n2} = presión debida al llenado de la tolva

p_{n3} = presión debida a la presión vertical sobre el material almacenado directamente por encima de la transición;

C_b = coeficiente de mayoración de la presión sobre el fondo

p_{v0} = presión vertical actuante en la transición

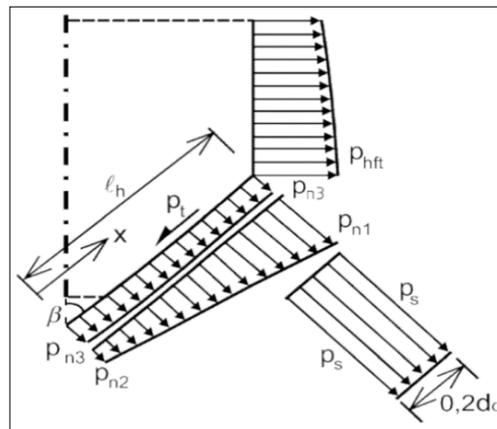


Figura 35. Presiones en la tolva

(Ortega & Torres, 2016)

Para determinar las presiones en la tolva de la clasificadora se parte con los siguientes datos:

$h_1 = 0.36$ m (profundidad en la pared vertical)

$h_2 = 0.28$ m (profundidad en la pared inclinada)

$l = 0.61$ m (lado de la tolva)

$\alpha = 45^\circ$ (ángulo de inclinación de la tolva)

$k_s = 0.4058$ (relación entre presiones verticales y horizontales)

$\gamma = 7.3975$ kN/m³ (Peso específico del maíz, $\gamma = \rho * g$)

$C_b = 1.4$ (Coeficiente de mayoración basado en la Tabla 13)

Para determinar el valor de μ se considera las expresiones 7.1, 7.2, 7.3 de la norma donde:

$$\text{Máx. } p_h \rightarrow \mu = 0.9\mu_m$$

$$\text{Máx. } p_v \rightarrow \mu = 0.9\mu_m$$

$$\text{Máx. } p_w \rightarrow \mu = 1.15\mu_m$$

Y el valor de μ_m de la Tabla 13

Tabla 13.
Propiedades de los materiales granulados

| Material granular | Densidad ³⁾ γ [kN/m ³] | Relación de presiones ($K_{s,m}$) | Coeficiente de rozamiento de la pared μ_m | | Máximo coeficiente de mayoración de la presión C_0 |
|------------------------------|---|--|--|----------|---|
| | | | Acero ⁴⁾ | Hormigón | |
| cebada ¹⁾ | 8,5 | 0,55 | 0,35 | 0,45 | 1,35 |
| cemento | 16,0 | 0,50 | 0,40 | 0,50 | 1,40 |
| clinker de cemento | 18,0 | 0,45 | 0,45 | 0,55 | 1,40 |
| arena seca ²⁾ | 16,0 | 0,45 | 0,40 | 0,50 | 1,40 |
| harina ¹⁾ | 7,0 | 0,40 | 0,30 | 0,40 | 1,45 |
| ceniza volante ²⁾ | 14,0 | 0,45 | 0,45 | 0,55 | 1,45 |
| maíz ¹⁾ | 8,5 | 0,50 | 0,30 | 0,40 | 1,40 |
| azúcar ¹⁾ | 9,5 | 0,50 | 0,45 | 0,55 | 1,40 |
| trigo ¹⁾ | 9,0 | 0,55 | 0,30 | 0,40 | 1,30 |
| carbón ^{1), 2)} | 10,0 | 0,50 | 0,45 | 0,55 | 1,45 |

Fuente: (AENOR, 1998)

Por lo que

$$\mu_{ph,pv} = 0.9 * 0.3 = 0.27$$

$$\mu_{pw} = 1.15 * 0.3 = 0.345$$

Se procede a calcular las presiones tomando como z a la máxima profundidad la tolva.

$$z_0 = \frac{A}{K_s \mu U}$$

$$z_0 = \frac{0.61 * 0.61}{0.4058 * 0.27 * (0.61 * 4)} = \mathbf{1.3919 [m]}$$

$$C_z(z) = 1 - e^{-\frac{z}{z_0}}$$

$$C_z(0.28 + 0.36) = 1 - e^{-\frac{0.28+0.36}{1.3919}}$$

$$\mathbf{C_z(0.64) = 0.3686}$$

Con este valor las máximas presiones para la sección de paredes verticales están dadas por:

$$P_{wf}(z) = \gamma \frac{A}{U} C_z(z)$$

$$P_{wf}(0.61) = \frac{7.39753 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} * (0.61 * 0.61) \text{ m}^2}{(0.61 * 4)\text{m}} * 0.3686$$

$$\mathbf{P_{wfmax} = 0.4158 \text{ [kPa]}}$$

$$P_V(z) = \frac{\gamma A}{K_s \mu U} C_z(z)$$

$$P_V(0.61) = \frac{7.39753 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} * (0.61 * 0.61) \text{ m}^2}{0.4058 * 0.27 * (0.61 * 4)\text{m}} * 0.3686$$

$$\mathbf{P_{Vmax} = 3.7952 \text{ [kPa]}}$$

$$P_{hf}(z) = \frac{\gamma A}{\mu U} C_z(z)$$

$$P_{hf}(z) = P_V(z) * K_s$$

$$\mathbf{P_{hfmax} = 1.5401 \text{ [kPa]}}$$

Las máximas presiones para la sección de paredes inclinadas:

$$p_{n1} = p_{v0}(C_b \cos^2 \alpha + \text{sen}^2 \alpha)$$

$$p_{n1} = 3.7952 \text{ kPa} (1.4 \cos^2 45^\circ + \text{sen}^2 45^\circ)$$

$$\mathbf{p_{n1} = 4.5542 \text{ kPa}}$$

$$p_{n2} = C_b p_{v0} \cos^2 \alpha$$

$$p_{n2} = 1.4 * 3.7952 \text{ kPa} * \cos^2 45^\circ$$

$$\mathbf{p_{n2} = 2.6566 \text{ kPa}}$$

$$p_{n3} = 3,0 \frac{A}{U} * \frac{\gamma K_s}{\sqrt{\mu}} \text{sen}^2 \alpha$$

$$p_{n3} = 3,0 \frac{0.3721 \text{m}^2}{(0.61 * 4) \text{m}} * \frac{7.39753 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} * 0.4058}{\sqrt{0.27}} \text{sen}^2 45^\circ$$

$$\mathbf{p_{n3} = 1.3215 \text{ kPa}}$$

$$p_n = p_{n3} + p_{n2} + (p_{n1} - p_{n2}) \left(\frac{x}{I_h} \right)$$

La presión máxima ocurre cuando $x = I_h$ por lo que $\left(\frac{x}{I_h} \right) = 1$ como se muestra en Figura 35

$$\mathbf{p_n = 5.8757 \text{ kPa}}$$

La presión de rozamiento p_t sería:

$$p_t = p_n \mu$$

$$p_t = 5.8757 \text{ kPa} * 0.345 = 2.0577 \text{ kPa}$$

$$\mathbf{p_t = 2.0271 \text{ kPa}}$$

De acuerdo a la Figura 35 existe una presión perpendicular fija en la tolva que se presenta en esa zona, esto es lo que se conoce como sobrepresión debido al flujo de masa que se produce y se lo determina mediante la expresión:

$$p_s = 2p_{h0}$$

$$p_s = 1.54 \text{ kPa} * 2$$

$$p_s = 3.0802 \text{ kPa}$$

De acuerdo a los cálculos realizados se puede determinar que las presiones máximas a las que se va a someter la tolva son las que se muestran en la Figura 36

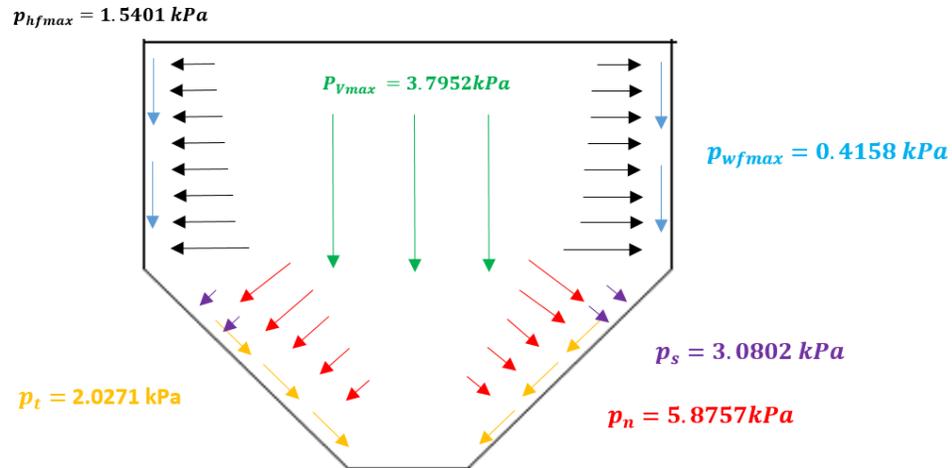


Figura 36. Presiones que actúan en la tolva

Analizando las presiones calculadas se puede evidenciar que las presiones máximas estas presentes en las caras inclinadas de la tolva, por lo tanto, para cálculo del espesor de la chapa metálica se utiliza como presión máxima la suma de la presión perpendicular a la pared inclinada p_n y la sobre presión por flujo de masa p_s .

$$p_{max} = (3.0802 + 5.8757) = 8.9559 \text{ kPa}$$

Para el cálculo del espesor se utiliza la siguiente expresión:

$$e = \frac{p_{max} D}{20 * \sigma_{adm}}$$

Fuente: (Ravenet, 1977)

Donde:

e = espesor de la chapa metálica

p_{max} = presión máxima generada en las paredes de la tolva

σ_{adm} = esfuerzo a la tracción admisible del material (factor de seguridad recomendado 1,57)

D = diámetro del silo la sección transversal es circular, y lado si es cuadrada.

Por lo tanto:

$$fs = \frac{S_y}{\sigma_{adm}}$$

Donde:

fs = factor de seguridad

S_y = esfuerzo a la fluencia (276 MPa (Budynas & Nisbett, 2008))

$$\sigma_{adm} = \frac{S_y}{fs}$$

$$\sigma_{adm} = \frac{276 \text{ MPa}}{1.57} = 175.796 \text{ MPa}$$

$$e = \frac{8.9559 \text{ kPa} * 0.65 \text{ m}}{20 * 175.796 \text{ MPa}}$$

$$e = 1.655 * 10^{-3} \text{ mm}$$

Las presiones que actúan en la tolva no representan un factor determinante en la selección del espesor adecuado para la chapa metálica ya que el espesor obtenido analíticamente es extremadamente pequeño por lo que se selecciona uno de los espesores normados en base a catálogos.

Tabla 14.
Lámina de acero inoxidable AISI 304

| LAMINAS DE 1.22*2.44 | |
|-------------------------------|------------------|
| (M) | |
| ESPESOR (MM) | Peso (kg) |
| 0.40 | 8.92 |
| 0.60 | 14.30 |
| 0.70 | 16.59 |
| 0.90 | 21.54 |
| 1.00 | 22.84 |
| 1.50 | 33.87 |
| 2.00 | 44.88 |
| 3.00 | 71.00 |

Fuente: (Aceroscenter, 2016)

En la Tabla 14 se muestran diferentes espesores obtenidos de un catálogo de (Aceroscenter, 2016), en base a esto se procede a realizar un análisis dentro de un software de simulación CAE, con las presiones determinadas para comparar las deformaciones que se producen en las paredes de la tolva.

Tabla 15.
Resultados de deformación en la simulación

| ESPESOR EN MM | DEFORMACIÓN EN MM | ESFUERZO DE VON MISES EN MPA |
|--------------------------------|------------------------------------|---|
| 0.4 | 1.851 | 195.31 |
| 0.6 | 1.422 | 140.29 |
| 0.7 | 1.287 | 123.71 |
| 0.9 | 1.094 | 100.77 |
| 1 | 1.026 | 92.47 |
| 1.5 | 0.825 | 68.84 |
| 2 | 0.682 | 55.56 |
| 3 | 0.485 | 35.92 |

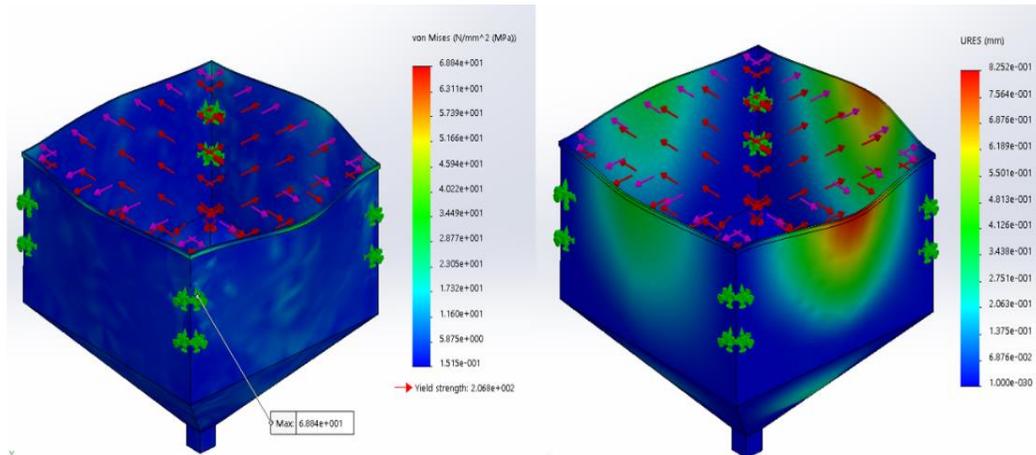


Figura 37. Simulación de tensiones y desplazamientos para espesor 1.5mm

Como se observa en la Tabla 15 con diferentes espesores existen pequeñas deformaciones que siguen el comportamiento de la Figura 37 con máximo desplazamiento en la parte superior media de la tolva, que no afecta de forma permanente al material ya que los esfuerzos que se presentan se encuentran por debajo del límite de fluencia. Considerando que costo del acero inoxidable y la disponibilidad inmediata en el mercado se selecciona un espesor de 1,5 mm, para el cual con ayuda del software de simulación se obtiene un factor de seguridad mínimo de 2.8 con lo que se asegura que la tolva resistirá las cargas aplicadas.

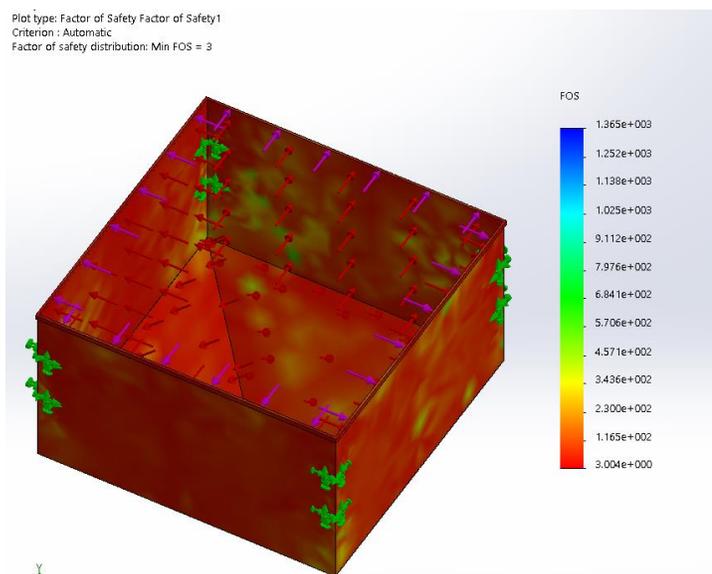


Figura 38. Simulación del factor de seguridad

- *Banda transportadora*

La banda transportadora es el elemento industrial para el transporte de productos empacados y al granel por excelencia, consiste en una cinta sinfín acoplada mediante tambores rotatorios a un motor que genera un movimiento continuo. Para el diseño de la misma se consideran aspectos como las características del material a transportar, el tipo de banda, la capacidad de carga y la velocidad cuyos datos son obtenidos mediante catálogos y cálculos matemáticos.

- Características del material a transportar

Las características que se muestran en la Tabla 16 se obtienen de forma experimental, con una muestra del maíz que es procesado en la empresa, en cálculos realizados en 3.3.1.1.

Tabla 16.

Características del maíz

| CARACTERÍSTICAS | VALOR | UNIDADES |
|------------------------|--------------|-------------------|
| Densidad | 754.85 | kg/m ³ |
| Peso específico | 7.3975 | kN/m ³ |
| Tamaño de grano max. | 0.016 | m |

○ Tipo de banda

Para la industria alimentaria existen dos grandes grupos de bandas: modulares y sólidas. Las bandas modulares son aquellas que tienen la posibilidad de extender su longitud agregando más módulos o entramados del material, poseen una configuración articulada o de tipo malla; sirven para procesos específicos como: estaciones de congelamiento, horneado, filtrado, etc.; y el transporte de producto en largas distancias rectas y curvas. Son elaboradas en varios tipos materiales como mallas o barras de acero inoxidable, Poliacetal POM y Poliamida PA (Figura 39).

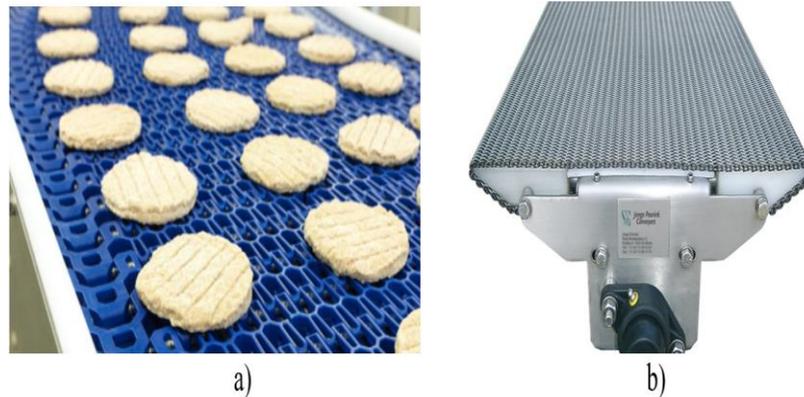


Figura 39. a) Bandas modulares POM y PA b) Bandas de acero inoxidable

Fuente: (Jonge Poerink Conveyors, 2017)

Las bandas sólidas (Figura 40) son aquellas que forman un solo cuerpo sin la presencia de huecos, varillas de unión, ni ranuras; resisten un rango de temperatura aceptable, se caracterizan por su flexibilidad, elasticidad, fácil limpieza y su resistencia química por la baja porosidad de sus materiales. Las bandas son fabricadas con los siguientes materiales:

- Policloruro de vinilo PVC
- Poliuretano termoplástico TPU
- Poliuretano PUR
- Poliolefina termoplástica TPO

- Silicona



Figura 40. Bandas sólidas

Fuente: (Indo India Marketing, 2017)

- Capacidad de carga

El diseño planteado requiere que la banda transporte al menos 100 kg en una hora.

- Velocidad de la banda

Esta característica depende del ancho de la sección transversal de la banda y de la capacidad de carga, en varios catálogos y normas existen fórmulas para calcular la velocidad máxima, sin embargo, el objetivo de esta banda es transportar el material ordenadamente a través de un sistema de visión artificial con una velocidad constante y reducida que satisfaga la capacidad de carga formando hileras de 12 granos sobre la banda como se muestra en la Figura 41

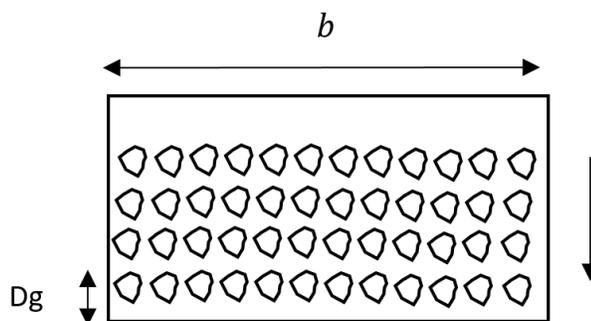


Figura 41. Disposición de granos sobre la banda

Donde:

$b = 0.4$ m (ancho de la banda)

$Dg \approx 0.02$ m (tamaño de grano más separación aproximada entre hileras)

Experimentalmente con la balanza digital utilizada se tiene la relación Mxg entre número de granos y la masa que representan:

$$Mxg = \frac{281 \text{ granos}}{89 \text{ g}}$$

Partiendo de la capacidad requerida se obtiene la velocidad lineal:

$$100 \frac{kg}{h} * \frac{1 h}{3600 s} * \frac{0.02 m}{12 \text{ granos}} * \frac{281 \text{ granos}}{89 g} * \frac{1000 g}{1 Kg} = 0.146 \frac{m}{s}$$

$$v \approx 0.15 \frac{m}{s}$$

A partir de estas características el primer aspecto a tomar en cuenta en el diseño de la banda transportadora es la selección del material que conforma la cinta, en el presente prototipo se necesita: un fondo uniforme que simplifique el trabajo del sistema de visión artificial, facilidad de limpieza debido al trabajo del producto a granel, sin requerimientos robustos de temperatura. Por ende, el grupo de bandas transportadoras sólidas son las más adecuadas. La Tabla 17 contiene datos comparativos de las bandas sólidas que aporta a la selección del material adecuado.

