



**ESPE**

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS**  
**INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA**

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

**TESIS PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO EN MECATRÓNICA**

**AUTORES:**

**ÁVILA BALAREZO, EDUARDO PATRICIO  
BARRIONUEVO CHILUIZA, GERMÁN OMAR**

**TEMA: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE  
MÁQUINA ENFARDADORA SEMIAUTOMÁTICA  
CONTROLADA POR MICROPROCESADOR PARA CARGAS  
UBICADAS SOBRE PALLETS DE CUALQUIER TAMAÑO  
PARA LA EMPRESA ENKADOR S.A.**

**DIRECTOR: ING. SANCHEZ, XAVIER  
CODIRECTOR: ING. OROZCO, LUIS**

**SANGOLQUÍ, ABRIL 2014**

## **CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO**

El proyecto de grado denominado “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE MÁQUINA ENFARDADORA SEMIAUTOMÁTICA CONTROLADA POR MICROPROCESADOR PARA CARGAS UBICADAS SOBRE PALLETS DE CUALQUIER TAMAÑO PARA LA EMPRESA ENKADOR S.A.” fue realizado en su totalidad por los señores Eduardo Patricio Ávila Balarezo y Germán Omar Barrionuevo Chiluiza, como requerimiento parcial para la obtención del título de Ingeniera en Mecatrónica.

---

ING. XAVIER SANCHEZ

DIRECTOR

---

ING. LUIS OROZCO

CODIRECTOR

Sangolquí, 25 de abril 2014

## LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO

El proyecto de grado denominado “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE MÁQUINA ENFARDADORA SEMIAUTOMÁTICA CONTROLADA POR MICROPROCESADOR PARA CARGAS UBICADAS SOBRE PALLETS DE CUALQUIER TAMAÑO PARA LA EMPRESA ENKADOR S.A.”, ha sido desarrollado con base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme las citas que constan el pie de las páginas correspondiente, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía.

Consecuentemente este trabajo es de nuestra autoría.

En virtud de esta declaración, nos responsabilizamos del contenido, veracidad y alcance científico del proyecto de grado en mención.

---

Eduardo Patricio Ávila Balarezo

---

Germán Omar Barrionuevo Chiluiza

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA.

---

Director de la Carrera de Ingeniería Mecatrónica.

Ing. Francisco Terneus.

Sangolquí, 25 de abril 2014

**CARRERA DE INGENIERIA MECATRÓNICA**  
**AUTORIZACIÓN**

Nosotros:

Eduardo Patricio Ávila Balarezo y Germán Omar Barrionuevo Chiluiza

Autorizamos a la UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS – ESPE la publicación, en la biblioteca virtual de la Institución del trabajo “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE MÁQUINA ENFARDADORA SEMIAUTOMÁTICA CONTROLADA POR MICROPROCESADOR PARA CARGAS UBICADAS SOBRE PALLETS DE CUALQUIER TAMAÑO PARA LA EMPRESA ENKADOR S.A.”, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

---

Eduardo Patricio Ávila Balarezo

---

Germán Omar Barrionuevo Chiluiza

Sangolquí, 25 de abril 2014

## **DEDICATORIA**

Esta tesis se la dedico a mis padres, pilares fundamentales en mi vida. Ya que ellos siempre han estado presentes para apoyarme moral, psicológica y económicamente. Sin ellos, jamás hubiese podido conseguir lo que hasta ahora. Su tenacidad y lucha insaciable han hecho de ellos el gran ejemplo a seguir y destacar, no solo para mí, sino para mi familia en general.

A mi hermana que siempre ha estado junto a mí motivándome y brindándome su incondicional apoyo, muchas veces poniéndose en el papel de padre.

Dedico especialmente a una persona que estuvo a mi lado durante toda mi carrera universitaria y fue un gran soporte durante momentos difíciles y compartimos muchas experiencias valiosas de vida.

**Germán Omar Barrionuevo Chiluiza**

## **DEDICATORIA**

Aprovecho este grato momento para dedicar este triunfo a todas las personas que han estado conmigo, sé que este es tan solo el principio, la culminación de mi primer logro.