Tabla 17.
Comparativa entre materiales de revestimiento de bandas

| MATERIAL DE REVESTIMIENTO | TPO | TPU | PVC | Silicona |
|------------------------------|-----------|-----------|-------|-----------|
| Propiedades de lanzamiento | Excelente | Buena | Medio | Excelente |
| Flexibilidad | Buena | Excelente | Pobre | Excelente |
| Resistencia a la abrasión | Buena | Excelente | Medio | Pobre |
| Resistencia química | Excelente | Buena | Buena | Buena |
| Resistencia a la hidrólisis | Excelente | Medio | Buena | Medio |
| Limpieza | Excelente | Buena | Buena | Pobre |
| Operación a baja temperatura | Excelente | Buena | Pobre | Buena |

Fuente: (Habasit, 2016)

Reveyron es un fabricante de bandas transportadoras con representación en el país y cuenta con diferentes materiales de fabricación expuestos en la Tabla 17. Estas bandas transportadoras están en conformidad con la FDA y las normativas europeas sobre el contacto con alimentos, CE/1935/2004 y la directiva 2002/72/CE. (REVEYRON, 2017)

Tabla 18.
Matriz de selección de material de la banda

| Componente: Material de revestimiento de la banda | | | Alternativas | | | | | | | |
|---|----------|------------------|--------------|----------------------|--------------|----------------------|--------------|----------------------|--------------|----------------------|
| Criterios de Selección | Peso (%) | Nro. de criterio | Silicona | | TPU | | PVC | | TPO | |
| | | | Calificación | Evaluación Ponderada |
| Tipo de Material | 16,7 | 1 | 3 | 0,501 | 4 | 0,668 | 3 | 0,501 | 5 | 0,835 |
| Costo de Fabricación | 13,1 | 2 | 4 | 0,524 | 3 | 0,393 | 4 | 0,524 | 1 | 0,131 |
| Robustez | 11,9 | 3 | 3 | 0,357 | 5 | 0,595 | 2 | 0,238 | 4 | 0,476 |
| Normas de Diseño Industrial | 11,8 | 4 | 1 | 0,118 | 4 | 0,472 | 3 | 0,354 | 5 | 0,59 |
| Total Evaluación | | | | 1,5 | | 2,128 | | 1,617 | | 2,032 |
| Lugar | | | | 4 | | 1 | | 3 | | 2 |
| ¿Continuar ? | | | No | | Sí | | No | | No | |

El material seleccionado de acuerdo a la Tabla 18 es el TPU, por lo que en base a un catálogo del fabricante se parte el diseño con el mínimo espesor fabricado considerando que la capacidad de carga de la clasificadora es relativamente pequeña, posteriormente se

corroborar que la tensión máxima calculada está por debajo de la tensión de trabajo seleccionada. Las características de esta banda se muestran en la Tabla 19

Tabla 19.
Características de la banda 1PURB65/FW

| CARACTERÍSTICA | VALOR | UNIDADES |
|----------------------------|-----------------|-------------------|
| Dureza | 85 | Sh A |
| Espesor total | 1.3 | mm |
| Peso por m ² | 1,45 | Kg/m ² |
| Ancho de fabricación | 2000 | mm |
| Temperaturas | -25 a 60 | ° C |
| Tipo de soporte | Mesa deslizante | - |
| Carga de rotura | 90 | N/mm |
| Tensión máxima de trabajo | 10 | N/mm |
| Carga para 1% de extensión | 7 | N/mm |
| Diámetro mínimo de tambor | 20 | mm |

Fuente: (REVEYRON, 2017)

Para dimensionar los elementos que conforman la banda transportadora se parte del esquema que muestra en la Figura 42 en la cual se muestra una banda simple horizontal, sobre mesa deslizante con un tambor motriz al inicio de la banda sobre el cual se encuentra la tolva de alimentación y un tambor rotatorio donde se encuentra el mecanismo tensor de la banda.

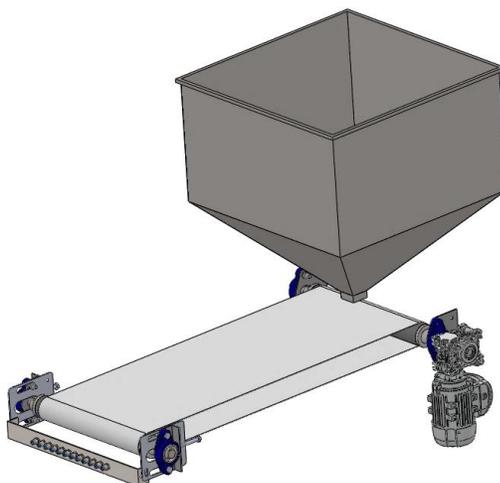


Figura 42. Diseño inicial de banda transportadora

Las ecuaciones propuestas en la información técnica de Forbo MOVEMENT SYSTEMS establecen un procedimiento para calcular esta tensión en base a la fuerza tangencial que se presenta en la banda.

La fuerza tangencial F_u viene dada por:

$$F_u = \mu_T * g * \left(m + \frac{m_B}{2}\right) + \mu_R * g * \left(m_R + \frac{m_B}{2}\right)$$

Donde:

μ_T = Coeficiente de fricción para marcha sobre mesa

μ_R = Coeficiente de fricción para marcha sobre rodillo

g = gravedad ($9,81 \frac{m}{s^2}$)

m = masa del material transportado en Kg

m_B = masa de la banda en Kg

m_R = masa de todos los tabores excepto el motriz en Kg

Los valores de μ_T , μ_R se escogen de la Tabla 20 de acuerdo al tipo de material de la banda, en este caso U1 representa poliuretano.

Tabla 20.

Coeficientes de fricción estática μ_s para diferentes recubrimientos (valores aproximados)

| | 0, A0, E0, T, U0, P | NOVO | U1, V1, VH | UH, V2H, U2H, E0, A0, V5H, V10H |
|--------------------------|------------------------|-------|------------|------------------------------------|
| μ_T (mesa) | 0,33 | 0,33 | 0,5 | 0,5 |
| μ_R (rodillo) | 0,033 | 0,033 | 0,033 | 0,033 |
| μ_{ST} (acumulación) | 0,33 | 0,33 | 0,5 | 0,5 |

Fuente: (Forbo, 2013)

El valor de la masa m de producto sobre la banda se obtiene aproximadamente con la masa del producto disperso a lo largo de banda m_1 , asumiendo una sección trasversal con altura máxima de 0.01 m y el valor de masa que se encuentra sobre la tolva m_2 .

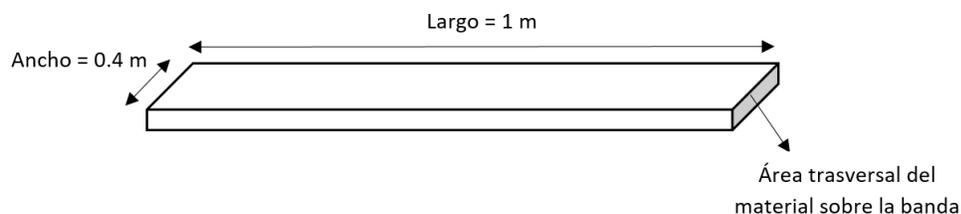


Figura 43. Volumen máximo de grano sobre la banda

Basados en la densidad del producto:

$$m_1 = 754.85 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} * 1\text{m} * 0.4\text{ m} * 0.01\text{ m}$$

$$m_1 = 3.016\text{ Kg}$$

De acuerdo a la capacidad máxima de la tolva

$$m_2 = 100\text{ Kg}$$

Por lo tanto

$$m = 103.016\text{ Kg}$$

El valor de masa de la banda m_B se obtiene mediante cálculos a partir de la Tabla 19 y las dimensiones aproximadas que tendrá la banda tomando en cuenta que al largo de banda hay que añadir la longitud de contacto con los tambores. El diámetro de tambor elegido en base al catálogo de tambores de (Rotrans, 2017) es de 63.5 mm que es el mínimo valor estándar fabricado y se encuentra por encima del valor mínimo que recomienda el fabricante de la banda.

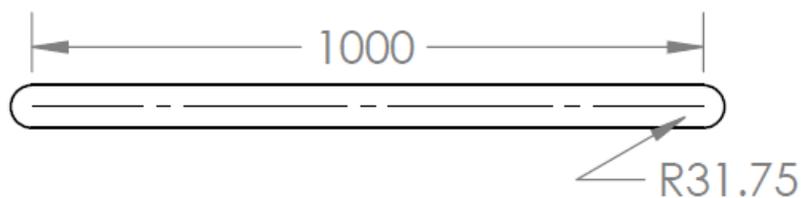


Figura 44. Propuesta para dimensiones de la banda

Perímetro total P_t

$$P_t = 2 * (1 + 0.0635 * 3.1416)$$

$$P_t = 2.399 \text{ m}$$

Área total de la banda A_{tb}

$$A_{tb} = 2.399 \text{ m} * 0.04 \text{ m}$$

$$A_{tb} = 0.959 \text{ m}^2$$

Masa de la banda M_b

$$M_b = 0.959 \text{ m}^2 * 1.45 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^2}$$

$$M_b = 1.39 \text{ Kg}$$

El valor de la masa m_R se obtiene de la Tabla 21

Tabla 21.
Dimensiones de rodillos Rotrans

Colocación en HORIZONTAL



| BANDA | A | B | C | Peso rodillo Ø63.5 | Peso partes móviles Ø63.5 |
|------------|------------|------------|------------|--------------------|---------------------------|
| 300 | 400 | 408 | 440 | 3,35 | 2,40 |
| 400 | 500 | 508 | 540 | 4,20 | 2,85 |
| 500 | 600 | 608 | 640 | 4,93 | 3,33 |
| 650 | 750 | 758 | 790 | 5,99 | 4,02 |
| 800 | 950 | 958 | 990 | 7,40 | 4,92 |
| 1000 | 1150 | 1158 | 1190 | 8,80 | 5,82 |
| 1200 | 1400 | 1408 | 1440 | 10,56 | 6,96 |
| 1400 | 1600 | 1608 | 1640 | 11,97 | 7,87 |
| 1600 | 1800 | 1808 | 1840 | 13,38 | 8,78 |
| 1800 | 2000 | 2008 | 2040 | 14,79 | 9,87 |
| 2000 | 2200 | 2208 | 2240 | 16,20 | 10,60 |

Fuente: (Rotrans, 2017)

Por lo tanto

$$M_R = 4.20 \text{ Kg}$$

Reemplazando estos valores en la ecuación de la fuerza tangencial se tiene

$$F_u = \mu_T * g * \left(m + \frac{m_B}{2}\right) + \mu_R * g * \left(m_R + \frac{m_B}{2}\right)$$

$$F_u = 0.5 * 9.81 * \left(103.016 + \frac{1.39}{2}\right) + 0.033 * 9.81 * \left(4.2 + \frac{1.39}{2}\right)$$

$$F_u = 510.29 \text{ N}$$

La fuerza de tracción máxima viene dada por:

$$F_1 = F_u * C_1$$

Donde C_1 se selecciona en la Tabla 22 en donde el ángulo de agarre es de 180° de acuerdo a este diseño planteado.

Tabla 22.
Factor C_1 para tambor motriz

| Recubrimiento de la cara inferior Siegling Transilon | V3, V5, U2, A5, E3 | | | V1, U1, UH, U2H V2H, V5H | | | 0, U0, NOVO, E0, A0, T, P | | |
|--|--------------------|------|------|-----------------------------|------|------|---------------------------|------|------|
| | 180° | 210° | 240° | 180° | 210° | 240° | 180° | 210° | 240° |
| Tambor de acero liso | | | | | | | | | |
| Seco | 1,5 | 1,4 | 1,3 | 1,8 | 1,6 | 1,5 | 2,1 | 1,9 | 1,7 |
| Mojado | 3,7 | 3,2 | 2,9 | 5,0 | 4,0 | 3,0 | No recomendable | | |
| Tambor con forro de fricción | | | | | | | | | |
| Seco | 1,4 | 1,3 | 1,2 | 1,6 | 1,5 | 1,4 | 1,5 | 1,4 | 1,3 |
| Mojado | 1,8 | 1,6 | 1,5 | 3,7 | 3,2 | 2,9 | 2,1 | 1,9 | 1,7 |

Fuente: (Forbo, 2013)

$$F_1 = F_u * C_1$$

$$F_1 = 510.29 * 1.8 \text{ N}$$

$$F_1 = 918.52 \text{ N}$$

La tensión de trabajo es:

$$T = \frac{F_1}{\text{ancho de banda}}$$

$$T = \frac{918.52 \text{ N}}{400 \text{ mm}}$$

$$T = 2.29 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

Con lo que se concluye que el espesor de la banda seleccionada es el adecuado ya que la tensión de trabajo está por debajo de la tensión máxima que determina el catálogo.

El diámetro mínimo de tambor d_A en mm según (Forbo, 2013) viene dado por:

$$d_A = \frac{F_u * C_3 * 180}{b_0 * \beta}$$

Donde:

C_3 = Factor válido para el tambor motriz (Tabla 23)

b_0 = Ancho de banda

β = Ángulo de contacto

Tabla

Factor C_3 para tambor motriz

23.

| Recubrimiento de la cara inferior Siegling Transilon | V3, V5, U2, A5, E3 | V1, U1, UH | 0, U0, NOVO, T, P |
|--|--------------------|-----------------|-------------------|
| Tambor de acero liso | | | |
| Seco | 25 | 30 | 40 |
| Mojado | 50 | No recomendable | No recomendable |
| Tambor con forro de fricción | | | |
| Seco | 25 | 25 | 30 |
| Mojado | 30 | 40 | 40 |

Fuente (Forbo, 2013)

Por lo tanto:

$$d_A = \frac{510.29 * 30 * 180}{400 * 180} \text{ mm}$$

$$d_A = 38.27 \text{ mm}$$

El diámetro mínimo de acuerdo a la fuerza tangencial que se produce en la banda es de 38.27 mm, por lo que a partir de este valor se seleccionará un diámetro mayor o igual a d_A , cuyas dimensiones se ajusten al motoreductor para satisfacer la velocidad lineal requerida de 0.15 m/s.

Potencia mecánica (P_A) en el tambor motriz en Kw está dada por:

$$P_A = \frac{F_u * v}{1000}$$

$$P_A = \frac{510.29 * 0.15}{1000}$$

$$P_A = 0.0765 \text{ Kw}$$

Potencia mecánica (P_m) en el motor en Kw está dada por:

$$P_m = \frac{P_A}{\eta}$$

Donde:

η = eficiencia del motor y conjunto reductor

$$\eta = \eta_m * \eta_r$$

Donde:

$\eta_m = 69.5\%$ (Motive, 2008, pág. 8)

$\eta_r = 98\%$ (Motive, 2016, pág. 5)

La selección de los valores de η_m y η_r se basa en el catálogo de MOTIVE a partir de las características de un motor de ½ hp de potencia y un reductor BOX40i60 que son valores comunes en cintas transportadoras para cargas ligeras los cuales serán corroborados en 3.3.3.1

Por lo tanto, la potencia mecánica está dada por:

$$P_m = \frac{0.0765}{0.695 * 0.98}$$

$$P_m = 0.1123 \text{ Kw}$$

$$P_m = 0.1498 \text{ Hp}$$

Se aproxima la potencia del motor a 0.25 HP, el cual es un valor estándar disponible en el mercado.

- *Diseño del tambor motriz*

La transmisión de potencia de la clasificadora de granos se la realiza de forma directa mediante un motoreductor acoplado al eje del tambor motriz, por ende, las medidas del tambor motriz y de retorno están determinadas por la velocidad de salida del reductor dado que el objetivo es cumplir con la velocidad lineal propuesta.

El motor y el reductor de velocidad se seleccionan de los catálogos de (Motive, 2016), se calcula el diámetro estándar de tambor para satisfacer la velocidad lineal y se diseñan los componentes del tambor mediante la teoría de falla por fatiga de Goodman (Budynas & Nisbett, 2008).

Las reducciones disponibles para el motor 63B-4, disponible en el mercado, de 0.25 HP se muestran en la Tabla 24. Además, se calculan las velocidades lineales con el diámetro de tambores estándar de ROTRANS a fin de seleccionar el más aproximado a los 0.15 m/s necesarios.

Tabla 24

Velocidades lineales de cajas reductoras para el motor 63B-4

| Unidad | V. Salida n2 (rpm) | Reducción i | Torque nm | V. Lineal d=63,5 mm | V. Lineal d=76,2 mm | V. Lineal d=88,9 mm |
|---------------|-----------------------|-------------|--------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| BOX 30 | 70,0 | 20 | 17,0 | 0,233 | 0,279 | 0,326 |
| | 56,0 | 25 | 19,1 | 0,186 | 0,223 | 0,261 |
| | 46,7 | 30 | 21,3 | 0,155 | 0,186 | 0,217 |
| BOX 40 | 70,0 | 20 | 18,8 | 0,233 | 0,279 | 0,326 |
| | 56,0 | 25 | 22,7 | 0,186 | 0,223 | 0,261 |
| | 46,7 | 30 | 25,7 | 0,155 | 0,186 | 0,217 |
| | 35,0 | 40 | 30,9 | 0,116 | 0,140 | 0,163 |
| BOX 50 | 28,0 | 50 | 37,1 | 0,093 | 0,112 | 0,130 |
| | 46,7 | 60 | 21,3 | 0,155 | 0,186 | 0,217 |
| | 35,0 | 40 | 33,5 | 0,116 | 0,140 | 0,163 |
| | 28,0 | 50 | 37,6 | 0,093 | 0,112 | 0,130 |
| | 23,3 | 60 | 42,7 | 0,077 | 0,093 | 0,108 |
| | 17,5 | 80 | 51,9 | 0,058 | 0,070 | 0,081 |

Fuente: (Motive, 2016) & (Rotrans, 2017)

Entre las opciones que se acercan a la velocidad lineal requerida el BOX 40 i30 ofrece las mejores prestaciones junto con un tubo de diámetro exterior de 63.5 mm, y sus datos son los empleados en los cálculos posteriores.

El análisis de fuerzas para el tambor motriz, de retorno y los ejes se calculan en el estado de parada y funcionamiento de la banda de acuerdo a (Forbo, 2013). Las fuerzas de tensión ejercidas sobre los tambores en la parada de servicio se muestran en la Figura 45.

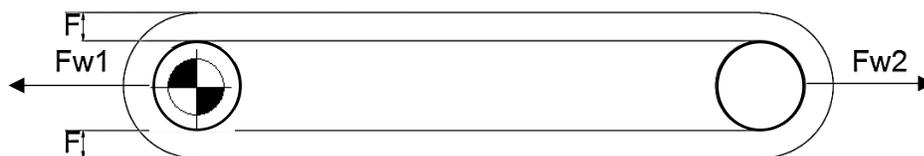


Figura 45 Cargas en parada de servicio

Fuente: (Forbo, 2013)

$$F_{W1} = F_{W2} = 2 * F$$

$$F = \varepsilon\% * K_{1\%} * b_0$$

Donde:

$F_{W1} = F_{W2}$ = Carga sobre ejes en reposo (N)

F = Fuerza de tensión (N)

$\varepsilon\%$ = Elongación de montaje (%)

$K_{1\%}$ = Fuerza de tracción relajada de la banda con elongación de 1% (7 N/mm)

b_0 = Ancho de la banda (400 mm)

La elongación para un accionamiento de cola es:

$$\varepsilon = \frac{\frac{F_U}{2} + 2 * F_2 + F_U}{2 * K_{1\%} * b_0}$$

Donde:

F_2 = Fuerza de tracción mínima (N)

$$F_2 = F_1 - F_U$$

$$F_2 = 917.98 - 509.99$$

$$F_2 = \mathbf{407.99 \text{ N}}$$

Reemplazando en ε :

$$\varepsilon = \frac{\frac{509.99}{2} + 2 * 407.99 + 509.99}{2 * 7 * 400}$$

$$\varepsilon = \mathbf{0.2823}$$

Reemplazando en F y F_W :

$$F = 0.2823 * 7 * 400$$

$$F = \mathbf{790.48 \text{ N}}$$

$$F_{W1} = F_{W2} = 2 * 790.48$$

$$F_{W1} = F_{W2} = \mathbf{1580.96 \text{ N}}$$

Para un accionamiento de cola las cargas en funcionamiento se presentan en la Figura 46.

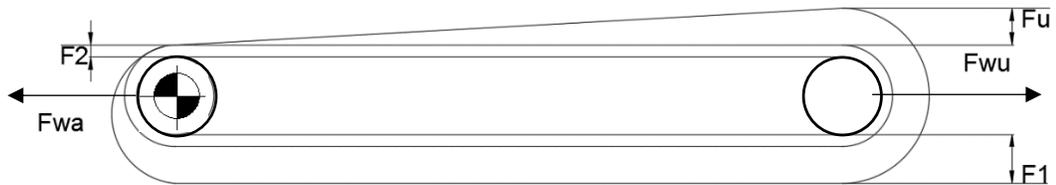


Figura 46 Cargas en estado de funcionamiento para accionamiento de cola

Fuente: (Forbo, 2013)

$$F_{WA} = F_1 + F_2$$

$$F_{WU} = 2 * F_1$$

Donde:

F_{WA} = Carga sobre ejes en el tambor motriz (N)

F_{WU} = Carga sobre ejes en el tambor de retorno (N)

Entonces:

$$F_{WA} = 917.98 + 407.99$$

$$\mathbf{F_{WA} = 1325.97 N}$$

$$F_{WU} = 2 * 917.98$$

$$\mathbf{F_{WU} = 1835.96 N}$$

La carga más crítica que soportan los ejes es F_{WU} , con este se calcula el espesor y el diámetro de ejes de ambos tambores. Un esquema para la fabricación de los tambores se muestra en la Figura 47, y para el diseño se los considera como ejes huecos.



Figura 47 Esquema del tambor motriz

Para el análisis sobre los tambores y las flechas es suficiente combinar los diferentes tipos de esfuerzos en esfuerzos de Von Mises alternantes y medios para aplicarlos de acuerdo con la teoría de falla por energía de distorsión de ED-Goodman, los esfuerzos fluctuantes que actúan sobre las flechas son:

$$\sigma_a = K_f \frac{32 M_a}{\pi d^3} \quad \sigma_m = K_f \frac{32 M_m}{\pi d^3}$$

$$\tau_a = K_{fs} \frac{16 T_a}{\pi d^3} \quad \tau_m = K_{fs} \frac{16 T_m}{\pi d^3}$$

Para sección circular hueca, tubos, los esfuerzos fluctuantes son:

$$\begin{aligned}\sigma_a &= K_f \frac{32 M_a D}{\pi(D^4 - d^4)} & \sigma_m &= K_f \frac{32 M_m D}{\pi(D^4 - d^4)} \\ \tau_a &= K_{fs} \frac{16 T_a D}{\pi(D^4 - d^4)} & \tau_m &= K_{fs} \frac{16 T_m D}{\pi(D^4 - d^4)}\end{aligned}$$

La teoría de ED-Goodman para obtener el diámetro de la flecha es la siguiente:

$$\begin{aligned}d_{flecha} &= \left(\frac{16 s_f}{\pi} \left\{ \frac{1}{S_e} \left[4(K_f M_a)^2 + 3(K_{fs} T_a)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{1}{S_{ut}} \left[4(K_f M_m)^2 + 3(K_{fs} T_m)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \right)^{1/3}\end{aligned}$$

Aplicado a sección circular hueca, resulta:

$$\begin{aligned}(D^4 - d^4) &= \frac{16 D s_f}{\pi} \left\{ \frac{1}{S_e} \left[4(K_f M_a)^2 + 3(K_{fs} T_a)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{S_{ut}} \left[4(K_f M_m)^2 + 3(K_{fs} T_m)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}\end{aligned}$$

Donde:

σ_a y σ_m = Momentos flexionantes alternante y medio (Nm)

τ_a y τ_m = Pares de torsión alternante y medio (Nm)

K_f y K_{fs} = Factores de concentración de esfuerzo por fatiga de flexión y torsión

d_{flecha} = diámetro de la flecha (m)

D = Diámetro exterior del tambor (0.0635 m)

d = Diámetro interior del tambor (m)

s_f = Factor de seguridad

S_e = Límite de resistencia a la fatiga (Pa)

S_{ut} = Resistencia última a la tensión (Pa)

Se inicia el análisis con el diagrama de cuerpo libre para el tubo de 63.5 mm (Figura 48).

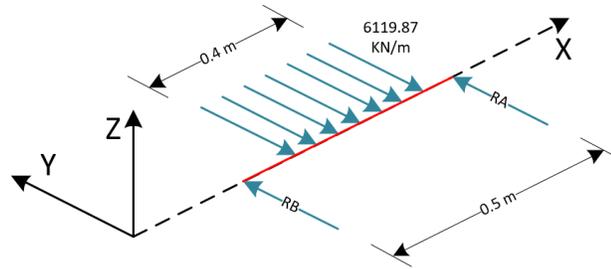


Figura 48. Diagrama de cuerpo libre del tubo para los tambores motriz y de retorno

La fuerza distribuida puede considerarse como una fuerza puntual aplicada en el centro del área de acción. Por lo tanto, se tiene:

$$P_1 = Q * L$$

$$P_1 = 6119.87 \frac{N}{m} * 0.3m$$

$$P_1 = 1835.96 N$$

En el plano XY los diagramas de fuerzas cortantes y momento flector (Figura 49) son:

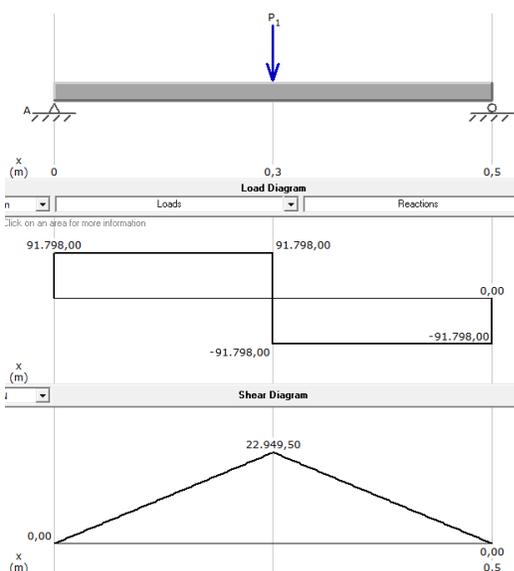


Figura 49 Diagramas de fuerzas cortantes y momento flector del tubo

$$R_{AXY} = 917.98 \text{ N}$$

$$R_{BXY} = 917.98 \text{ N}$$

$$M_a = 229.5 \text{ Nm}$$

$$M_m = 0 \text{ Nm}$$

El torque de salida de la caja reductora Tabla 24 es contante a lo largo del eje y el tubo.

$$T_m = 25.7 \text{ Nm}$$

$$T_a = 0 \text{ Nm}$$

Los materiales usados para los tubos de acero están acordes con la norma NTE INEN 2 470:2008 la cual especifica las propiedades que deben cumplir el límite de fluencia y la resistencia a la tracción son:

$$S_y = 205 \text{ MPa}$$

$$S_{ut} = 330 \text{ MPa}$$

Se utiliza la ecuación de Marín para obtener S_e , mediante el uso de factores que cuantifican la influencia de las condiciones de trabajo sobre el material:

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e k_f S_e'$$

Donde:

k_a = Factor de modificación de la condición superficial

k_b = Factor de modificación de tamaño

k_c = Factor de modificación de la carga

k_d = Factor de modificación de la temperatura

k_e = Factor de confiabilidad

k_f = Factor de modificación de efector varios

S_e' = Límite de resistencia a la fatiga en viga rotatoria

La Tabla 25 resume el proceso de selección y cálculo de dichos factores bajo las condiciones de trabajo para el tubo de la máquina clasificadora, el detalle del procedimiento se encuentra descrito en el libro de Diseño en ingeniería Mecánica de Shigley (Budynas & Nisbett, 2008, págs. 275 - 309).

Tabla 25

Selección y cálculo de los factores de modificación para el tubo

| FUENTE | PARÁMETRO | FACTOR | VALOR | CRITERIO |
|-------------------------------------|-----------------------|--------|--------|---|
| TABLA 6-2 EC. 6-19 | Condición Superficial | K_a | 0.97 | Laminado en frío. $K_a = a * S_{ut}^b$ $a = 4.51$ $b = -0.265$ |
| EC. 6-20 | Tamaño | K_b | 0.8845 | $2.79 < d < 51$ mm Para tubo hueco d_e $d_e = 0.37(63.5) = 23.5$ $K_b = 1.24 * d_e^{-0.107}$ |
| EC 6-26 | Carga | K_c | 1 | Flexión |
| TABLA 6-4 | Temperatura | K_d | 1 | Cond. Normales (15°C-40°C) |

Continúa siguiente pág.

| | | | | |
|------------------------------------|----------------------------|-----------------|-------|-------------------------------|
| TABLA 6-5 EC 6-18 | Confiabilidad | Ke | 0.868 | Confiabilidad del 90% |
| | Resistencia a la Fatiga | Se' [Mpa] | 165 | |
| TABLA 7-1 | Factor de seguridad | s_f | 2.5 | Factor de seguridad, impuesto |
| | Concentración de Esfuerzos | $k_f=K_t$ | 1 | No hay cambios de sección |
| | Concentración de esfuerzos | $K_{fs}=K_{ts}$ | 1 | No hay cambios de sección |

Fuente: (Budynas & Nisbett, 2008)

Reemplazando:

$$S_e = 0.97 * 0.8845 * 1 * 1 * 0.868 * 165$$

$$S_e = 122.88 \text{ MPa}$$

Reemplazando en la ecuación de Goodman para tubos huecos.

Donde:

$$M_a = 229.5 \text{ Nm}$$

$$M_m = 0 \text{ Nm}$$

$$T_m = 25.7 \text{ Nm}$$

$$T_a = 0 \text{ Nm}$$

$$(D^4 - d^4) = \frac{16 D s_f}{\pi} \left\{ \frac{1}{S_e} \left[4(K_f M_a)^2 + 3(K_{fs} T_a)^2 \right]^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{S_{ut}} \left[4(K_f M_m)^2 + 3(K_{fs} T_m)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}$$

$$(0.0635^4 - d^4) = \frac{16 * 0.0635 * 2.5}{\pi} \left\{ \frac{2 * (1 * 229.5)}{122885700} + \frac{\sqrt{3} * (1 * 25.7)}{330000000} \right\}$$

Despejando:

$$d = 60.2 \text{ mm}$$

Por lo tanto:

$$e = \frac{D - d}{2} = \frac{63.5 - 60.2}{2} = 1.65 \text{ mm}$$

Dentro de los productos disponibles en el catálogo de NOVACERO se aproxima el espesor e al inmediato superior disponible. Se selecciona el un tubo de 63.5 mm de diámetro con 2 mm de espesor y peso de 3.13 Kg/m.

El diagrama de cuerpo libre para la flecha se presenta en la Figura 50.

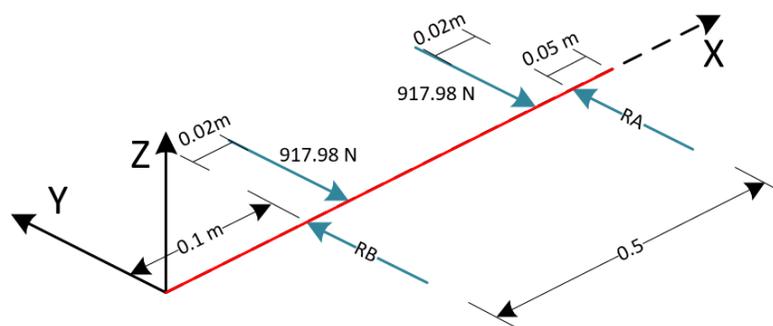


Figura 50. Diagrama de cuerpo libre de la flecha de los tambores motriz y de retorno

En el plano XY los diagramas de fuerzas cortantes y momento flector (Figura 51), son:

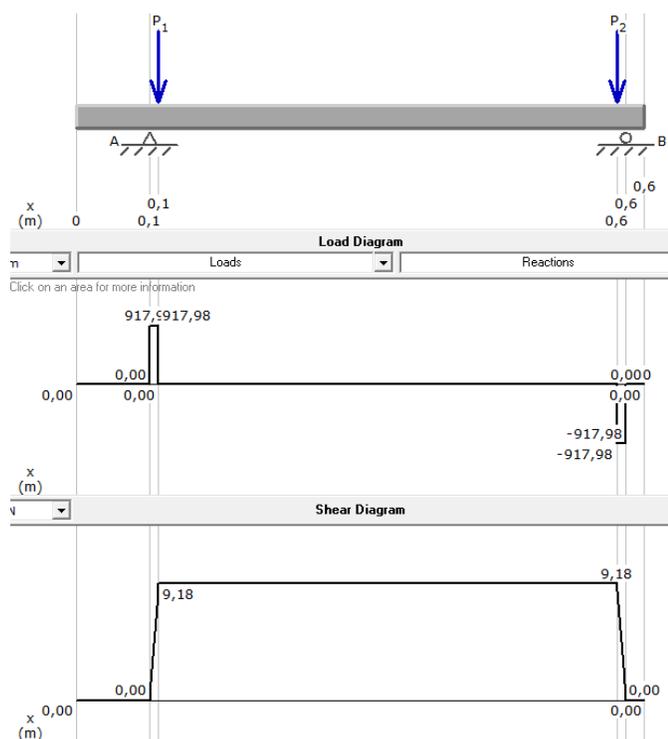


Figura 51 Diagramas de fuerzas cortantes y momento flector de la flecha

$$R_{AXY} = 917.98 \text{ N}$$

$$R_{BXY} = 917.98 \text{ N}$$

$$M_a = 9.18 \text{ Nm}$$

$$M_m = 0 \text{ Nm}$$

Un material comúnmente usado para las flechas es el acero AISI 1020 cuyas propiedades de límite de fluencia y la resistencia a la tracción son:

$$S_y = 210 \text{ MPa}$$

$$S_{ut} = 380 \text{ MPa}$$

Al igual que en los cálculos para el tubo hueco, la Tabla 26 resume el proceso de selección de los factores bajo las condiciones de trabajo para la flecha de máquina clasificadora.

Tabla 26

Selección y cálculo de factores de modificación para la flecha

| FUENTE | PARÁMETRO | FACTOR | VALOR | CRITERIO |
|-------------------------------------|----------------------------|-------------------|-------|--|
| TABLA 6-2 EC. 6-19 | Condición Superficial | Ka | 0.934 | Laminado en frío. $Ka = a * S_{ut}^b$ $a = 4.51$ $b = -0.265$ |
| EC. 6-20 | Tamaño | Kb | 0.9 | Aproximación inicial |
| EC 6-26 | Carga | Kc | 1 | Flexión |
| TABLA 6-4 | Temperatura | Kd | 1 | Cond. Normales (5°C-40°C) |
| TABLA 6-5 | Confiabilidad | Ke | 0.868 | Confiabilidad del 90% |
| EC 6-18 | Resistencia a la Fatiga | Se' [Mpa] | 190 | |
| | Factor de seguridad | S_f | 2.5 | Factor de seguridad, impuesto |
| TABLA 7-1 | Concentración de Esfuerzos | $k_f = K_t$ | 1 | No hay cambios de sección |
| | Concentración de esfuerzos | $K_{fs} = K_{ts}$ | 1 | No hay cambios de sección |

Fuente: (Budynas & Nisbett, 2008)

Reemplazando:

$$S_e = 0.934 * 0.9 * 1 * 1 * 0.868 * 190$$

$$S_e = 138.69 \text{ MPa}$$

Reemplazando en la ecuación de Goodman:

Donde:

$$M_a = 9.18 \text{ Nm}$$

$$M_m = 0 \text{ Nm}$$

$$T_m = 25.7 \text{ Nm}$$

$$T_a = 0 \text{ Nm}$$

$$d_{flecha} = \left(\frac{16 s_f}{\pi} \left\{ \frac{1}{s_e} \left[4(K_f M_a)^2 + 3(K_{fs} T_a)^2 \right]^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{s_{ut}} \left[4(K_f M_m)^2 + 3(K_{fs} T_m)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \right)^{1/3}$$

$$d_{flecha} = \frac{16 * 2.5}{\pi} \left\{ \frac{2 * (1 * 9.18)}{138691500} + \frac{\sqrt{3} * (1 * 25.7)}{380000000} \right\}$$

$$d_{flecha} = 14.7 \text{ mm}$$

- *Tambor de retorno*

El tambor de retorno no se encuentra sometido a mayores fuerzas que el tambor motriz, sus puntos de apoyo son los mismos y tienen el mismo diámetro de tubo para mantener una tensión uniforme en la banda; por lo tanto, se utiliza el espesor de tubo y flecha calculados anteriormente con la variante de la longitud de la flecha. Para el tambor motriz se utiliza una flecha de 0.64 m de longitud y para el tambor de retorno una flecha de 0.58 m de longitud.

- *Selección de Rodamientos*

Los diámetros para las flechas de los tambores se calcularon en 14.7 mm, sin embargo, se aumenta su valor a una dimensión comercial de uso común a fin de facilitar la búsqueda de repuestos y minorar costos. El diámetro seleccionado es de 25.4 mm (1 pulg.) por consiguiente el rodamiento seleccionado será para dicho diámetro.

La fuerza radial calculada es de:

$$F_r = R_{AXY} = R_{BXY} = 917.98 \text{ N}$$

Considerando una sobrecarga de 500 [N] por error del operario se tienen una carga radial en el rodamiento de:

$$F_r = \sqrt{917.98^2 + 500^2}$$

$$F_r = 1045.31 \text{ N}$$

Mientras tanto la carga axial es:

$$F_a = 0$$

De acuerdo con el procedimiento descrito en (Budynas & Nisbett, 2008), un valor de confiabilidad estándar R es de al menos:

$$R = \sqrt[4]{0.96} = 0.98985$$

$$R \approx 0.99$$

La vida de diseño adimensional del cojinete X_D con una velocidad de 60 RPM y una vida estimada de 20000 horas, es:

$$x_D = \frac{60L_D n_D}{L_{10}}$$

Donde:

L_D = Vida estimada en horas

n_D = Velocidad de giro

$L_{10} = 10^6$

$$X_D = \frac{60(20000)60}{10^6} = 72$$

Para una vida de 20.000 horas el factor de aplicación es de 3.42 (Rodamientos FAG, 2012), y un exponente $a = 3$ para un cojinete de bolas, entonces la capacidad de carga requerida para el cojinete es:

$$C_{10} = a_f F_D [X_D]^{\frac{1}{a}}$$

$$C_{10} = 3.42 * (917.98 \text{ N}) * (72)^{1/3}$$

$$C_{10} = 13.06 \text{ KN}$$

Del catálogo de rodamientos FAG, se selecciona el rodamiento rígido de bola de una hilera con número 6205 que presenta la Tabla 27

Tabla 27.

Propiedades del Rodamiento FAG 6205

| CARACTERÍSTICA | VALOR | UNIDADES |
|---------------------------|-------------------|-------------------|
| Diámetro interno | 25 | mm |
| Capacidad de carga | 14 | KN |
| Velocidad límite | 17000 | min ⁻¹ |
| Peso | 0.128 | Kg |
| Chumacera | De pared, ovalada | |

- *Sistema de tensado*

El sistema de tensado permite alinear la banda y tensionarla con los tambores de modo que exista un contacto adecuado con los rodillos y no se produzca patinaje. En la clasificadora se coloca un sistema tensor (Figura 52) a cada lado del tambor de retorno acoplado con las chumaceras y la placa de sujeción a la estructura, para este caso por tratarse de una banda transportadora relativamente pequeña se utiliza un mecanismo tensor de tornillo.

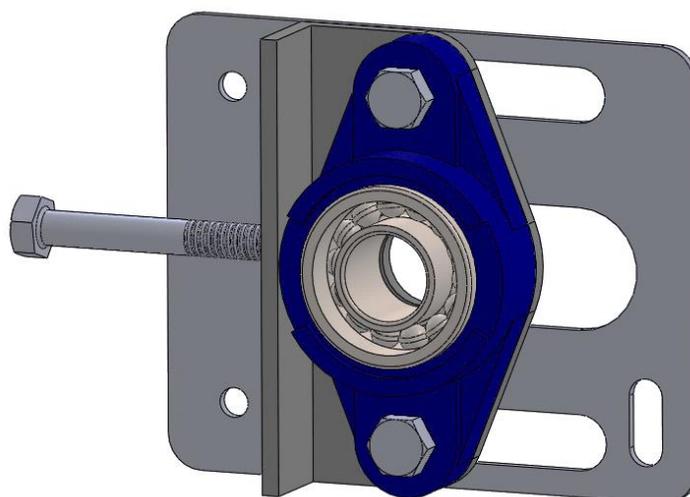


Figura 52. Sistema tensor

En este mecanismo el elemento más crítico es la placa de la chumacera por lo que se realiza un análisis estático para corroborar que el sistema es funcional, se considera una tensión máxima aplicada a través del perno equivalente a la máxima tensión que se produce en el tambor la cuál es 1835.96 [N] distribuida a través de los dos tensores y el espesor de la placa de 5 mm.

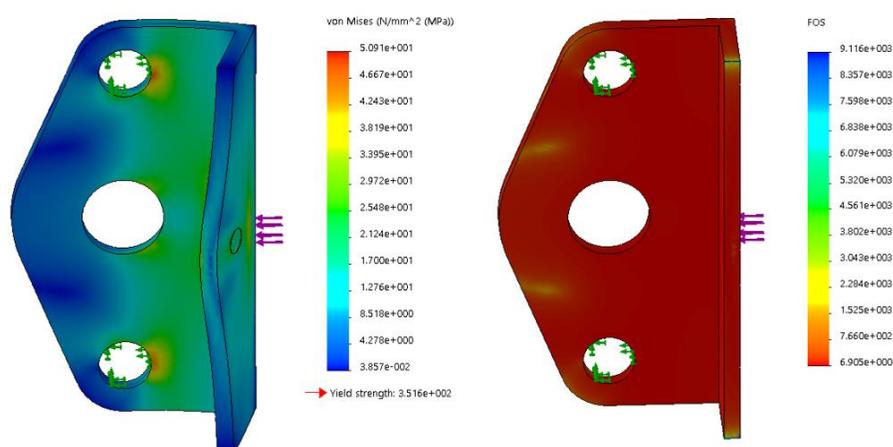


Figura 53. Análisis estático de la placa

Como se puede observar en la Figura 53 aplicando la tensión máxima en la banda la tensión axial y de flexión que se produce en la placa no supera el límite elástico del material produciendo de esta forma un factor de seguridad de 6.9 con lo que se concluye que la placa no fallará.

- Sistema de soporte

La estructura de la máquina es diseñada de modo que soporte el peso generado por la tolva, el maíz dentro de la tolva y todos los componentes de la banda transportadora como se muestra en la Figura 54 en la cual se muestran las zonas donde se aplican las cargas. Será fabricada con perfiles cuadrados de 40*40*2 [mm] de acero negro.

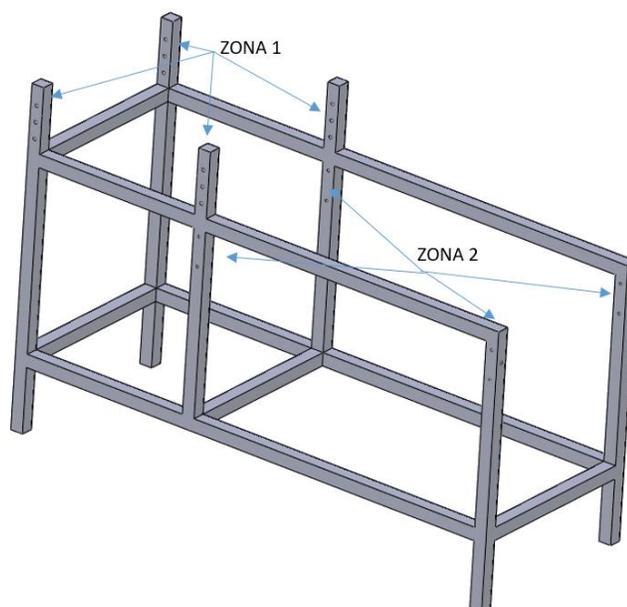


Figura 54. Estructura de la máquina

Se realiza un análisis estático con el objetivo de asegurar que el diseño planteado soporte las cargas aplicadas en su operación. Las cargas son calculadas a partir de la masa de los diferentes componentes que se asientan sobre la estructura, dichos valores (Tabla 28) ya fueron calculados en el diseño de la banda y tolva respectivamente.

Tabla 28.
Masa de los componentes

| MASA EN ZONA 1 | MASA EN Kg. |
|-----------------------|--------------------|
| Tolva | 14.71 |
| Maíz en la tolva | 100 |
| Total 1 | 114.71 |
| MASA EN ZONA 2 | |
| Rodillo motriz | 4.2 |
| Rodillo de retorno | 4.2 |
| Banda transportadora | 1.39 |
| Maíz sobre la banda | 3.16 |
| Total 2 | 12.95 |

Se calcula la fuerza máxima que ejercen las masas de la Tabla 28 y se divide para el número de sujeciones que tienen los componentes siendo 8 en ambos casos

$$F_{zona1} = \frac{114.71 [Kg] * 9.8 \left[\frac{m}{s^2} \right]}{8}$$

$$F_{zona1} = \frac{1124.16}{8} [N]$$

$$F_{zona1} = 140.6 [N]$$

$$F_{zona2} = \frac{12.95 [Kg] * 9.8 \left[\frac{m}{s^2} \right]}{8}$$

$$F_{zona2} = \frac{126.91.16}{8} [N]$$

$$F_{zona2} = 15.86 [N]$$

Con estas fuerzas se procede a realizar un análisis estático en el software de simulación (Figura 57), tomando en cuenta además la fuerza que ejerce el sistema tensor, y se tienen como resultado que el esfuerzo máximo que se presenta es de 26.03 MPa presentando un factor de seguridad de 9.7 con lo que se concluye que la estructura no fallará.