Dedico a mis padres, que con su afán y sacrificio, hicieron posible la culminación de esta etapa estudiantil que me ha capacitado para un futuro mejor y que siempre pondré al servicio del bien y de la comunidad.

A mis abuelitos, que me ayudaron desde mis primeros años escolares, inculcándome valores y principios que me han servido durante toda mi vida.

A mi abuelita, que aunque no esté ya entre nosotros pero sigue viva en mi corazón; ya que desde niño me enseñó a ser un estudiante responsable.

**Eduardo Patricio Ávila Balarezo**

## **AGRADECIMIENTO**

En primer lugar a Dios por haberme guiado por el camino de la felicidad hasta ahora.

En segundo lugar a cada uno de los que son parte de mi familia a mi padre, a mi madre, a mi hermana, a mi cuñado y a mi pequeña sobrina; por siempre haberme dado su fuerza y apoyo incondicional que me han ayudado y llevado hasta donde estoy ahora.

A la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, porque en sus aulas, recibimos el conocimiento intelectual y humano para ser personas de bien.

A mis amigos con quienes formamos un lazo indestructible llamado amistad.

Especial agradecimiento a nuestros directores de tesis Ing. Xavier Sánchez e Ing. Luis Orozco por su orientación, consejo y amistad.

**Germán Omar Barrionuevo Chiluiza**

## **AGRADECIMIENTO**

Con el tiempo aprendemos a aprovechar los momentos que nos da la vida, por eso quiero agradecer principalmente a Dios, por haberme dado la vida y permitirme el haber llegado hasta este momento tan importante de mi formación profesional.

A mis padres, ya que fueron un punto clave para salir adelante y estuvieron conmigo en mi proceso académico todo el tiempo.

A mis maestros, mi sincero agradecimiento y admiración, quiénes con sabiduría depositaron en mí, sus vastos conocimientos y a mi prestigiosa universidad porque en sus aulas recibí las mejores enseñanzas.

A nuestros directores de tesis, quiénes con nobleza siempre estuvieron prestos a guiarnos a lo largo del desarrollo de esta tesis.

**Eduardo Patricio Ávila Balarezo**



## INDICE DE CONTENIDOS

|   |    |
|---|----|
| CAPÍTULO I.....                                     | 1  |
| 1.1 ANTECEDENTES.....                               | 1  |
| 1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....                    | 2  |
| 1.3 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA.....                | 3  |
| 1.4 OBJETIVOS.....                                  | 4  |
| 1.4.1 OBJETIVO GENERAL.....                         | 4  |
| 1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....                    | 5  |
| 1.5 DESCRIPCIÓN GENERAL Y ALCANCE DEL PROYECTO..... | 6  |
| 1.6 PROCESO Y FORMAS DE ENFARDADO.....              | 8  |
| 1.6.1 FORMA DE APLICACIÓN.....                      | 9  |
| 1.6.2 FORMAS DE ENFARDADO.....                      | 10 |
| 1.6.3 TIPOS DE ENFARDADORAS.....                    | 13 |
| 1.7 SELECCIÓN DEL TIPO DE ENFARDADORA.....          | 19 |
| 1.7.1 MATRIZ DE SELECCIÓN DE SOLUCIONES.....        | 20 |
| 1.8 ALCANCE DEL PROCESO DE ENFARDADO.....           | 21 |
| 1.9 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS SISTEMAS.....        | 21 |
| 1.9.1 SISTEMA MECÁNICO.....                         | 21 |
| 1.9.2 SISTEMA ELÉCTRICO.....                        | 26 |
| 1.9.3 SISTEMA ELECTRÓNICO.....                      | 27 |
| 1.9.4 SISTEMAS DE CONTROL.....                      | 29 |
| CAPÍTULO II.....                                    | 33 |
| 2.1 DISEÑO DEL SISTEMA DE PRE-ESTIRAMIENTO.....     | 35 |
| 2.1.1 TIPOS DE SISTEMAS DE PRE-ESTIRAMIENTO.....    | 35 |