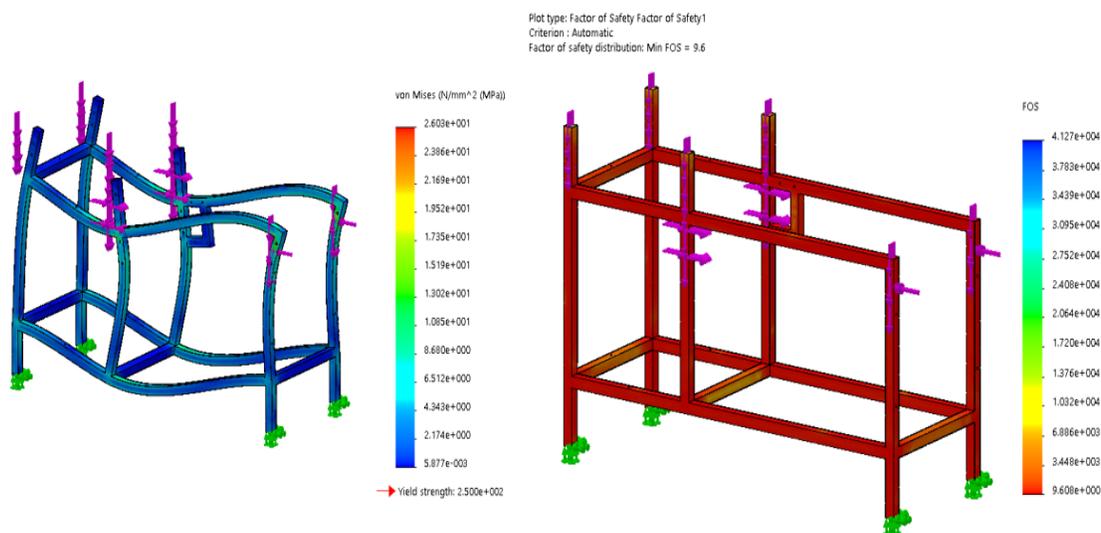


Figura 55. Análisis estático de la estructura

- *Sistema de visión artificial*

Para el óptimo funcionamiento del sistema de visión artificial se requiere que la cámara sea colocada en un espacio cerrado con una iluminación fija por lo que se diseña una caja metálica de acero galvanizado (Figura 56) la cual se coloca en el bastidor sobre la banda transportadora.

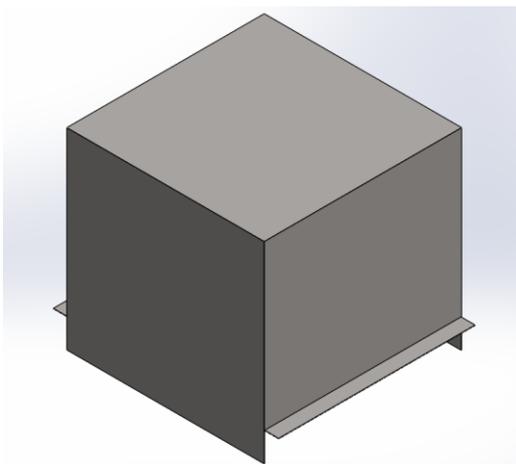


Figura 56. Caja de visión artificial

En cuanto a las dimensiones la altura es el único valor que requiere ser calculado ya que de esta depende el correcto funcionamiento del sistema de visión debido a que al tener una altura más reducida el área que ocupa un grano en la imagen aumenta lo cual favorece a diferenciarlo del ruido que pueda existir, partiendo del ángulo de visión de la cámara y la distancia de trabajo sobre la banda, es conveniente el uso de 2 cámaras como se muestra en la Figura 57 con el objetivo de disminuir dicha altura y conseguir una mayor nitidez en la imagen.

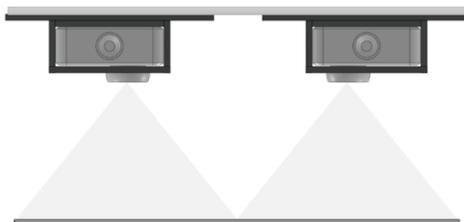


Figura 57. Ubicación de las cámaras del sistema

Por lo tanto, la altura se calcula como se muestra en la Figura 58:

Ángulo de visión: 50 grados

Ancho total de la banda: 40 cm

Ancho de captura de cada cámara: 20 cm

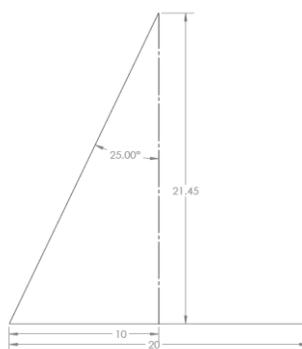


Figura 58. Cálculo de la altura en las cámaras

El valor de 21.45 cm es la altura desde el lente de la cámara hasta la banda, por lo que se adiciona 10 cm que ocupa el cuerpo de la cámara con su soporte y las conexiones eléctricas.

Las dimensiones de la caja de visión artificial finales son:

Largo: 40 cm

Ancho: 61cm

Altura: 31.45 cm

- *Diseño del Separador de granos*

El separador del grano es el elemento encargado de la distribución y alineación de los granos desde la banda transportadora hacia el sistema de visión artificial y los sopladores. Los granos descenden desde la tolva por un ducto cuadrado de 60*5*5 cm desembocando en la banda por la abertura existente al final del mismo como se observa en la Figura 59.



Figura 59. Salida del grano hacia la banda transportadora

El movimiento de la banda causa que los granos sean arrastrados y desborden por los costados del ducto formándose dos columnas de grano. Esta distribución se muestra en la Figura 60 donde la distancia entre los centros de las columnas es de 87 mm y se mantiene constante.



Figura 60. Flujo del grano en la banda transportadora

Se han identificado dos etapas fundamentales, que son:

- ***Distribución de las columnas de grano.***- Los topes se encuentran ubicados en forma de “M” de tal forma que provocan: la división progresiva de las columnas, la distribución del grano por toda el área de trabajo (0.3 m) y el descongestionamiento de producto por una sola vía.
- ***Alineación en 12 columnas.***- Una vez propagado el grano a lo ancho de la banda, se colocan topes alineados a los sopladores ubicados al final de la banda transportadora.

Se propone el diseño mostrado en la Figura 61 donde el movimiento del grano es unidireccional y considerando un espaciamiento de al menos 17 mm entre topes para evitar el taponamiento de los canales.

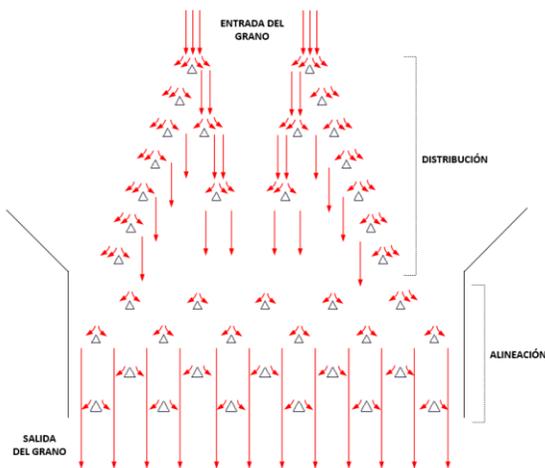


Figura 61. Flujo del grano dentro del separador

Al final de la etapa de distribución los granos deben estrechar su canal de circulación en 12 vías alineadas; considerando que son varios los granos circulando, los toques de la segunda etapa se han colocado de forma intercalada para prevenir la compresión de los granos durante el estrechamiento del canal, mejorando la fluidez sin comprometer la alineación. A los costados de los toques se encuentran láminas de acero inoxidable que cubren todo el ancho de la banda (0.4 m) a fin de redireccionar todo grano expulsado más allá del área de trabajo.

Por lo tanto, el separador está conformado por toques circulares de acero inoxidable acoplados a un soporte de aglomerado de madera MDF para su sujeción a la estructura de la máquina, el modelo del separador está en la Figura 62.

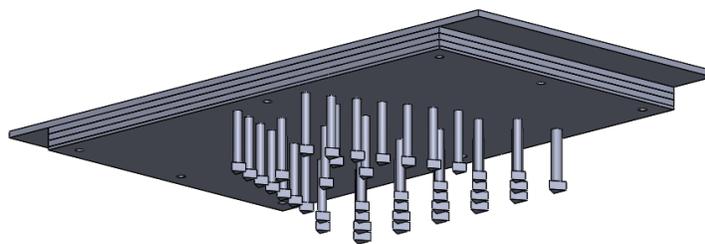


Figura 62. Separador de granos

- *Sistema de eyección del grano*

Para la clasificación de los granos de maíz se utiliza electroválvulas 3/2 (3 vías 2 posiciones) normalmente cerradas, el solenoide de las mismas será activado y desactivado mediante relés controlados por el PLC.

Los granos son encaminados a través de la banda en 12 columnas por lo que con la ayuda de pasamuros conectados a las electroválvulas y acoplados en un soporte metálico realizan el proceso de clasificación expulsando pulsos de aire comprimido por lapsos 100ms a los granos de diferente tonalidad. (Figura 63)

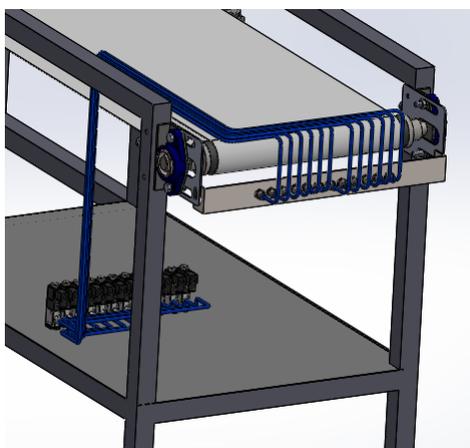


Figura 63. Sistema de eyección del grano

El aire comprimido que provee un compresor por lo general contiene polvo y humedad dependiendo de las condiciones ambientales donde se encuentra el compresor, además la presión de aire en el compresor no es constante por lo que es necesario tratarlo mediante una unidad de mantenimiento que consta de un filtro, un regulador de presión y un lubricador. La forma de eyección del grano que se propone para la clasificadora no consta de actuadores neumáticos como tal, por lo que el uso del lubricador de la unidad de mantenimiento en este caso es innecesario.

El filtro de aire permite filtrar la suciedad y partículas de agua con lo que aseguramos que el aire expulsado este limpio y seco y el regulador nos permite fijar una presión estable adecuada para la clasificación, la selección de la unidad de mantenimiento se la realiza en base a al caudal máximo y la presión de trabajo por lo que la unidad mostrada en Figura 64 es la más adecuada.



Figura 64. Unidad de mantenimiento FR EMC EW2000-02

Fuente: (E.MC, 2017)

Las especificaciones técnicas de la unidad de mantenimiento FR-EW2000-02 se muestran en la Tabla 29

Tabla 29.
Especificaciones técnicas EW2000-02

| Model | EW1000 | EW2000 | EW3000 | EW4000 | EW5000 |
|-------------------------------------|--------|--------|---------------------------|-----------|--------|
| Guaranteed pressure resistance(MPa) | | | 1.5 | | |
| Max. working pressure(MPa) | | | 1.0 | | |
| Working temperature(°C) | | | 5-60 | | |
| Filter precision | | | 40µm (5 µm is optional) | | |
| Bowl material | | | Polycarbonate | | |
| Bowl guard | | None | | Available | |
| Pressure adjusting range(MPa) | | | 0.15-0.85 | | |
| Valve type | | | With overflow | | |

Las 12 electroválvulas a utilizarse tienen las características técnicas mostradas en la Tabla 30, siendo estos los parámetros a considerar en la selección de un compresor adecuado.

Tabla 30.

Datos técnicos de la electroválvula

| Model NO. | V3211-M5 V3212-M5 | V3211-06 V3212-06 | V3221-06 V3222-06 | V3221-08 V3222-08 | V3231-08 V3232-08 | V3231-10 V3232-10 | V3241-10 V3242-10 | V3241-15 V3242-15 |
|----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Port size | M5 | G1/8 | G1/8 | G1/4 | G1/4 | G3/8 | G3/8 | G1/2 |
| Sectional area(mm ²) | 5.5(CV=0.31) | 12(CV=0.67) | 14(CV=0.78) | 16(CV=0.89) | 25(CV=1.40) | 30(CV=1.68) | 50(CV=2.79) | 50(CV=2.79) |
| Working medium | Clean air(After 40 μm filtration) | | | | | | | |
| Acting type | Pilot type | | | | | | | |
| Lubrication | Not required | | | | | | | |
| Working pressure(MPa) | 0.15-0.8 | | | | | | | |
| Guaranteed pressure(MPa) | 1.2 | | | | | | | |
| Working temperature(°C) | -5-60 | | | | | | | |
| Voltage range | -15%-10% | | | | | | | |
| Power consumption | DC:2.8W ; AC:3.0VA | | | DC:4.8W ; AC:5VA | | | | |
| Insulation class | Class F | | | | | | | |
| Protective class | IP65(DIN40050) | | | | | | | |
| Max. acting frequency | 5 Cycles/s | | | | | | | |
| Activate time(S) | <0.05 | | | | | | | |
| Weight(g) | V3211: 102 V3212: 169 | V3221: 107 V3222: 303 | V3231: 260 V3232: 370 | V3241: 443 V3242: 569 | | | | |

Fuente: (E.MC, 2017)

Mediante pruebas experimentales con manguera de 6 mm de diámetro se obtiene que la presión necesaria para soplar un grano de maíz es de 2 Bar. La mayoría de equipos neumáticos operan a mayores presiones, por lo que la presión suministrada por los compresores en el mercado es suficiente para el sistema; además, se considera un 20% por pérdidas en la instalación y los elementos de conexión. Al no contar con actuadores neumáticos se calcula el caudal necesario en base al diámetro de la manguera y la velocidad de salida del aire, se toma en consideración el caudal aproximado que circula por las electroválvulas mostrado en la Figura 65, ya que el caudal requerido no los debe superar.

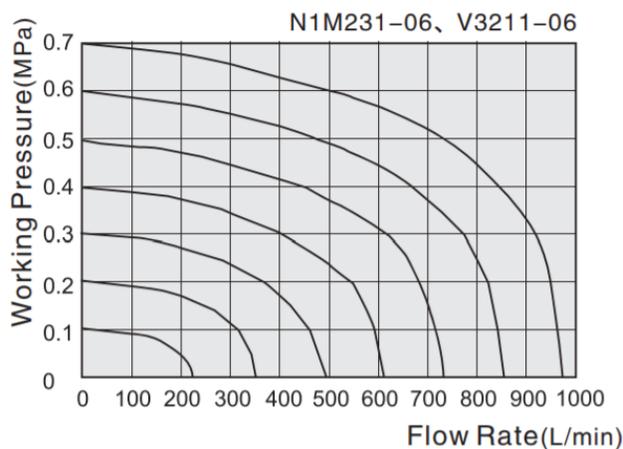


Figura 65. Caudal vs Presión de trabajo

Fuente: (E.MC, 2017)

El flujo de aire a presión que circula por las mangueras se acciona por disparos de 100 ms debiendo recorrer una distancia aproximada de 5 cm en dicho tiempo para soplar el grano. Por lo que la velocidad del aire requerida es de:

$$v = \frac{\text{distancia}}{\text{tiempo}}$$

$$v = \frac{0.05m}{0.1 s}$$

$$v = 0.5 \frac{m}{s}$$

El caudal que circula por una sección circular viene dado por:

$$Q = 60 * v * \pi * \left(\frac{d}{2}\right)^2$$

Donde:

Q = Caudal de aire

v = Velocidad del aire m/s

d = Diámetro de la manguera

$$Q = 60 * 0.5 * \pi * \left(\frac{0.006}{2}\right)^2$$

$$Q = 0.0008482 \frac{m^3}{min}$$

Considerando el caso extremo de una activación simultánea de todas las electroválvulas y las pérdidas se tiene:

$$Q_T = 12 * Q * 1.2$$

$$Q_T = 0.01221 \frac{m^3}{min}$$

$$Q_T = 12.21 \frac{lbs}{min}$$

En la Figura 66 se muestran las características técnicas del compresor el cual tiene una capacidad de 9000 L/min operando a 6.21 Bar siendo la presión máxima suministrada de 8.62 Bar.



Figura 66. Placa del compresor

Se comprueba que el compresor disponible en la empresa cumple con los requisitos de caudal y presión requeridos por el sistema y no supera el caudal máximo de la electroválvula para 2 Bar provistos en la Figura 65.

3.3.1.2. Diseño de los componentes eléctricos y/o electrónicos y de control

La clasificadora de granos para su operación cuenta con un motor que genera el movimiento a la banda transportadora y un conjunto de electroválvulas que son las encargadas de separar el producto de color diferente al requerido a través de una sincronización con el sistema de visión artificial. El control lo realiza un PLC mediante salidas digitales hacia módulos relé los cuales activan y desactivan los solenoides de las electroválvulas. Para poner en marcha estos elementos es necesario realizar el diseño de los componentes eléctricos para la protección y arranque del sistema, en base a la red de energía eléctrica con la que cuenta la empresa y la corriente de consumo de los elementos.

- *Motor*

La empresa cuenta con una red de energía eléctrica trifásica de 220 VAC a 60 Hz entre fases por lo que el motor seleccionado a partir de los requerimientos mecánicos en se muestra en la Tabla 31

Tabla 31.
Características Motor Trifásico MOTIVE 63B-4 Serie DELPHI

| CARACTERÍSTICA | VALOR | UNIDADES |
|--------------------|-------|----------|
| POTENCIA | 0.25 | HP |
| VELOCIDAD | 1672 | RPM |
| TORQUE | 1.23 | Nm |
| POLOS | 4 | N/A |
| CLASE | IE2 | N/A |
| FACTOR DE POTENCIA | 68.2 | % |
| PESO | 4.7 | Kg |

Fuente: (Motive, 2016)

La conexión en el motor se la realiza en delta por lo que las características técnicas con las que se calcula los elementos de protección y arranque son $P = 0.2$ Kw y $\text{Cos } \varphi = 0.68$.

- *Calibre del conductor*

El calibre se lo calcula a partir de la corriente I_c que consume el motor

$$I_c = \frac{P_n}{\sqrt{3} * V * \cos \varphi}$$

Donde:

$I_c =$ Corriente consumida

$P_n =$ Potencia nominal

$V =$ Voltaje

$\cos \varphi =$ factor de potencia

Por lo que:

$$I_c = \frac{200 [W]}{\sqrt{3} * 220 [V] * 0.68}$$

$$I_c = 0.77 [A]$$

Una vez calculada la corriente que consume el motor se calcula la corriente de diseño que es 25% más debido al arranque por lo que

$$I_d = 0.77 * 1.25 [A]$$

$$I_d = 0.964 [A]$$

$$I_d \approx 1 [A]$$

El calibre del conductor para el motor se selecciona a partir de un catálogo del fabricante (Fabri-cables, 2016) como se muestra en la Tabla 32 donde se elige un cable AWG22 cuya capacidad de corriente es de 3 amperios al ser la más baja que disponen comercialmente.

Tabla 32.

Características físicas y eléctricas conductores flexibles aislados

| TIPO | CALIBRE | CONDUCTOR | | | | AISLAMIENTO | | | PESO TOTAL APROX | CAPACIDAD CORRIENTE |
|------|---------|-----------|----------|-------|------------|-------------|------------|------------|------------------|---------------------|
| | | # H | DIÁMETRO | | PESO APROX | ESP PROM | DIAM APROX | PESO APROX | | |
| | HILO | | APROX | Kg/Km | | | | | mm | mm |
| | AWG | # | mm | mm | Kg/Km | mm | mm | Kg/Km | Kg/Km | Amp |
| TFF | 22 | 7 | 0,25 | 0,80 | 3,20 | 0,76 | 2,32 | 5,21 | 8,42 | 3 |
| TFF | 20 | 10 | 0,25 | 1,02 | 4,57 | 0,76 | 2,54 | 5,95 | 10,52 | 4 |
| TFF | 18 | 16 | 0,25 | 1,20 | 7,32 | 0,76 | 2,72 | 6,55 | 13,87 | 6 |
| TFF | 16 | 16 | 0,32 | 1,50 | 11,61 | 0,76 | 3,02 | 7,55 | 19,17 | 8 |
| GPT | 14 | 26 | 0,32 | 2,00 | 18,87 | 0,76 | 3,52 | 9,23 | 28,09 | 20 |
| GPT | 12 | 41 | 0,32 | 2,50 | 29,75 | 1,14 | 4,78 | 18,25 | 48,00 | 25 |
| GPT | 10 | 65 | 0,32 | 3,20 | 47,17 | 1,14 | 5,48 | 21,76 | 68,93 | 30 |

Fuente: (Fabri-cables, 2016)

- *Disyuntor*

En la parte de protección del circuito se debe colocar un interruptor magnético que proteja al motor de cortocircuitos, por lo que se selecciona un disyuntor en base a la corriente I_p que es 8 veces la corriente nominal debido a que los motores consumen una gran potencia para vencer las resistencias desde el reposo hasta que llegan a su velocidad final.

$$I_p = I_d * 8 [A]$$

$$I_p = 1 * 8 [A]$$

$$I_p = 8 [A]$$

De acuerdo a valores comerciales se selecciona un disyuntor de 10 A

- *Contactor*

El motor trifásico seleccionado es de tipo jaula de ardilla por lo cual se selecciona un contactor de tipo AC3 a 10 A.

- *Relé térmico*

Para la protección térmica se considera la corriente de diseño $I_d = 1$ cuyo valor se regula en el relé térmico.

- *Sistema de control*

El sistema de control se encarga de la integración de los elementos que cumplen las tareas de recepción y procesamiento de la imagen, y el envío de la señal de control hacia las electroválvulas. La máquina clasificadora de granos necesita de al menos 13 salidas digitales para el accionamiento de los diferentes actuadores eléctricos y neumáticos, además de velocidades altas de procesamiento para el análisis de las imágenes a velocidad.

Los candidatos para la implementación son los siguientes:

- CPU / PICs
- CPU / Controllino
- Raspberry Pi 3B
- Sistema de visión SIMANTIC MV

Los microcontroladores PIC se ajustan a cualquier necesidad de la industria por su variedad en el mercado y su programación sencilla en lenguaje C. Sin embargo, no son elementos autónomos y requieren de varios componentes para su funcionamiento, por lo que se debe diseñar un circuito impreso (PBC) donde se colocan los componentes y las borneras para los terminales del cableado; además es necesario de una placa programadora para grabar el programa dentro del PIC, es decir hardware adicional. Por lo tanto, su implementación no es directa y requieren de un diseño más elaborado para su implementación, en entornos industriales suelen requerir protección contra interferencia electromagnética (EMI).

El Controllino es un controlador lógico programable (PLC) industrial basado en software libre Arduino especializado en la integración del hardware del sistema debido a su manejo sencillo de sensores digitales, analógicos, y accionamiento de actuadores mediante sus salidas digitales y PWM, tiene la ventaja de trabajar con voltajes de 12V o 24V, comunes en la industria, lo que les permite integrarse directamente a los sistemas industriales. (Controllino, 2016).

Por su parte la Raspberry Pi tiene su fuerte en el software, el procesamiento de varias tareas simultáneas y tiene el respaldo de la comunidad Linux, ideal para aplicaciones software como conexiones a internet, reproducción de videos, música; es una computadora por sí misma e incorpora varias salidas digitales para libre uso, pero existe el riesgo de

desconfigurar la Raspberry Pi si no se apaga adecuadamente y necesita de módulos externos para el uso de sensores. (Orsini, 2014).

Simantic MV son sistemas de visión artificial completos los cuales se encuentran listos para su implementación en ambientes industriales con protección IP65, su programación se facilita ya que su funcionamiento es a base de entrenamiento y no es necesario conocimientos de análisis de imágenes. Realiza procesos de inspección rápidos y a alta resolución procesando alrededor de 30 fps, tiene compatibilidad con módulos de E/S para su integración a procesos industriales. (SIEMENS, 2006)

Se toma en cuenta el trabajo de grado de la Universidad Politécnica de Madrid (González, 2016), donde se analiza el tiempo de respuesta de un computador y dos versiones de la Raspberry Pi para la detección de objetos por color, el cual realiza un algoritmo similar con procesos como: transformación de imagen al estándar HSV, seguimiento de objetos, operaciones morfológicas, cálculo de centro de masa y coordenadas, etc. Los resultados del estudio se muestran en la Figura 67



Figura 67. Comparación de los tiempos de ejecución del programa en el ordenador y Raspberry Pi

Fuente: (González, 2016)

El programa necesario para la realización del presente proyecto demanda mayor complejidad debido al uso de una HMI y el manejo de los actuadores, la elección de un buen procesador determinará la velocidad con que opera el sistema afectando los requerimientos del sistema como la capacidad.

En la Tabla 33 se resumen las características de interés de las diferentes alternativas para el sistema de visión artificial.

Tabla 33.

Características de procesadores y controladores para el sistema de visión artificial

| Procesadores | CPU | RASPBERRY PI 3B | SISTEMA DE VISIÓN SIMANTIC MV |
|-----------------------------------|--|----------------------------|--|
| Precio en Ecuador (usd) | 306 | 71 | 5000 |
| Procesador | Asus Intel Core i3-6100 CPU @ 3.7GHz x 4 | ARM Cortex-A53, 1.2GHz x 4 | Pentium 4 a 2.4 GHz o superior |
| GPU | Intel HD Graphics 530 | Broadcom VideoCore IV | Capturador de imágenes |
| Disco duro | 320 GB | microSD | 384 MB |
| Adaptador | USB, Ethernet | USB, Ethernet | VGA de 64k |
| Cámara | Digital | Digital | Analógica |
| Requerimientos adicionales | N/A | N/A | CPU Pentium 4 a 2.4GHz con un slot PCI libre, Windows 2000 o XP x64 bits |
| Sistema operativo | Linux x64 bits | Linux x64 bits | VX works |

Continúa siguiente pág.

| Controladores | PICs | CONTROL LINO MINI | RASPBERRY PI | MÓDULO E/S |
|-----------------------|--------------------------------|---------------------|--------------|-------------|
| E/S digitales | 4 < | 16 | 40 | 6 |
| Entorno de desarrollo | Visual Studio / MicroBasic Pro | Python/ Arduino IDE | Python | Visionscape |

Considerando todo lo anterior se evalúa los candidatos en la Tabla 34 bajo los criterios de selección de la sección de la Tabla 5

Tabla 34.

Tabla de selección para el sistema de control

| Elemento: Procesador y Controlador Electrónico | | | Alternativas | | | | | | | |
|--|----------|------------------|--------------------------|----------------------|--------------------------|----------------------|--------------|----------------------|------------------------------|----------------------|
| | | | Pics / Computador (Ref.) | | Controllino / Computador | | Raspberry Pi | | Sistema de Visión Industrial | |
| Criterios de Selección | Peso (%) | Nro. de criterio | Calificación | Evaluación Ponderada | Calificación | Evaluación Ponderada | Calificación | Evaluación Ponderada | Calificación | Evaluación Ponderada |
| Costo de Fabricación | 13,1 | 2 | 3 | 0,393 | 4 | 0,524 | 5 | 0,655 | 1 | 0,131 |
| Robustez | 11,9 | 3 | 3 | 0,357 | 4 | 0,476 | 2 | 0,238 | 5 | 0,595 |
| Normas de Diseño Industrial | 11,8 | 4 | 3 | 0,354 | 4 | 0,472 | 2 | 0,236 | 5 | 0,59 |
| Componentes Estandarizados | 10,5 | 5 | 3 | 0,315 | 4 | 0,42 | 4 | 0,42 | 3 | 0,315 |
| Velocidad de la Banda | 8,4 | 6 | 3 | 0,252 | 4 | 0,336 | 2 | 0,168 | 4 | 0,336 |
| Porcentaje de Eficiencia | 8,4 | 7 | 3 | 0,252 | 4 | 0,336 | 4 | 0,336 | 5 | 0,42 |
| Diseño Modular | 5,7 | 10 | 3 | 0,171 | 4 | 0,228 | 3 | 0,171 | 3 | 0,171 |
| Total Evaluación | | | | 2,094 | | 2,792 | | 2,224 | | 2,558 |
| Lugar | | | | 4 | | 1 | | 3 | | 2 |
| ¿Continuar? | | | No | | Sí | | No | | No | |

La mejor opción en base a las necesidades de la empresa es implementar un CPU junto con un PLC Controllino MINI (Figura 68), los cuales se encuentran disponibles en el mercado; en la Tabla 35 se muestra una ampliación de sus características.

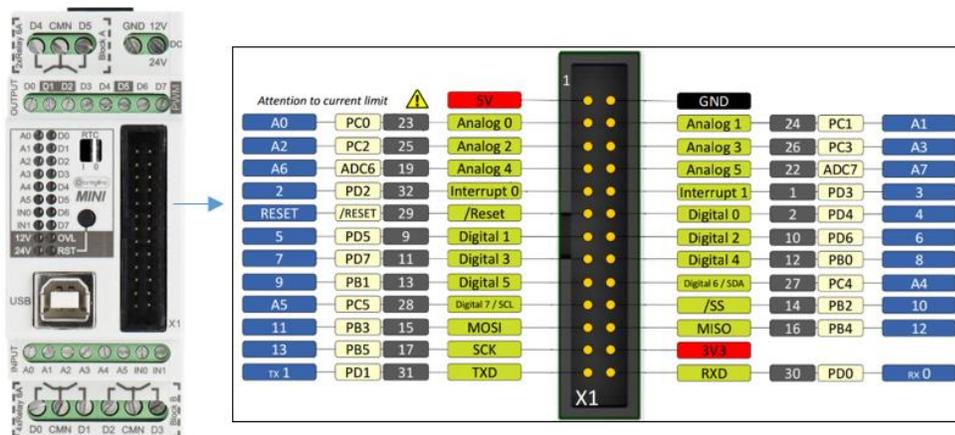


Figura 68. Controllino MINI

Tabla 35.

Características Controllino MINI

| CARACTERÍSTICA | DESCRIPCIÓN |
|--------------------------|--|
| Estándar | EN 61010-1, EN 61010-2-201, EN 91131-2 |
| Montaje | Riel EN 50022, 35mm |
| Temperatura de operación | 5°C - 55°C |
| Voltaje de alimentación | 12V Rango entre 10.2V – 15V 24V Rango entre 20.4V – 30V |
| Entradas | 8 Sin aislamiento galvánico 4 Análogo/Digital Comunes 2 Digital fijo 2 Analógico fijo |
| Salidas digitales | 8 Sin aislamiento galvánico 6 Salidas de Relé paralelas a las digitales |
| Salida de relé | 250 V AC/ 30V DC, máximo 6A |
| Protección | Fusible interno de 8A |

- *Sistema electro neumático*

La clasificación se la realiza a través de 12 hileras de granos que cruzan frente a una matriz de electroválvulas encargadas de abrir y cerrar el paso de aire a presión. Para un control autónomo de la apertura y cierre de las válvulas se requiere que la conmutación sea a través

de solenoides a 110V o 220V (Figura 69) para aprovechar la red eléctrica de la empresa, y cámaras de 3/2 o 2/2 con retorno de muelle.



Figura 69. Electroválvula 3/2 EMC

- *Sistema de iluminación*

La iluminación está ubicada en una cámara oscura para aislar el sistema de la luz ambiente, se requiere de iluminación constante sin intermitencias, con alta luminosidad, eficiencia energética y larga vida.



Figura 70. Módulo LED Easy I6310

Fuente: (Lighting Studio Desing, 2017)

La empresa nacional LEDEX ofrece amplia variedad en iluminación LED la cual cumple con los requerimientos antes mencionados, se selecciona el módulo LED I6310 (Figura 70) que presenta las características de la Tabla 36

Tabla 36.
Características del Módulo LED I6310

| CARACTERÍSTICA | DESCRIPCIÓN |
|-----------------------|--------------------|
| Potencia | 15 w |
| Temperatura del color | 2700/4000/6500K |
| Color | Blanco |
| Diámetro | 183 mm |
| Voltaje | 100 -260 V |
| Factor de potencia | 0.9 |
| Tiempo de vida | 20000 H |
| Lúmenes | 1300 – 1500 LM |

Fuente: (Lighting Studio Desing, 2017)

- *Cámara*

Todos los tipos de cámara de la Tabla 2 pueden ser utilizados para aplicaciones de visión artificial, las de tipo inteligente alcanzan similares prestaciones que las especializadas y su implementación es sencilla. De acuerdo a las condiciones de ambiente y funcionamiento de la empresa se toman en cuenta ciertas características importantes, por ejemplo, el sistema de visión artificial de la máquina clasificadora debe poder capturar imágenes a velocidad con una buena nitidez, esto depende de los cuadros por segundo (fps), otro aspecto es la forma de comunicación ya que se pretende evitar procesos de instalación adicionales mediante el uso de cámaras comunes, cámaras web, que adicionalmente son de disposición inmediata en el mercado y de bajo costo.



Figura 71. Cámara Greentree GT-V55

La cámara web seleccionada es la Greentree GT-V55 (Figura 71) y presenta las características de la Tabla 37.

Tabla 37.

Características de la Cámara Greentree GT-V55

| CARACTERÍSTICA | DESCRIPCIÓN |
|-----------------------------|-------------|
| Sensor | VGA CMOS |
| Ángulo de visión | 50 ° |
| Formato | RGB |
| Profundidad de color | 24 bit |
| Resolución | VGA |
| Velocidad máxima de captura | 90 fps |
| Tipo de conexión | USB |

Para un sistema de visión artificial a velocidad ayuda tener una resolución baja debido a que la cantidad de pixeles que procesa el sistema es menor, y junto con la iluminación se le puede sacar el mayor provecho a la captura de imágenes.

- *Esquema eléctrico*

En la Figura 72 y la Figura 73 se muestra un esquema de conexiones para los elementos dimensionados en un circuito de potencia y uno de control.

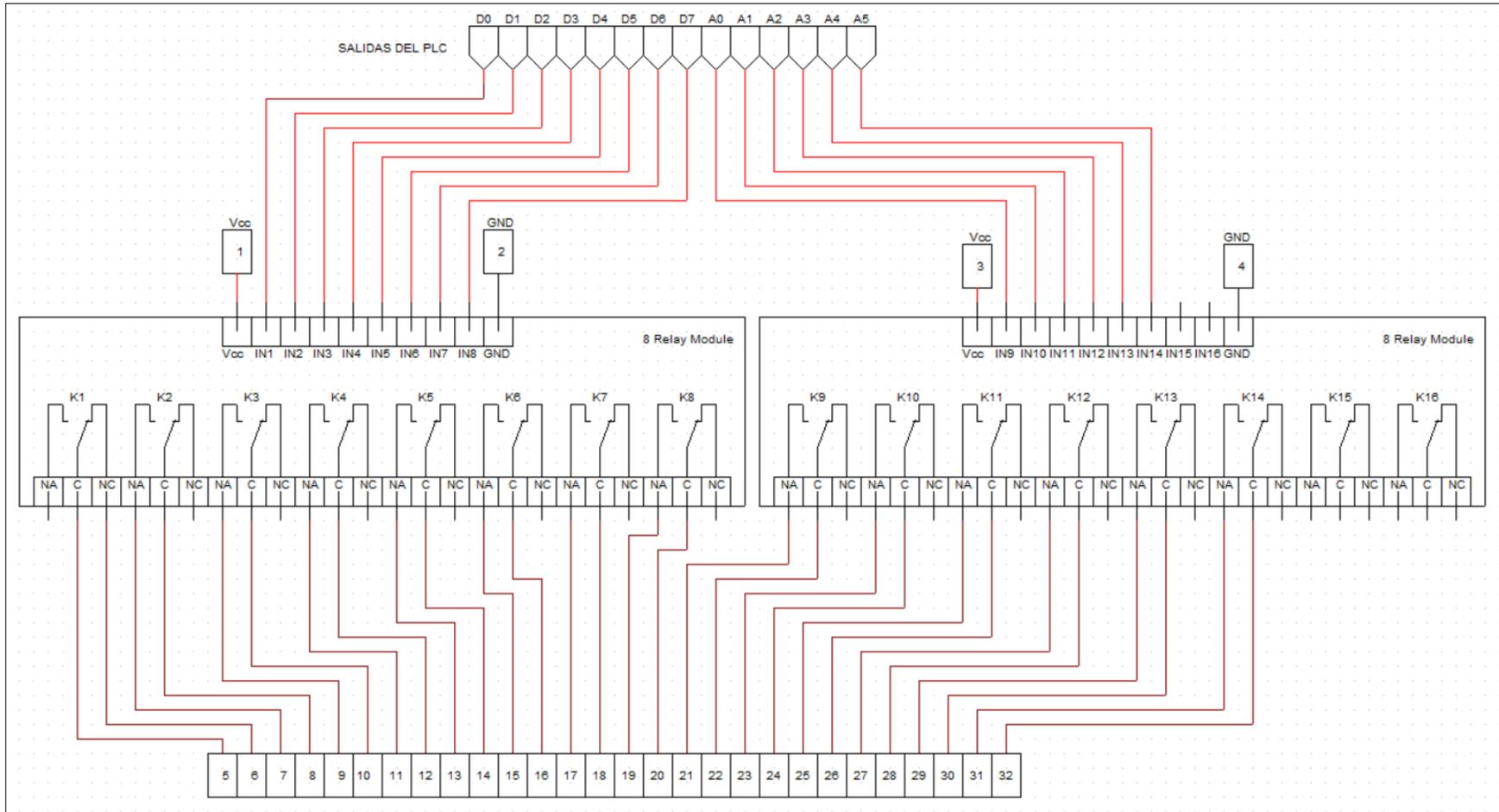


Figura 73. Esquema de conexiones eléctricas 2/2

3.3.2. Diseño del software

3.3.2.1. Diseño de la lógica de programación del sistema

Los procesos de diseño preliminares de los componentes individuales sirven para lograr la funcionalidad conjunta del sistema de clasificación, cuya lógica se realiza de acuerdo al diagrama de flujo de la Figura 74.

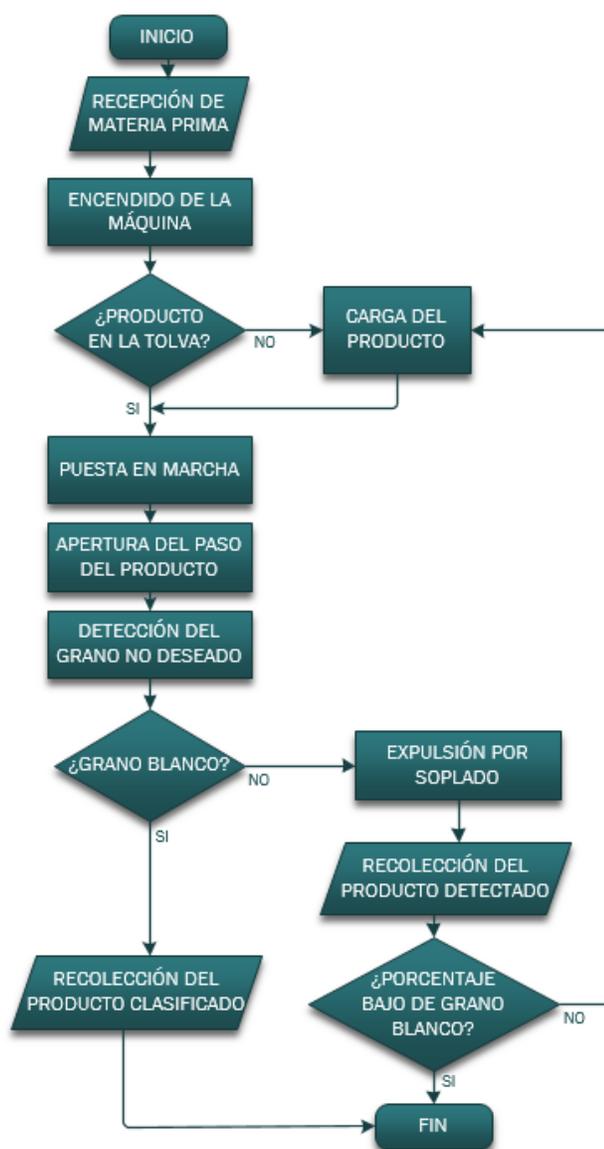


Figura 74. Diagrama de flujo del sistema de clasificación

A partir de la lógica del sistema se puede diferenciar los procesos manuales que son realizados por el operador, y los procesos del software que se requieren programar. Se identifica como manuales a los siguientes procesos:

- **Recepción de la materia prima.** - Almacenamiento, disposición y movilización de los granos de maíz dentro de la empresa.
- **Encendido de la máquina.** - Energización y encendido desde el tablero de control, el procedimiento se encuentra detallado en el manual del usuario adjunto en el Anexo 1
- **Carga del producto.** - Llenado manual de la tolva con producto sin procesar.
- **Puesta en marcha.** - Uso de la interfaz humano máquina y activación del sistema.
- **Apertura del paso del producto.** - La máquina cuenta con una manija que permite el paso del grano de la tolva hacia la banda transportadora como se muestra en la Figura 75.



Figura 75. Compuerta para el paso de grano

- ***Recolección del producto clasificado y mezclado.*** - Una vez realizada la clasificación el producto se recoge en dos contenedores diferentes, y el producto clasificado es llevado a la siguiente estación en la línea de producción.

Los procesos restantes son los abordados en la programación:

- ***Detección del grano no deseado.*** - Mediante el uso de los algoritmos de programación y visión artificial el sistema es capaz de responder a las órdenes del usuario ingresadas en la interfaz, mejorar la imagen obtenida, diferenciar eficazmente los tonos de color de los granos para identificar el grano a expulsar y ubicar el grano en la imagen para activar la electroválvula correspondiente en un tiempo determinado.
- ***Expulsión por soplado.*** - Se coordina el tiempo de activación mediante la detección del paso de los granos por un mismo sector a fin de asegurar repetibilidad, se considera la forma de envío de datos y se envía la señal eléctrica para la activación de las electroválvulas.

La programación se encuentra desarrollada en el lenguaje Python 2.7 y en el software libre de Arduino IDE en conjunto con las librerías de OpenCV correspondientes a visión artificial. Los periféricos se conectan por los puertos USB del ordenador y la forma de transmisión de datos se realiza mediante la comunicación serial de los puertos USB, donde dos cámaras web y el PLC Controllino MAXI son los encargados de la captura de video y la activación de las electroválvulas respectivamente. En el diagrama de flujo de la Figura 76 se detalla el procedimiento realizado por el software para clasificar del grano y el programa escrito en Python se encuentra adjunto en el Anexo 2

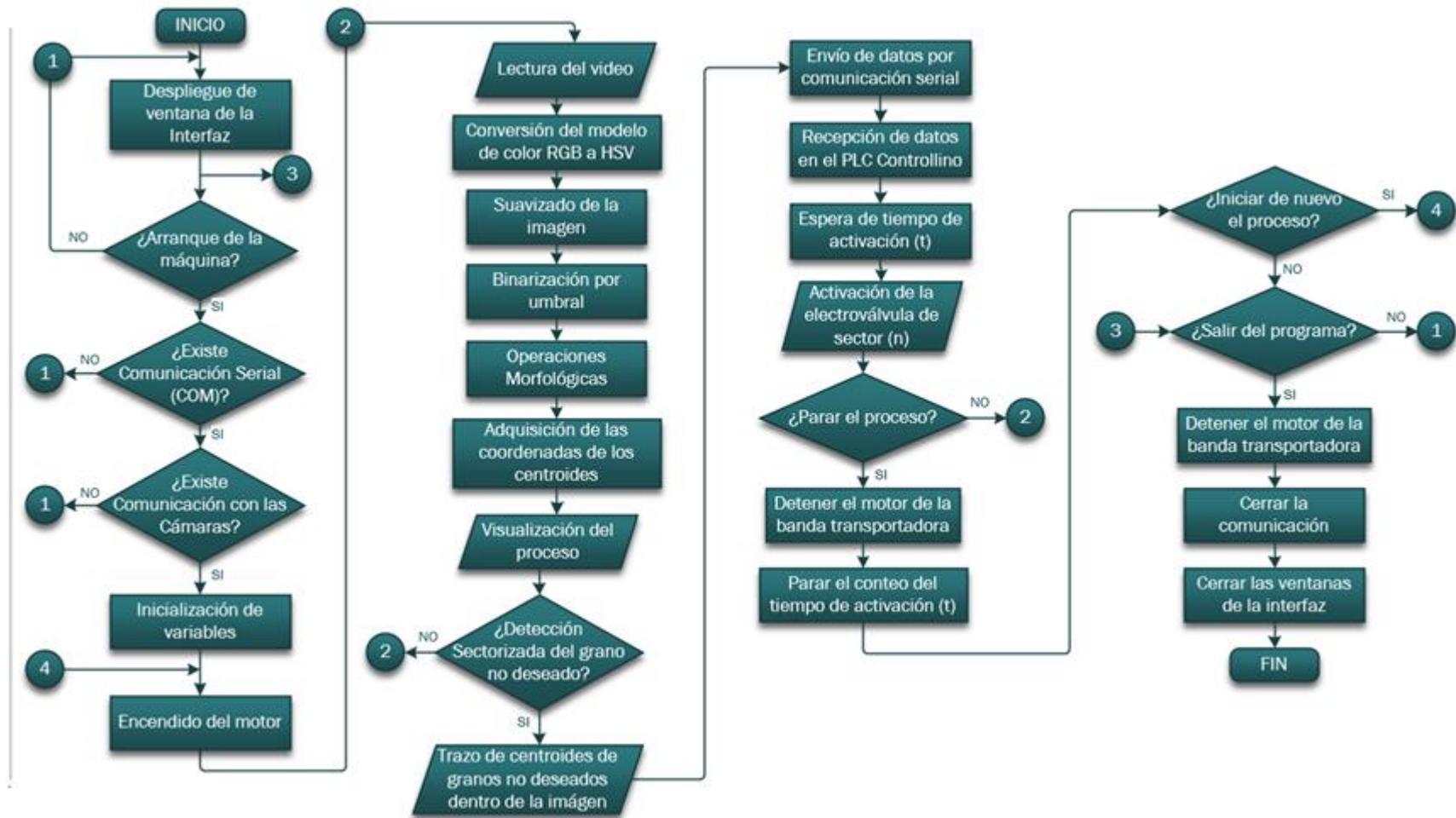


Figura 76. Diagrama de flujo del algoritmo de programación

Una vez inicializada la comunicación con los periféricos se procede a la adquisición de imágenes para su tratamiento y mejoramiento a fin de reducir el ruido causante de falsos positivos en la detección del grano no deseado. Las interfaces de programación de aplicaciones (API) disponibles en OpenCV realizan las operaciones necesarias para el procesamiento de la imagen y consisten en:

- **Conversión de modelo RGB a HSV.** - Las imágenes obtenidas de la cámara se reciben en el modelo RGB, el cual es la combinación de los colores primarios rojo, verde y azul y sus valores de pixel son transformados a valores de matiz, saturación e iluminación (HSV). Trabajar en el modelo HSV facilita la obtención del rango de colores debido a que trabaja con un valor fijo de color y cuantifica su pureza e iluminación presente en la imagen.
- **Suavizado de imagen.** - Es la aplicación de un filtro que reduce el ruido presente analizando una región del tamaño de un operador, kernel, que se desliza a lo largo de toda la imagen. El valor del pixel a la salida de la operación es la media de sus vecinos, obteniendo una imagen difuminada como se observa en la Figura 77.



Figura 77. Imagen suavizada

- ***Binarización por umbral.*** - Al definir un rango de color en el formato HSV el software convierte la imagen real en una imagen binaria, de color blanco o negro de acuerdo a los colores dentro del rango establecido. En la Figura 78 se observa la imagen binarizada a partir de la real donde los colores dentro del rango se transforman en blanco (255) y el resto en negro (0).

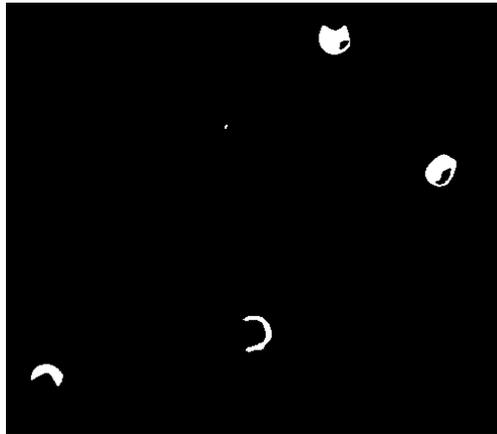


Figura 78. Imagen binarizada

- ***Operaciones Morfológicas.*** - Son aplicadas a la imagen ya binarizada, se centra en el análisis de la vecindad del pixel para realizar procesos de erosión, dilatación y cierre de contornos a fin de eliminar ruido y delimitar la forma de los objetos identificados en la binarización como se observa en la Figura 79.



Figura 79. Operaciones morfológicas en la imagen

- **Adquisición de los centroides.** - De acuerdo a los píxeles de la imagen binarizada se identifica los contornos de los objetos y se obtienen el área y el centroide de los mismos, los cuales sirven para validar la presencia de un grano y conocer su ubicación en coordenadas de pixel como muestra la Figura 80 donde se traza un círculo en el centroide localizado descartando los objetos de área reducida que pudieran ser ruido.



Figura 80. Ubicación del grano no deseado en la imagen en hileras.

3.3.2.2. Programación del sistema de control.

El sistema de control seleccionado para su implementación en la máquina clasificadora es de lazo abierto, es decir que la acción de control no afecta la entrada del sistema y su funcionamiento depende de la calibración del sistema mediante los tiempos de activación y la configuración del rango de color a descartar.

Como se muestra en el diagrama de bloques de la Figura 81, el control consiste en: la entrada de la imagen al sistema, su procesamiento y el envío de la señal eléctrica al actuador electro-neumático activado por solenoides. Se emplea el tipo de control de dos posiciones

(ON/OFF) que se activa con la detección de los granos no deseados en el sistema de visión artificial y el tiempo de espera entre la detección del grano y su cruce por la electroválvula.

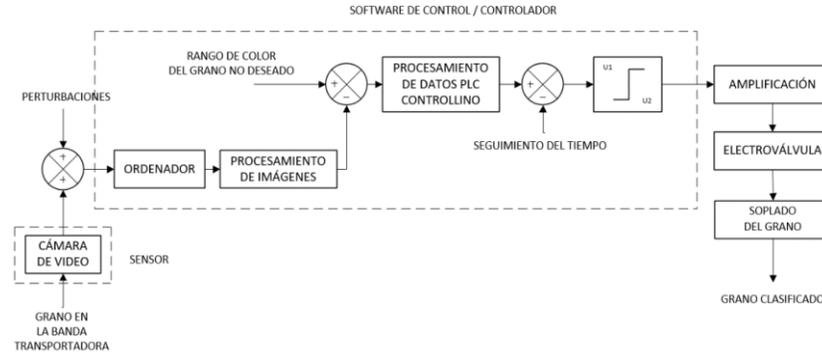


Figura 81. Diagrama de bloques del sistema de control

El tiempo de activación es calculado a partir de la velocidad lineal de la banda, 0.1505 m/s, la distancia entre la zona de detección del grano en la imagen y su posicionamiento frente al soplador, y el tiempo de actualización de variables en el Controllino configurados a 2ms.

La distancia que debe recorrer el grano hasta el final de la banda es de 30cm, siendo el tiempo aproximado de activación:

$$t_1 = \frac{\text{dist. recorrida}}{V. \text{ banda}}$$

$$t_1 = \frac{0.3 \text{ m}}{0.1505 \text{ m/s}}$$

$$t_1 = 1.99 \text{ s}$$

A este valor de tiempo se le suma el tiempo de caída libre del grano desde la altura de la banda al nivel del soplador, que es de 3cm. Calculando se obtiene:

$$t_2 = \sqrt{\frac{2 * h}{g}} = \sqrt{\frac{2 * 0.03}{9.8}}$$

$$t_2 = 0.08 \text{ s}$$

Por tanto, el tiempo de activación es:

$$t = 2.07 \text{ s}$$

Dentro del bloque de procesamiento de datos se conoce que las variables son actualizadas cada 2ms en el controlador, por ende, se programa un contador que realiza el seguimiento del tiempo transcurrido desde la detección del grano. El valor referencial al que llega el contador de tiempo es calibrado en el capítulo de pruebas y refinamiento ya que el sistema depende de la correcta sincronización entre la detección y la activación del actuador.

Las señales de control de 5V enviadas por el PLC Controllino no son suficientes para conmutar las electroválvulas, por lo que entran a una etapa de amplificación donde módulos relé permiten el paso de 110V a las electroválvulas. Para finalizar el aire comprimido se traslada por la tubería y realiza el soplado lo que clasifica el grano en contenedores.

3.3.2.3. Diseño de HMI

Uno de los requerimientos de la empresa es que la máquina sea de fácil operación, por tal motivo es necesario el diseño y la elaboración de una Interfaz Humano – Máquina (HMI) con la cual el operador podrá interactuar con la clasificadora de una forma más amigable e intuitiva. Para llevar a cabo esto es recomendable la utilización de normas tal como la guía ergonómica de diseño de interfaces de supervisión (GEDIS) la cual nos permite elaborar sistemas HMI centrados en el usuario, basados especialmente en la ergonomía cognitiva, garantizando así el correcto funcionamiento del sistema completo.

La HMI diseñada permite al usuario arrancar y detener la banda transportadora la cual automáticamente inicia el proceso de detección con las cámaras, a la vez muestra en ventanas adicionales como el grano de otro color el detectado y muestra alarmas a través de mensajes de confirmación para que el operador tome la decisión o la acción correctiva correspondiente.

Una vez inicializada la aplicación muestra la ventana de la Figura 82 en la cual se muestran 3 botones que cumplen las funciones detalladas en la Tabla 38



Figura 82. Ventana principal

Tabla 38.
Funciones de los botones

| Botón | Función |
|----------|---|
| Arranque | Activa el motor Activa el sistema de visión artificial Despliega las ventanas secundarias |
| Paro | Detiene el motor Inicializa variables Detiene el contador principal |
| Salir | Cierra la comunicación serial Cierra las ventanas Detiene el motor |

En la Figura 83 se muestran las ventanas secundarias las cuales muestran la detección de granos de color anaranjado y la binarización de los granos detectados.

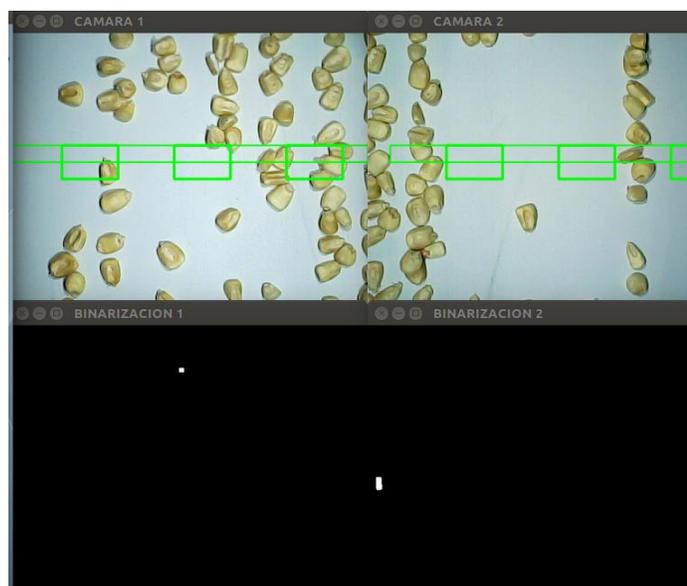


Figura 83. Ventanas secundarias

En la Figura 84 se puede observar como una alarma de la HMI se muestran sobre la ventana principal esperando que el operador confirme la acción.



Figura 84. Alarmas

3.3.3. Implementación

3.3.3.1. Implementación de la máquina.

Una vez diseñados los componentes que conforman la máquina se inicia la implementación física de cada uno de ellos. El proceso de implementación partió con la construcción de la estructura, el maquinado de los rodillos, placas de soporte y la sujeción de la tolva, seguido a esto se acopló el motor, la banda transportadora y los tensores a cada lado de la estructura. Por último, se realizó las conexiones neumáticas, eléctricas y de control. La construcción se la llevo a cabo en las instalaciones de Molinos e Industrias DANHALU, el maquinado de las piezas en el laboratorio de manufactura de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE y ciertos procesos más complejos en empresas especializadas.

- *Estructura*

La estructura se elaboró con perfiles de acero de 40*40*2, para la cual se realizaron cortes con una tronadora portátil a 45° y 90° dependiendo la forma de unión de los tubos cuadrados como se observa en la Figura 85 de acuerdo a los planos que se detallan en el Anexo

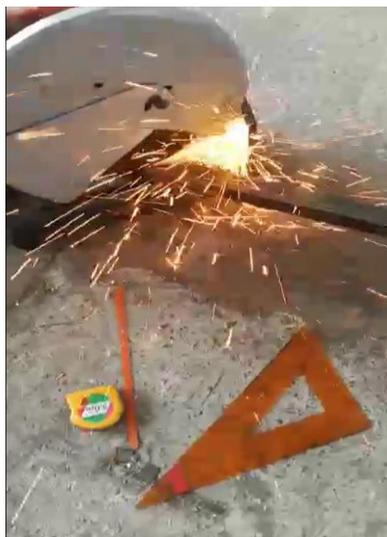


Figura 85. Corte de perfiles de acero

La unión de los tubos se la realizó con soldadura eléctrica (SMAW) con uniones de esquina y en T dependiendo el lugar en la estructura(Figura 86). Para realizar este proceso se utilizó el equipo de protección correspondiente.



Figura 86. Soldadura de la estructura

Una vez soldada la estructura se procede a lijar y pulir todas las uniones con el objetivo de eliminar escorias y filos cortantes. Seguido a esto se taladran los agujeros que soportarán las placas de los tambores y del motor. (Figura 87)



Figura 87. Taladrado de agujeros para placas

Para nivelar la estructura con el piso de la empresa se maquina una placa cuadrada de 6 mm con agujero concéntrico, acoplada a un perno M14*50 y un caucho de recubrimiento que sirve como pie de máquina (Figura 88).



Figura 88. Pie de máquina

- *Placas de soporte*

Para la sujeción de los rodillos, el motor y la banda transportadora se elabora placas de acero inoxidable AISI-304 de 5 mm de espesor mediante corte por chorro de agua para obtener un excelente acabado y sobre todo la exactitud que se requiere en estos componentes ya que de esto depende la correcta alineación de la banda. (Figura 89)



Figura 89. Corte por chorro de agua

- *Tambores*

Para transmitir el movimiento del motor a la banda transportadora se fabricó 2 tambores los cuales fueron conformados por un tubo de acero ASTM A36 de 5 mm de espesor en el cual se incrustaron 2 manzanas con un agujero para acoplar un eje pasante de 25 mm.

Para la fabricación de los tambores se realizaron procesos de torneado, taladrado, fresado, rectificado conforme a los planos y hojas de procesos del Anexo y Anexo respectivamente. (Figura 90).



Figura 90. Maquinado de los rodillos

- *Tolva*

A partir de una plancha de acero inoxidable 304 mate se trazaron las dimensiones para el corte y doblado de las caras laterales de la tolva (Figura 91) acorde al plano del Anexo , seguido a esto seguido a esto se unieron las 4 caras de la tolva a 90 grados mediante soldadura TIG como se muestra en la Figura 92.



Figura 91. Manufactura de la tolva 1/2



Figura 92. Manufactura de la tolva 2/2

- *Ducto de salida*

Para conducir el grano de la tolva hacia la banda transportadora se fabrica un ducto cuadrado de acero inoxidable AISI 304, se encuentra conformado de dos canales en forma de U sujetos mediante remaches de aluminio de 1/8. La sujeción se la realiza con un perno pasante M8x70 de acero inoxidable acoplado en una perforación de la boca cuadrada inferior de la tolva. Adicionalmente para controlar el flujo de granos sobre la banda se implementa una compuerta manual como se muestra en la Figura 93.



Figura 93. Ducto de salida

- *Banda Transportadora*

La banda transportadora que se adquirió es de unión vulcanizada por lo que para que sea desmontable se acoplan por separado las placas de soporte a chumaceras UCFL 205 con 2 pernos M14x50 y estas a la vez con el tambor como se muestra en la Figura 94

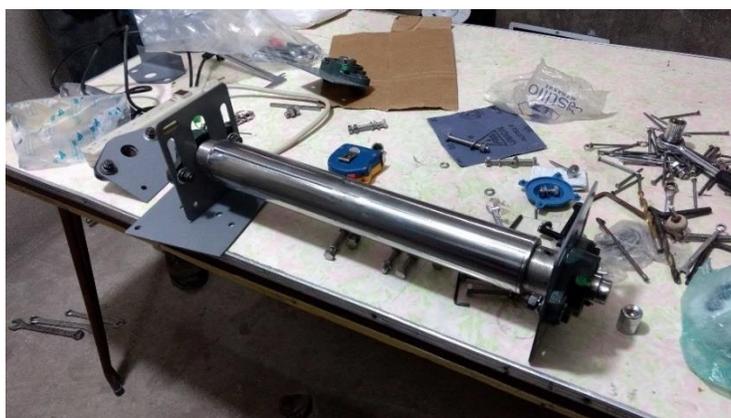


Figura 94. Ensamble del tambor

Las placas que soportan la banda transportadora son acopladas a la estructura mediante 2 pernos M8x60 cada una. (Figura 95)



Figura 95. Placa de tambor motriz

La flecha del tambor motriz es más grande con el objetivo de acoplarse directamente al motor mediante una brida que se sujeta a una placa de 5 mm de espesor de acero ASTM-A36 con 4 pernos M8*20, esta placa a su vez se acopla a la estructura mediante 4 pernos M8*60 como se muestra en la Figura 96.



Figura 96. Placa del motor

El sistema tensor es acoplado a la placa del tambor de retorno, una tuerca es soldada en la estructura sobre un agujero de 10 mm de diámetro de forma que un perno M10*70 cumpla la función del tornillo tensor. El tensor se ajusta con una contratuerca como se observa en la Figura 97.



Figura 97. Implementación del sistema tensor

- *Sistema Neumático*

Para el correcto funcionamiento de la clasificadora se instaló una línea de aire directa desde el compresor hacia la máquina, antes de ingresar el aire a las electroválvulas este es tratado por la unidad de mantenimiento FR de forma que los componentes no se vean afectados por el vapor de agua acumulado en el compresor y la línea de aire, además se tiene en consideración que el producto seleccionado será empleado en la elaboración de balanceados por lo que no debe humedecerse.

Las electroválvulas son acopladas sobre una caja como se observa en la Figura 98



Figura 98. Base para electroválvulas.

En cuanto a la distribución de aire comprimido se acoplan racores en forma de T, al otro extremo se insertan pasamuros sobre una placa de acero ASTM A36 la cual está sujeta a las placas de soporte con pernos M12*20 y con manguera de 6 mm se realiza las conexiones. (Figura 99)

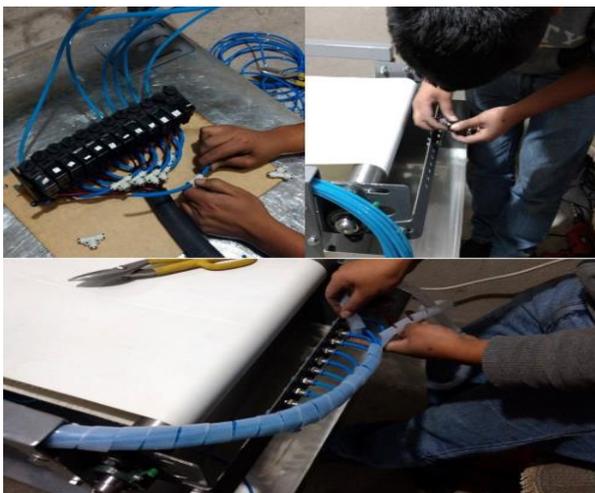


Figura 99. Ensamble de sistema neumático

- *Separador de granos*

En la etapa de diseño se elaboró el plano del separador de granos, por lo que en base a esto se realiza un corte laser sobre MDF de 6 mm para conseguir la exactitud en la distancia entre agujeros que se requiere para alinear los granos de maíz. En cada agujero se sujeta pernos M8x70 de acero inoxidable (Figura 100) de modo que el separador de granos y la banda transportadora queden separados aproximadamente 2 mm.



Figura 100. Separador de granos final

- *Tapas laterales*

Con ayuda de una cizalla manual se realizó los cortes adecuados para formar las tapas laterales de la clasificadora acorde los planos mostrados en el Anexo con el objetivo de proteger del polvo el computador y las electroválvulas. (Figura 101)



Figura 101. Elaboración de tapas laterales

- *Soporte computador*

Al no contar en la empresa con un cuarto de control, el computador fue instalado junto a la clasificadora, el CPU se encuentra dentro de la máquina mientras que el monitor, teclado y mouse fueron colocados sobre un soporte metálico fabricado con un perfil cuadrado de acero AISI A36 de 20*20*2 de acuerdo a los planos mostrados en el Anexo 4. En la Figura 102 se puede observar la elaboración de este soporte.



Figura 102. Elaboración del soporte para el computador

3.3.3.2. Implementación de los componentes eléctricos y/o electrónicos y de control

- *Motor*

Para la implementación de las conexiones eléctricas del motor tomamos en cuenta el tipo de motor implementado y el voltaje en la red de energía eléctrica con la que cuenta la empresa. El motor es de 6 puntas por lo que permite los dos tipos de conexiones, y la red de energía es de tipo Estrella, por lo que la conexión es realizada es de un sistema trifásico Estrella – Triángulo. El motor tiene una potencia de apenas 0.18 Kw por lo que para ponerlo en marcha se realiza un arranque directo.



Figura 103. Conexión de las puntas del motor

- *Tablero Eléctrico*

Para implementar los elementos eléctricos y de control se adecuó un gabinete de 600x400x250, en el cuál se acoplaron canaletas ranuradas de 25x40 mm formando un marco y 2 filas entre los componentes, al igual que 3 filas de riel DIN sobre las cuales se acoplarán los componentes de potencia y control. La implementación de las canaletas y rieles, así como la distribución de los componentes se puede observar en la Figura 104



Figura 104. Organización de gabinete eléctrico

En la parte exterior del gabinete se acoplaron 3 luces piloto, la verde se activa cuando el motor está en marcha, la amarilla cuando el sistema está energizado y la roja cuando el paro de emergencia a sido activado, sobre las luces se acopló un pulsador el cual enciende el computador y un paro de emergencia. El tablero tambien cuenta con un interruptor rotatorio de dos estados que permite energizar la máquina. (Figura 105)



Figura 105. Parte exterior del gabinete

En la etapa de diseño se calculó el calibre necesario para las conexiones eléctricas, por lo que en base a esto y de acuerdo a los planos eléctricos del Anexo se realizaron las conexiones colocando terminales en cada conductor y utilizando borneras para facilitar la unión de nodos tal como se muestra en la Figura 106.



Figura 106. Cableado del gabinete eléctrico

- *Sistema de Visión Artificial*

Para el sistema de visión artificial se realizó la conexión de las dos Webcam a los puertos USB del computador, y la conexión de los focos LED al tablero eléctrico para poder controlar el encendido y apagado de los mismo.



Figura 107. Conexiones del sistema de visión

Una vez terminada la implementación de la máquina se realizaron las adecuaciones pertinentes en la empresa con el fin de garantizar el correcto funcionamiento de la máquina, por lo que se encaminó la línea de energía eléctrica desde el cuadro más cercano y la línea de aire desde el compresor acoplando dicho sea de paso la unidad de mantenimiento. (Figura 108)



Figura 108. Implementación de la máquina completa

CAPÍTULO IV

PRUEBAS Y RESULTADOS

En el presente capítulo se realizan varias pruebas experimentales de funcionamiento de la clasificadora con el fin de detectar anomalías en su trabajo y garantizar el correcto funcionamiento de la misma, dichas pruebas se las realizaron una vez la máquina estuvo totalmente ensamblada. Con el objetivo de optimizar el funcionamiento de la máquina y que la máquina sea robusta se aplica el diseño de experimentos de Taguchi.

4.1. Pruebas y resultados

4.1.1. Pruebas en el ducto de salida de grano

Se realizó pruebas para verificar que sea adecuada la forma de abastecer de producto al sistema de clasificación con ayuda de un ducto que conecte la tolva con la banda transportadora.

- **Resultado**

El ducto diseñado provee correctamente de producto a la banda transportadora pero el flujo de granos de maíz es excesivo lo que provoca un congestionamiento en la etapa de separación por hileras provocando desbordamiento de producto por fuera de la banda. La solución a este problema se puede observar en la Figura 109 donde se colocó un tope a la salida del ducto con lo que la salida de grano se la realiza en contra del movimiento de la banda lo que permite que el flujo sea constante y ordenado.

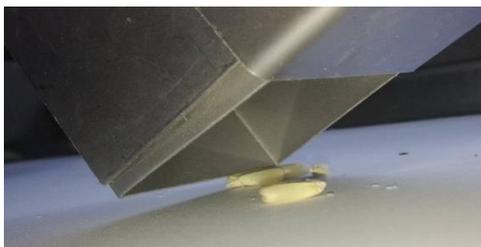


Figura 109. Salida de ducto corregida

4.1.2. Pruebas en la banda transportadora

La correcta alineación de la banda transportadora es un parámetro de suma importancia a la hora de poner en marcha el sistema de clasificación por lo que se realizó pruebas en vacío para observar el comportamiento de la misma.

- **Resultado**

Al momento de poner en marcha el motor se pudo evidenciar que a pesar de realizar una calibración de los tensores con instrumentos de precisión la banda transportadora tendía a desviarse hacia un lado de los tambores en un tiempo muy reducido de operación. La solución a este inconveniente fue realizar un ranurado en la parte central de cada tambor como se muestra en la Figura 110 ya que en esta zona es donde se presenta la máxima tensión de la banda.

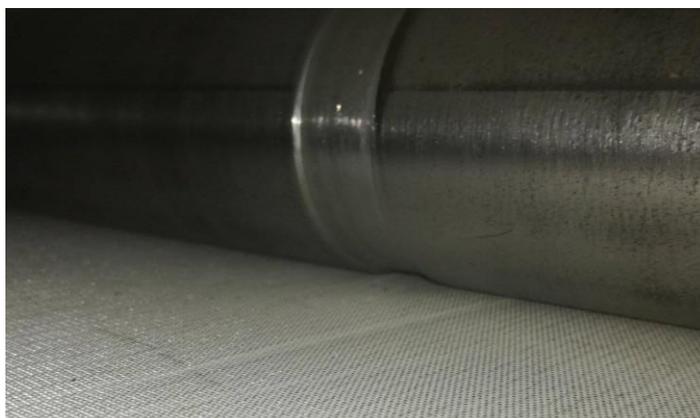


Figura 110. Ranurado en los tambores

4.1.3. Pruebas en el sistema neumático

El objetivo de una prueba del sistema neumático es determinar si cantidad de aire administrada por las electroválvulas y la presión con la que los granos van a ser expulsados hacia otro compartimiento son las adecuadas. Las presiones de trabajo con las cuales se realiza las pruebas son 2 y 4 Bar y la cantidad de aire se la relaciona con el tiempo en el que las electroválvulas van a estar activadas, siendo los valores de prueba seleccionados 100ms y 140ms. Otro factor que se considera en la forma que tiene el eyector que soplará los granos siendo las posibilidades un eyector simple con pasamuros o con una reducción acoplada al final de los pasamuros como se puede apreciar en la Figura 111. Forma del eyector. Estos parámetros se los analiza más adelante en conjunto con otros factores de los cuales depende el correcto funcionamiento de la máquina.



Figura 111. Forma del eyector

4.1.4. Pruebas del software

Las pruebas de software consistieron en minimizar del ruido de la imagen obtenida a fin de detectar adecuadamente los granos de matiz anaranjado, para lo cual se modificaron parámetros como el rango de color, y el orden de las operaciones morfológicas.

4.1.5. Pruebas del sistema de clasificación

El sistema de clasificación consistió en la adaptación de un elemento capaz de distribuir y ordenar el grano a lo largo de la banda, para realizar las pruebas se generaron dos alternativas las cuales se diferencian por la forma del separador y se pueden observar en la Figura 112, dichas alternativas también son consideradas en el diseño robusto de Taguchi.

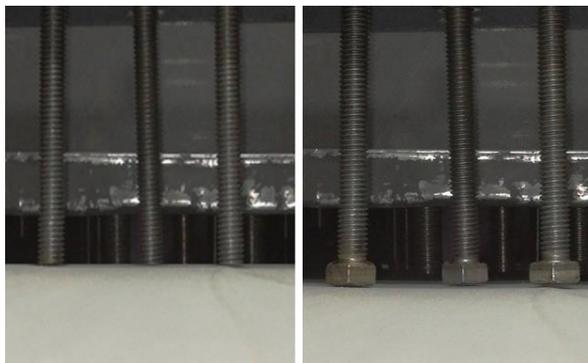


Figura 112. Forma del separador

4.2. Diseño robusto

En la clasificadora de granos el diseño robusto viene dado por la combinación más adecuada entre los niveles de los factores mencionados en las pruebas experimentales a fin de optimizar el funcionamiento de la clasificadora y a la vez identificar si existen factores que no influyen en la operación del sistema a fin de reducir costos de pruebas.

En la tabla Tabla 39 se muestran los factores que se consideró y los niveles de los mismos para realizar este análisis

Tabla 39.
Factores y niveles de prueba

| Factor | Descripción | Nivel 1 | Nivel 2 |
|--------|--------------------------|------------------------------|------------------------------|
| A | Forma del clasificador | Circular | Triangular |
| B | Presión del aire | 2 bar | 4 bar |
| C | Tiempo de soplado | 140 ms | 100 ms |
| D | Eyector final | Pasamuros simple | Pasamuros con reducción |
| E | Operaciones morfológicas | Closing - dilation – erosion | Erosion - Closing - Dilation |

Para el proceso de clasificación de granos se ha considerado 5 factores con 2 niveles cada uno por lo que de acuerdo con la metodología de Taguchi se utiliza una matriz ortogonal L8, por lo que se realizan 8 pruebas con los niveles que la esta matriz requiere. (Ver Tabla 40)

El valor de Y_i en este caso representa la eficiencia de cada prueba dependiendo los niveles de cada factor, dicha eficiencia fue determinada experimentalmente a través de un conteo manual de los granos detectados y no detectados. Se utilizó muestras de 20 Kg de materia prima en la cual fueron mezclados 200 granos de color naranja.

Tabla 40.
Matriz ortogonal L8

| No | A | B | C | D | E | e1 | e2 | Forma del separador | Presión de aire | Tiempo de soplado | Eyector final | Operaciones morfológicas | Y_i |
|----|---|---|---|---|---|----|----|---------------------|-----------------|-------------------|---------------|--------------------------|-------|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | Circular | 2 | 0.140 | Simple | C-D-E | 0.732 |
| 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | Circular | 2 | 0.140 | Reducción | E-C-D | 0.712 |
| 3 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | Circular | 4 | 0.100 | Simple | C-D-E | 0.564 |
| 4 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | Circular | 4 | 0.100 | Reducción | E-C-D | 0.571 |
| 5 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | Triangular | 2 | 0.100 | Simple | E-C-D | 0.832 |
| 6 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | Triangular | 2 | 0.100 | Reducción | C-D-E | 0.631 |
| 7 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | Triangular | 4 | 0.140 | Simple | E-C-D | 0.814 |
| 8 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 | Triangular | 4 | 0.140 | Reducción | C-D-E | 0.621 |

Mediante un análisis de la varianza (F), se determina que factores afectan a la variable y cuales no resultaron significantes, además el hecho de contar con 5 factores dentro de una matriz L8 permite insertar dos errores ($e1$ y $e2$) con los cuales se mejoró la estimación dando al modelo mayor número de grados de libertad.

Tabla 41.
Matriz Anova

| No | A | B | C | D | E | e1 | e2 | Yi |
|-------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------|--------|-------------------------|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0.732 |
| 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 0.712 |
| 3 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 0.564 |
| 4 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 0.571 |
| 5 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 0.832 |
| 6 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 0.631 |
| 7 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 0.814 |
| 8 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 | 0.621 |
| | | | | | | | | TOTAL 5.477 |
| | | | | | | | | PROMEDIO 0.685 |
| | | | | | | | | n 8 |
| | | | | | | | | Continúa siguiente pág. |
| TI | 2.58 | 2.91 | 2.88 | 2.94 | 2.55 | 2.76 | 2.75 | |
| T2 | 2.90 | 2.57 | 2.60 | 2.54 | 2.93 | 2.72 | 2.73 | |
| SS | 0.0127 | 0.0142 | 0.0099 | 0.0207 | 0.0181 | 0.0002 | 0.0000 | |
| gl | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | 2 | |
| V | 0.0127 | 0.0142 | 0.0099 | 0.0207 | 0.0181 | | 0.0001 | |
| F | 128.32 | 143.21 | 99.57 | 208.89 | 183.05 | | | |
| Sg | SI | SI | SI | SI | SI | | | |
| PI | 0.6448 | 0.7268 | 0.7198 | 0.7355 | 0.6370 | | | |
| P2 | 0.7245 | 0.6425 | 0.6495 | 0.6338 | 0.7323 | | | |
| Ni | 0.7245 | 0.7268 | 0.7198 | 0.7355 | 0.7323 | | | |
| Ef | 0.0399 | 0.0421 | 0.0351 | 0.0509 | 0.0476 | | | |
| Yest | 0.90 | | | | | | | |

Donde:

T_1 = Sumatoria de lecturas con nivel 1

T_2 = Sumatoria de lecturas con nivel 2

n = Número total de pruebas

SS = $(T_2 - T_1)^2 / n$

gl = Grados de libertad (columnas)

V = SS/gl

F = V/V_e (V_e = Varianza de la estimación del error)

Sg = Si es influyente cuando $Sg > 2$

P_1 = Promedio nivel 1

P_2 = Promedio nivel 2

N_i = Nivel seleccionado

Ef = Efecto de la variable = $N_i - \text{Promedio}$

Y_{est} = Eficiencia mejorada aplicando los niveles N_i en cada factor = $\text{Promedio} + \sum N_i$

Como resultado de la aplicación del método de Taguchi para diseño Robusto se tiene que los mejores resultados se obtienen al utilizar un separador triangular, una presión de 2 Bar con un tiempo de activación de 100 ms, un eyector simple y las operaciones Morfológicas en el orden Erosion - Closing – Dilation para obtener aproximadamente un 90% de eficiencia.

Una vez determinados los niveles en los que los factores ofrecen la mayor eficiencia se realiza una prueba experimental cuyo resultado se muestra en la Tabla 42

Tabla 42.
Prueba experimental final

| | <i>Masa de producto procesado [kg]</i> | <i># de granos detectados separados</i> | <i># de granos detectados no separados</i> | <i>Eficiencia de clasificación</i> |
|---------------------|--|---|--|------------------------------------|
| PRUEBA FINAL | 20 | 187 | 13 | 93.50% |

CAPÍTULO V

ANÁLISIS ECONÓMICO Y FINANCIERO

La aceptación del proyecto por parte de la Distribuidora de Granos DANHALU depende del beneficio económico que representa su inversión al cabo de un tiempo, para ello se realiza un análisis económico y financiero que se basa en el flujo de caja proyectado resultante de la aplicación del proyecto.

Los métodos empleados dentro del flujo de caja son: Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa interna de retorno (TIR); las cuales son dos herramientas financieras que nos permiten cuantificar la rentabilidad de un proyecto de inversión, donde el VAN es la rentabilidad que se va a percibir en moneda actual, mientras la TIR representa la tasa de interés máxima donde no existen pérdidas ni ganancias.

5.1. Análisis de flujo de caja

El flujo de caja se analiza anualmente con los datos de ingresos y gastos que son producto de la elaboración y venta del producto; esto con el fin de obtener el período donde se recupera la inversión. Las fórmulas empleadas en el análisis se encuentran en el libro *Preparación y Evaluación de Proyectos* (Sapag & Sapag, 2008).

Se tomará en cuenta ésta mejora, necesitando para ello lo siguiente:

- Tamaño de la Inversión. - Costo de la maquinaria e implementación de la misma.
- Flujo de caja neto actualizado. - Diferencia periódica entre ingresos y egresos de una empresa proyectado con una tasa de descuento
- Tasa de descuento (TD). - Tasa de oportunidad, rendimiento o rentabilidad mínima que se espera ganar.

5.1.1. Tamaño de inversión

La inversión por parte de la empresa se desglosa en la Tabla 43 y contempla: la adquisición de los componentes de la máquina, el uso de herramientas y elementos estándares, el uso de servicios de manufactura y un porcentaje de mano de obra.

Tabla 43.
Inversión total de la máquina clasificadora de granos

| Costo de Materia prima | | | | |
|--------------------------------------|------------------------|-----------------|----------------------|--------------------------|
| Material | Características | Cantidad | Costo/u (USD) | Costo Total (USD) |
| Lámina Acero Galvanizado | 1220x2440x0,9 [mm] | 4 | 23.15 | 92.60 |
| Lámina Acero Inoxidable | 1220x2440x2 [mm] | 1 | 134.76 | 134.76 |
| Ángulo de Acero AISI 1020 | 1 1/2 x 1/8 [pulg] | 1 | 17.51 | 17.51 |
| Tol de Acero | 300*500*3 [mm] | 2 | 5.25 | 10.50 |
| Perfil cuadrado | 1 1/2 [pulg] x 6[m] | 4 | 15.60 | 62.40 |
| Perfil cuadrado | 1 [pulg] x 6 [m] | 1 | 13.50 | 13.50 |
| Lamina Acero Inox | 300x300x0,9 [mm] | 2 | 5.56 | 11.12 |
| Metro tubo de acero AISI 1020 | Ø63,5x5 [mm] | 2 | 14.50 | 29.00 |
| Tocho de Acero | 100xØ60 [mm] | 5 | 4.95 | 24.75 |
| Caucho Circular | 40xØ50 [mm] | 5 | 2.25 | 11.25 |
| Metro eje de Acero | Ø25,4 | 2 | 11.50 | 23.00 |
| | | | SUBTOTAL | 430.39 |
| Costo de los Componentes | | | | |
| Material | Características | Cantidad | Costo/u (USD) | Costo Total (USD) |
| Moto reductor BOX40 Motive | 0,25 HP | 1 | 365.00 | 365.00 |
| Brida de pared | 1 [pulg] | 1 | 43.80 | 43.80 |
| Banda Poliuretano | 400x2350*1,3 [mm] | 1 | 103.40 | 103.40 |
| Gabinete Metálico Beaucoup | 600x400x200 [mm] | 1 | 48.62 | 48.62 |
| Canaleta ranurada | 25x40 [mm] | 1 | 5.18 | 5.18 |
| Contactador LS Trifásico | Bobina 220 [V] | 1 | 12.90 | 12.90 |
| Relé Térmico LS | 1 - 4,5 [Amp] | 1 | 24.72 | 24.72 |

Continúa siguiente pág.

| | | | | |
|--|-----------------------------------|----|-----------------|----------------|
| Riel DIN Leipold | 1 [m] | 1 | 2.11 | 2.11 |
| Metro de manguera EMC | 6 [mm] | 20 | 0.94 | 18.80 |
| Racor tee EMC | 6 [mm] x 1/8'' | 12 | 2.21 | 26.52 |
| Racor pasamuro EMC | 6 [mm] | 13 | 3.02 | 39.26 |
| Racor recto | 6 [mm] x 1/8'' | 24 | 1.22 | 29.28 |
| Válvula direccional electroneumática | Bobina 110 [V], Válvula 3/2 | 12 | 36.36 | 436.32 |
| Módulo de 8 relés para microcontrolador | Relés a 5 [V] | 2 | 21.09 | 42.18 |
| Regulador de presión | 1/4 [pulg] | 1 | 45.38 | 45.38 |
| Racor en T | 1/4 [pulg] | 11 | 3.96 | 43.56 |
| Manguera | 1/2 [pulg] | 10 | 4.36 | 43.60 |
| Borneras riel DIN | 12 AWG | 50 | 1.51 | 75.50 |
| Terminales azules | #14/16, 100 Unids. | 1 | 3.44 | 3.44 |
| Terminales punteras amarillo | #18/16, 100 Unids. | 2 | 2.51 | 5.02 |
| Pines hembra | Protoboard | 30 | 0.45 | 13.50 |
| Pulsadores | 22 [mm] | 1 | 1.78 | 1.78 |
| Luces piloto LED | 22 [mm] | 3 | 1.65 | 4.95 |
| Interruptor | 2 posiciones | 1 | 4.81 | 4.81 |
| Paro de emergencia | NC/NA | 2 | 5.86 | 11.72 |
| Breaker EMC | 10 [A] | 1 | 35.21 | 35.21 |
| Luces Led ojos de buey | 3 [W] | 4 | 4.96 | 19.84 |
| Computador Core i3 | 3 GB Ram | 1 | 306.00 | 306.00 |
| Cámaras Greentree | VGA | 2 | 11.00 | 22.00 |
| Monitor | 5x4 [pulg] | 1 | 75.00 | 75.00 |
| Cable USB | 4 [m] | 3 | 4.00 | 12.00 |
| Teclado y Mouse | Bluetooth | 1 | 43.00 | 43.00 |
| Controlliino | MAXI | 1 | 329.58 | 329.58 |
| Metro cable de hilos | 2x18 | 30 | 0.26 | 7.80 |
| Metro cable de timbre trenzado | 2x23 | 10 | 0.16 | 1.60 |
| Metro cable 12 hilos | 24x23 | 2 | 4.20 | 8.40 |
| Metro cable NM | 12 x 4 | 25 | 1.25 | 31.25 |
| Metro cable NM | 12 x 3 | 3 | 0.90 | 2.70 |
| Etiquetas de identificación | 12 papeletas mixtas | 1 | 19.60 | 19.60 |
| Metro tubo espiralado | 1 [pulg] | 3 | 1.84 | 5.52 |
| | | | SUBTOTAL | 2370.85 |

Costo herramientas y elementos estándar

| Material | Características | Cantidad | Costo/u (USD) | Costo Total (USD) |
|-----------------|------------------------|-----------------|----------------------|--------------------------|
|-----------------|------------------------|-----------------|----------------------|--------------------------|

Continúa siguiente pág.

| | | | | |
|--|--------------------------|----|-----------------|---------------|
| Disco de corte | 3 [pulg] Fino | 2 | 2.60 | 5.20 |
| Prisioneros | 3/8 [pulg] | 8 | | 2.00 |
| Chumaceras | 1 [pulg] | 4 | 0.25 | 28.00 |
| Inserto cuadrado | SNMG 644-SS | 3 | 20.96 | 62.88 |
| Disco de corte | 7 [pulg] Fino | 2 | 5.85 | 11.70 |
| Pintura Gris | 1 galón | 2 | 22.53 | 45.06 |
| Estaño | 3 [mm] | 1 | 1.20 | 1.20 |
| Thinner | 1 lt | 5 | 1.70 | 8.50 |
| Guaípe | 1 conjunto | 1 | 1.00 | 1.00 |
| Remaches de aluminio | 1/8 - 100 unid. | 2 | 2.00 | 4.00 |
| Pernos Inox / Tuerca / Arandela | M10 x 60 | 2 | 0.75 | 1.50 |
| Pernos Inox / Tuerca / Arandela | M10 x 70 | 12 | 0.81 | 9.72 |
| Pernos Inox / Tuerca / Arandela | M10 x 20 | 2 | 0.43 | 0.86 |
| Pernos Inox / Tuerca / Arandela | M8x70 | 45 | 0.72 | 32.40 |
| Pernos Inox / Tuerca / Arandela | M8 x 50 | 18 | 0.68 | 12.24 |
| Pernos Inox / Tuerca / Arandela | M8 x 20 | 20 | 0.62 | 12.40 |
| Pernos Carrocería | 1/4 [pulg] | 7 | 0.74 | 5.18 |
| Pernos Acero negro | 1/2 [pulg] | 8 | 0.43 | 3.44 |
| Juego de desarmadores | 6 piezas | 1 | 2.37 | 2.37 |
| Pernos Inox / Tuerca / Arandela | M6x70 | 1 | 0.38 | 0.38 |
| Lijas | 800 / 500 | 2 | 0.53 | 1.06 |
| Brocas de cobalto | 1/8 [pulg] | 2 | 3.40 | 6.80 |
| Juego de brocas titanio | 1 - 10 [mm] | 1 | 34.26 | 34.26 |
| Electrodos 6013 | 1 [Kg] | 1 | 5.40 | 5.40 |
| Taipe | 3 [m] | 5 | 0.75 | 3.75 |
| Latas de pintura Gris | Gris Oscuro nvl 2 | 2 | 3.40 | 6.80 |
| Clear Wash | base para galvanizado | 1 | 15.20 | 15.20 |
| | | | SUBTOTAL | 323.30 |

Costos de procesos de manufactura

| Material | Características | Cantidad | Costo/u (USD) | Costo Total (USD) |
|------------------------------------|-----------------------------|-----------------|----------------------|--------------------------|
| Transporte de material | Camioneta | 1 | 48.00 | 48.00 |
| Metro de soldadura y pulido | Soldadura en Inox de 2mm | 5 | 50.00 | 250.00 |

Continúa siguiente pág.

| | | | | |
|---|------------------------------|----------|-------------------------------|----------------|
| Cortes, Dobleces y remachado | Láminas de Acero Galvanizado | 2 | 12.58 | 25.16 |
| Torneado, Soldadura, rectificado | Manzanas y tambor | 1 | 210.00 | 210.00 |
| Corte Láser madera | Aglomerado MDF 6 mm | 1 | 86.00 | 86.00 |
| Corte por agua en acero | Placa de 3mm | 1 | 50.97 | 50.97 |
| Cortes, Dobleces y remachado | Lámina Inox de 2mm | 1 | 60.02 | 60.02 |
| Torneado y Soldadura | Patas regulables | 4 | 8.00 | 32.00 |
| | | | SUBTOTAL | 762.15 |
| | | | L | |
| | | | SUBTOTAL DE LA MÁQUINA | 3886.69 |
| Mano de obra | | | | |
| Manufactura y ensamblaje | 30% | 1 | | 1166.01 |
| | | | TOTAL DE LA MÁQUINA | 5052.70 |

5.1.2. Ingresos

Distribuidora de Granos DANHALU hoy en día cuenta con su marca LA PERLA para morocho partido con la cual se ha abierto mercado dentro de la ciudad de Quito, el producto final se comercializa en unidades de 450 gr y está a la venta a un precio de 0.60 USD por unidad. Sin embargo, al implementar la máquina clasificadora la empresa pretende aumentar el volumen de producción y comercializar directamente quintales de morocho con un precio de venta de 40 USD por quintal.

Actualmente la cadena de producción del maíz blanco para un turno de trabajo de 8 horas al día cuenta con los procesos mostrados en la Tabla 44 donde se evidencia la capacidad de producción de la empresa.

Tabla 44.
Capacidad de procesamiento actual por cada proceso

| PROCESO | HORAS | KG / H | KG / DÍA |
|------------------------------------|-------|---------|------------|
| LIMPIEZA | 8 | 300 | 2400 |
| CLASIFICACIÓN | 8 | 25 | 200 |
| PELADO Y TRITURADO DEL GRANO | 8 | 100-150 | Hasta 1200 |
| CLASIFICACIÓN POR TAMAÑO | 8 | 150 | 1200 |
| TRANSPORTE | 5 | 540 | 2700 |
| EMPACADO | 8 | 64 | 512 |

El proceso de clasificación es el de menor capacidad de procesamiento, causando un cuello de botella que detiene la salida de producto al mercado. Gracias a la implementación de la máquina la salida del producto aumentaría a 900 Kg/día en turnos de 8 horas más una hora extra, con una capacidad de procesamiento de 100 kg/h. Entonces la producción con la máquina clasificadora viene dada por:

$$I_D = P_U * C_{Kg/día}$$

Donde:

P_D = Ingresos diarios

P_U = Precio de una unidad de 45Kg

$C_{Kg/día}$ = Capacidad en Kg por día

En todo proceso de producción se tienen pérdidas del mismo a lo largo de la cadena de producción, es decir que la cantidad de producto final es menor por factores como: la evaporación del agua del producto, desprendimiento de partículas, cocción, etc. A esto se lo conoce como merma. Así también parte del producto no se procesa de la mejor manera y se tiene un producto de menor calidad empleado para otro fin. En base a datos proporcionados por la empresa se sabe que el 85% del producto inicial es morocho blanco,

el 14.5% es producto de mediana calidad que se emplea en balanceado comercializado en 20 USD la unidad de 45Kg, y el 0.5% se pierde en el proceso. Entonces, la producción real del proceso es:

$$I_D = P_{MBlanco} * C_{Kg} * 0.85 + P_{Balanceado} * C_{Kg} * 0.145$$

Reemplazando:

$$I_d = \frac{40 \text{ USD}}{45 \text{ Kg}} * \frac{900 \text{ Kg}}{1 \text{ día}} * 0.85 + \frac{20 \text{ USD}}{45 \text{ Kg}} * \frac{900 \text{ Kg}}{1 \text{ día}} * 0.145$$

$$I_d = 738 \frac{\text{USD}}{\text{Día}}$$

Se considera 5 días laborables a la semana por 50 semanas laborables al año debido a motivos de vacaciones y feriados.

$$I_M = 738 \frac{\text{USD}}{\text{Día}} * \frac{250}{12} = 15375 \frac{\text{USD}}{\text{Mes}}$$

$$I_A = 738 \frac{\text{USD}}{\text{Día}} * 250 = 184500 \frac{\text{USD}}{\text{Año}}$$

5.1.3. Egresos

Representan todos los costos necesarios para el funcionamiento de la línea de producción con la adición de la máquina. Se considera el consumo de energía eléctrica, la mano de obra, costos de mantenimiento y limpieza, materia prima y transporte.

Consumo eléctrico

Se calcula con la potencia consumida por los equipos y el tiempo de funcionamiento de las máquinas en un período de un mes.

$$CE = KW * h_{día} * d_{mes}$$

La línea de producción dispone de 3 motores de 2HP, un motor de 10HP y un motor de 15HP donde solo se controla el encendido y apagado de los mismos. Adicionalmente, se detalla el consumo de la máquina clasificadora en la Tabla 45 junto con el resto de las máquinas para un turno diario de 9 horas.

Tabla 45.

Costo del consumo mensual de la línea de producción del morocho

| EQUIPO | CANTIDAD | CONSUMO [W] | CONSUMO/ MES [KWH] |
|----------------------------|----------|------------------------|--------------------------|
| FOCO LED | 2 | 5 | 1,80 |
| MOTOR MOTIVE | 1 | 186,25 | 33,53 |
| ORDENADOR | 1 | 50,56 | 9,10 |
| TABLERO DE CONTROL | 1 | 25 | 4,50 |
| COMPRESOR NEUMÁTICO | 1 | 740 | 133,20 |
| | | Total, máquina | 182,13 |
| MOTOR 2 HP | 3 | 1490 | 804,60 |
| MOTOR 10 HP | 1 | 7450 | 1341,00 |
| MOTOR 15 HP | 1 | 11175 | 2011,50 |
| | | TOTAL, KW | 4339,23 |
| | | TARIFA USD/KWH | 0,12 |
| | | COSTO MENS. USD | 520,71 |
| | | COSTO ANUAL USD | 6248,49 |

Mano de obra

El aumento de la producción requiere de dos operadores a cargo del procesamiento, empaquetado y transporte de la materia prima, aumentando en uno la mano de obra. Los turnos de trabajo para lograr los objetivos de producción de la empresa son de 9 horas al día, con el pago de una hora extra al día, por ende, los costos de mano de obra son:

$$C_{MO} = \#Op * (Sueldo_M + h_{extra})$$

$$C_{MO} = 2 * (500 + 2.5 * 5 * 4)$$

$$C_{MO} = 1100 \frac{USD}{Mes}$$

$$C_{MO} = 1100 * 12$$

$$C_{MO} = 13200 \frac{USD}{Año}$$

Mantenimiento y Limpieza

La empresa asigna un presupuesto mensual para adquisición de mascarillas, tapones para oídos, franelas, además se cubre los gastos por reposición de piezas y engrasar componentes. El valor asignado para este fin es de 150 USD/mes.

Materia Prima

La empresa adquiere quintales de morocho al por mayor, los cuales se encuentran sin clasificar y tienen un precio de venta de 30 USD por quintal, el objetivo de la empresa es producir 900Kg al día por lo que se requiere de al menos 20 quintales para satisfacer la demanda diaria del proceso. Además, se requiere de costales para el empaquetado del producto, éste tiene un precio de 0.25 USD/c.u.

Mensualmente la empresa invierte:

$$C_{MP} = \text{Días al mes} * \#Unid.* (P_{VMorocho} + P_{VCostal})$$

$$C_{MP} = \frac{250}{12} * 20 * (30 + 0.25)$$

$$C_{MP} = 12604.16 \frac{USD}{Mes}$$

Anualmente invierte:

$$C_{MP} = \#Unid.* P_V * \text{Días al año}$$

$$C_{MP} = 20 * 250 * (30 + 0.25)$$

$$C_{MP} = 151250 \frac{USD}{Año}$$

Transporte

Para comercializar la mercancía se contrata un camión a 100 USD por día para cargar la producción de una semana, por lo que sus servicios se requieren semanalmente, por lo tanto, su costo es:

$$C_T = 100 * \frac{50}{12}$$

$$C_T = 416.67 \frac{USD}{Mes}$$

Anualmente:

$$C_T = 100 * 50$$

$$C_T = 5000 \frac{USD}{Año}$$

Los egresos totales son la suma de todos los costos analizados anteriormente, por lo que se tiene:

$$\begin{aligned} Egresos &= CE + C_{MO} + C_{ML} + C_{MP} + C_T \\ Egresos &= 520.71 + 1100 + 150 + 12604.16 + 5000 \\ Egresos &= 19374.87 \frac{USD}{Mes} \end{aligned}$$

Los egresos anuales son:

$$Egresos = 177498.49 \frac{USD}{Año}$$

Para la realización del flujo de caja se tiene en cuenta tasas de descuento referenciales para PYMES sugeridas por el banco central (Banco Central del Ecuador, 2017), una mínima del 11.83% y una máxima de 40%. Las fórmulas para el cálculo del TIR y VAN son:

$$UN = Ingresos - Egresos$$

Donde:

UN = Utilidad neta

$$FF = UN + Depreciación$$

Donde:

FF = Flujo de Fondo

$$FNA = \frac{FF}{(1 + TD)^{Año}}$$

Donde:

FNA = Flujo neto Actual

TD = Tasa de descuento

Por lo tanto:

$$VAN = - Inversión Inicial + \Sigma FNA$$

$$\sum_{t=1}^n \frac{Y_T - E_T}{(1 + TIR)^t} - I_0 = 0$$

Como indica la Tabla 46 los ingresos y los costos se mantienen constantes debido a que se han maximizado al valor tope que ofrece la máquina clasificadora de granos por su capacidad de producción.

Tabla 46.
Cálculo de VAN mediante flujo de caja

| AÑO | INGRESOS | COSTOS | UTILIDAD NETA | INVERSIÓN | DEPRECIACIÓN | FLUJO DE FONDO | FLUJO NETO ACTUAL 11,83% |
|-----|-----------|-----------|---------------|-----------|--------------|----------------|-----------------------------|
| 0 | | | | 5052,7 | | | -5052,7 |
| 1 | 184500,00 | 175841,35 | 8658,65 | | -505,27 | 8153,38 | 7290,87 |
| 2 | 184500,00 | 175841,35 | 8658,65 | | -505,27 | 8153,38 | 6519,60 |
| 3 | 184500,00 | 175841,35 | 8658,65 | | -505,27 | 8153,38 | 5829,92 |
| 4 | 184500,00 | 175841,35 | 8658,65 | | -505,27 | 8153,38 | 5213,20 |
| 5 | 184500,00 | 175841,35 | 8658,65 | | -505,27 | 8153,38 | 4661,72 |
| | | | | | | Σ Flujo | 29515,31 |
| | | | | | | VAN | 24462,61 |

Despejando:

$$TIR = 133\%$$

La recuperación de la inversión se efectúa en el primer año además de contar con un valor de TIR elevado y un VAN > 0, lo que me indica que el proyecto es aceptable y existe la opción de subir la tasa de descuento a fin de tener más porcentaje de ganancia mínima en el proyecto.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

- Se realizó una investigación de los diferentes sistemas de clasificación que hoy en día existen a nivel mundial, lo cual permitió tener una noción más clara de las tecnologías existentes.
- Se generó un concepto que suple las necesidades descritas por la empresa con la ayuda de una matriz de calidad, tomando en consideración las limitaciones económicas y tecnológicas al momento de seleccionar los componentes
- Los materiales de los componentes que conforman este proyecto a parte de cumplir con los requerimientos de diseño mecánico cumplen con normas internacionales en cuanto al contacto directo con alimentos, lo cual garantiza la calidad del producto procesado y del sistema en general.
- Se construyó una máquina clasificadora de maíz mediante un sistema de visión artificial que permite separar granos de tonalidad anaranjada 4 veces más rápido que el proceso manual permitiendo así optimizar la línea de producción de morocho partido, generando no solo una mayor rentabilidad económica sino mejorando el ambiente de trabajo de los operarios.

6.2. Recomendaciones

- Realizar un mantenimiento preventivo periódicamente con el objetivo de alargar la vida útil de la máquina y evitar paros en la línea de producción.
- Repotenciar cada estación en la línea de producción de morocho partido con el objetivo de garantizar la calidad del producto final y mejorar la eficiencia.
- Adecuar un cuarto de control de máquinas con el objetivo de automatizar el sistema en general e incorporar un sistema SCADA que permita controlar, supervisar y monitorear el proceso.

BIBLIOGRAFÍA

- Aceroscenter. (2016). *Aeroscenter Productos para la construcción y metalmecánica*. Obtenido de <http://www.aceroscenter.com.ec/pdf/LAMINAS.pdf>
- AENOR. (1998, Marzo). *Eurocódigo 1 Bases de proyecto y acciones en estructuras*. Obtenido de PARTE 4: Acciones en silos y depósitos: https://sirio.ua.es/cat/UNE-ENV_1991-4=1998.pdf
- Amchite, F., & Moreira, G. (2004). *Conteo de porotos y arroz enteros y partidos*. Obtenido de http://ie.fing.edu.uy/investigacion/grupos/gti/timag/trabajos/2004/conteo_porotos/index.html
- ARCSA. (2015). *Norma Técnica sustitutiva de buenas Prácticas de Manufactura para alieimentos procesados*. Obtenido de Registro Oficial No 555,48: <http://www.controlsanitario.gob.ec/>
- Banco Central del Ecuador. (2017). Obtenido de <https://contenido.bce.fin.ec/docs.php?path=/documentos/Estadisticas/SectorMonFin/TasasInteres/Indexe.htm>
- Bolton, W. (2002). *Mecatrónica Sistemas De Control Electrónico En Ingeniería Mecánica Y Eléctrica*. México: Alfaomega.
- Bovik, A. (2009). *The Essential Guide to Image Processing*. California: Elsevier.
- Budynas, R., & Nisbett, K. (2008). *Diseño e ingeniería mecánica de Shigley*. México D.F.: McGrawHill.
- BUHLER. (2017). *Clasificadora óptica SORTEX A* . Obtenido de <http://www.buhlergroup.com/southamerica/es/productos/gama-de-clasificadoras-opticas-sortex-a/clasificadora-optica-sortex-a-colorvision.htm#.WLACVPkrJPY>
- Caleidoscopio. (2014). *Caleidofotos*. Obtenido de <http://lavidacaleidoscopica.blogspot.com/2014/07/fotografia-estenopeica.html>
- CIMBRIA. (2017). *SEASORT*. Obtenido de <http://www.seasort.com/es/index.htm>
- Controllino. (2016). *CONELCOM GmbH*. Obtenido de <https://controllino.biz/>
- DeLaval. (2010). *El primer sistema rotativo de ordeño automático del mundo*. . Obtenido de <http://www.delaval.es/Acerca-de-DeLaval/Innovacion-en-DeLaval/>
- Dr. Abdelhameed, M. (2014). *Mechatronics Department*. Obtenido de Ain Shams University: http://mct.asu.edu.eg/uploads/1/4/0/8/14081679/lect_04-mechatronics_2_vdi_model_example.pdf
- E.MC. (2017, 02). *V series standard/ N series low power solenoid valve (3/2 way)*. Obtenido de http://www.emc-machinery.com/static/uploaded/pdf/0222154235_58631.pdf

- ETSIEB. (2014). *Diseño De Un Silo Cilindrico Para El Almacenamiento De Productos Granulares*. Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3180/1/31298-4.pdf>
- European Hygienic Engineering & Desing Group. (2007). *Hygienic design of closed equipment for the processing of liquid food*.
- Fabri-cables. (2016, 12). Catálogo de conductores eléctricos. Quito, Pichincha, Ecuador.
- Forbo. (2013, 01). *siegling transilon bandas de transporte y procesamiento*. Obtenido de <http://www.forbo.com/movement/en-gl/downloads/brochures/technical-information/espanol/ps0krw>
- Gomez, E., & Gonzalez, C. (2006). Estudio comparativo de diversas normas para el cálculo de silos de almacenamiento de materiales granulares. *X Congreso Internacional de Ingeniería de proyectos*, (págs. 288-299). Valencia.
- González, C. (2016). *Detección y seguimiento de objetos por colores en una plataforma Raspberry Pi*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Gonzalez, R. C., & Woods, R. E. (2008). *Digital image Proccesing*. New Jersey: Pearson Prentice Hall.
- Goodfellow. (2017). *Goodfellow Todos los materiales para la investigación científica*. Obtenido de <http://www.goodfellow.com/S/Acero-Inoxidable-AISI-304.html>
- Habasit. (2016). *Habasit Cleanline The new regeneration of foof belting* .
- Harashima, F., Tomizuka, M., & Toshio, F. (1996). Mechatronics-"What Is It, Why, and How" An Editorial. *IEEE/ASME TRASCTIONS ON MECATRONICS*, 1-4.
- hermisan. (2015). *Proyectos e instalaciones de riego* . Obtenido de <http://www.hermisan.com/web/74/automatizacion-del-clima/lang/es>
- Hidalgo, J. (2014). *wwwwhat's new Tecnología, Intenet y Marketing*. Obtenido de <http://wwwwhatsnew.com/2014/09/05/la-red-neuronal-del-equipo-de-googlenet-gana-una-de-las-tres-pistas-del-desafio-de-imagenet/>
- Indo India Marketing. (2017). *indiamart*. Obtenido de <https://www.indiamart.com/indoindiamarketing/conveyor-belts.html>
- Jonge Poerink Conveyors. (2017, Febrero). *Jonge Poerink Conveyors*. Obtenido de <https://www.jpconveyors.com/en/>
- KHANACADEMY. (2015). *La luz: ondas electromagnéticas, espectro eletromagnético y fotones*. Obtenido de <https://es.khanacademy.org/science/physics/light-waves/introduction-to-light-waves/a/light-and-the-electromagnetic-spectrum>
- Lauren, O. (2014, Mayo 07). *Readwrite*. Obtenido de <http://readwrite.com/2014/05/07/arduino-vs-raspberry-pi-projects-diy-platform/#awesm=~oE5UgUIB3zjqcs>

- Lighting Studio Desing. (2017). *Iluminación LED*. Obtenido de Lighting Studio Desing
Iluminación: <http://www.lightingstudiodesign.com/iluminacion-led.html>
- Marnetto, M. (2015, 01 19). *Información referida a las diferentes especies de "vaquitas defoliadoras" observadas en el cultivo de soja*. Obtenido de
<http://inta.gob.ar/documentos/boletin-entomologico-sistema-de-alerta-en-red-no-168.-informacion-adicional-referida-a-las-diferentes-especies-de-vaquitas-defoliadoras-observadas-en-el-cultivo-de-soja>
- Marr, D. (1982). *Vision*. San Francisco: Freeman.
- Miliarium.com. (2008). *Peso Especifico Y Angulo De Rozamiento Interno De Diversas Materias*. Obtenido de http://www.miliarium.com/Prontuario/Tablas/NormasMV/Tabla_2-2.asp
- Milvaquez, A. (2015, Marzo). *Seguridad e Higiene Alimentaria*. Obtenido de Betelgeux:
<http://www.betelgeux.es/blog/2015/03/25/disenho-higienico-en-la-industria-alimentaria/>
- Motive. (2008). *Motores asíncronos trifásicos serie DELPHI*. Obtenido de
http://motive.it/cataloghi/DELPHI_catalogo_spa.pdf
- Motive. (2016). *Box Series Wormgear Units*. Obtenido de
http://www.motive.it/cataloghi/BOX_catalogo_ing.pdf
- Orsini, L. (2014, Mayo 07). *Readwrite*. Obtenido de <http://readwrite.com/2014/05/07/arduino-vs-raspberry-pi-projects-diy-platform/#awesm=~oE5UgUIB3zjqcs>
- Ortega, D., & Torres, F. (2016). *Diseño de un silo de fondo cónico para almacenar maíz con capacidad de 25 toneladas con carga y descarga*. Obtenido de
<http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/13116/1/UPS-KT01282.pdf>
- Padilla, A., Pulido, C., & Leonardo, S. (2017). *Procesamiento de imágenes para la identificación de plagas en los cultivos de espinaca*. Obtenido de DOI: 10.1109/CCRA.2016.7811412
- Pratt, W. K. (2001). *Digital Image Processing*. Los Altos, California: PIKS Inside.
- Ravenet, J. (1977). *Silos, teoría investigación y construcción*. Barcelona: Editores Técnicos Asociados S.A. . Obtenido de <http://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/3180>
- REVEYRON. (2017). *Fabricante de bandas transportadoras y transportadores curvos*. Obtenido de <http://www.reveyron.com/es/>
- Rodamientos FAG. (2012). *Baleromex*. Obtenido de <http://www.baleromex.com/catalogos/C-FAG.pdf>
- Rotrans. (2017). *Tambores*. Burgos, España.
- Sanchez, G. (2014). *Visión*. Obtenido de http://www.glosariografico.com/categoria_vision
- Sapag, N., & Sapag, R. (2008). *Preparación y Evaluación de Proyectos*. Bogotá: McGraw-Hill Interamericana S.A.

- SIEMENS. (2006, Noviembre). *Siemens Ingenuity for life*. Obtenido de <http://www.automation.siemens.com/simatic-sensors-static/ftp/6zb5330-0af04-0ba2.pdf>
- Siuce, R. (2016, 06 29). *Diseño de tolvas*. Obtenido de <https://es.slideshare.net/RamiroSIUCEBONIFACIO1/diseo-de-tolvas-63586969>
- Sobrado, E. (2003). *Sistema de visión artificial para el reconocimiento y la manipulación de objetos utilizando un brazo robot*. Lima: PUCP.
- Sumitec. (2014). *Acero Inoxidable AISI 304*. Obtenido de <http://www.sumiteccr.com/Aplicaciones/Articulos/pdfs/AISI%20304.pdf>
- Tecno Merced. (2012). *Poderosa Clasificador de Semillas y Granos*. Obtenido de <http://tecnoimerced.com.ar/productos/poderosa-clasificadora-de-semillas-y-granos>
- Termalia. (2015). *Termalia climatización*. Obtenido de <http://termalia.es/Servicios/Predictivo>
- TOMRA. (2017). *Soluciones de clasificación*. Obtenido de <https://www.tomra.com/es/>
- Ulrich, K., & Eppinger, S. (2013). *Diseño Y Desarrollo De Productos* (Quinta ed.). México D.F.: Mc Graw Hill. Recuperado el 05 01, 2017
- UNIVERSIDAD MAGDEBURG . (2014). *Silos And Bunkers Desing For Reliable Flow. Lecture Storage and Flow of Particulate Solids*. Obtenido de http://www.mvt.ovgu.de/mvt_media/Vorlesungen/Lecture_SFPS/Folien_SFPS_4.pdf
- Vélez Serrano, J. F. (2003). *Visión por Computador*.

ANEXOS

1. Anexo 1

Manual de usuario

2. Anexo 2

Programación de Python

3. Anexo 3

Programación de Controllino

4. Anexo 4

Planos mecánicos

5. Anexo 5

Hojas de proceso

6. Anexo 6

Planos eléctricos