|                   |   |     |
|-------------------|---|-----|
| 2.1.3             | DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN ESCOGIDA.....               | 38  |
| 2.2               | DISEÑO DEL SISTEMA DE ELEVACIÓN .....                 | 45  |
| 2.2.1             | TIPOS DE ACTUADORES LINEALES .....                    | 45  |
| 2.2.2             | MATRIZ DE SELECCIÓN DE SOLUCIONES.....                | 48  |
| 2.2.3             | DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN ESCOGIDA.....               | 49  |
| 2.3               | DISEÑO DEL SISTEMA DE LOCOMOCIÓN .....                | 83  |
| 2.3.1             | TIPOS DE SISTEMAS DE LOCOMOCIÓN.....                  | 84  |
| 2.3.2             | MATRIZ DE SELECCIÓN DE SOLUCIONES.....                | 91  |
| 2.3.3             | DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN ESCOGIDA.....               | 92  |
| CAPÍTULO III..... |   | 98  |
| 3.1               | SISTEMA DE ALIMENTACIÓN.....                          | 98  |
| 3.1.1             | SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DEL CIRCUITO DE CONTROL...99  |     |
| 3.1.2             | SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DEL CIRCUITO DE POTENCIA ..99 |     |
| 3.2               | SELECCIÓN DE MOTORES .....                            | 101 |
| 3.2.1             | SISTEMA DE LOCOMOCIÓN.....                            | 102 |
| 3.2.2             | SISTEMA DE ELEVACIÓN .....                            | 107 |
| 3.2.3             | SISTEMA DE PRE-ESTIRAMIENTO .....                     | 108 |
| 3.3               | DIMENSIONAMIENTO DE LA BATERÍA .....                  | 110 |
| 3.4               | DIMENSIONAMIENTO DEL CALIBRE DE LOS CABLES .....      | 112 |
| CAPÍTULO IV.....  |   | 115 |
| 4.1               | INTRODUCCIÓN .....                                    | 115 |
| 4.2               | FUENTE DE ALIMENTACIÓN Y NIVELES DE VOLTAJE.....      | 117 |
| 4.2.1             | REGULACIÓN A 5VDC. ....                               | 117 |
| 4.2.2             | REGULACIÓN A 6 VDC.....                               | 119 |
| 4.2.3             | REGULACIÓN A 7.2 VDC.....                             | 119 |
| 4.3               | INSTRUMENTACIÓN .....                                 | 120 |

|                  |   |     |
|------------------|---|-----|
| 4.3.1            | SENSORES DE DISTANCIA .....                     | 120 |
| 4.3.2            | FINALES DE CARRERA.....                         | 121 |
| 4.4              | CONVERTIDORES DE POTENCIA.....                  | 122 |
| 4.5              | SISTEMAS AUXILIARES - ALARMAS.....              | 125 |
| 4.5.1            | ALARMA DE AGOTAMIENTO DE BATERÍA.....           | 125 |
| 4.5.2            | ALARMA ANTI-CHOQUE .....                        | 130 |
| 4.5.3            | ALARMA DE ROTURA DE LA PELÍCULA EXTENSIBLE..... | 135 |
| 4.6              | INTERFAZ HUMANA .....                           | 138 |
| 4.7              | UNIDAD DE CONTROL.....                          | 143 |
| CAPÍTULO V.....  |   | 148 |
| 5.1              | DEFINICIÓN DE SISTEMA MECATRÓNICO.....          | 149 |
| 5.2              | INTEGRACIÓN DE SISTEMAS .....                   | 149 |
| 5.2.1            | ELEMENTOS SENSORIALES.....                      | 150 |
| 5.2.2            | ELEMENTOS DE CONTROL.....                       | 151 |
| 5.2.3            | ELEMENTOS ACTUADORES .....                      | 152 |
| 5.3              | SISTEMA DE CONTROL.....                         | 153 |
| 5.3.1            | SISTEMA DE LOCOMOCIÓN.....                      | 153 |
| 5.3.2            | SISTEMA DE PRE-ESTIRAMIENTO .....               | 158 |
| 5.3.3            | SISTEMA DE ELEVACIÓN.....                       | 158 |
| 5.3.4            | CONTROL REMOTO .....                            | 162 |
| 5.3.5            | COMUNICACIÓN ENTRE HMI Y UNIDAD DE CONTROL..... | 162 |
| 5.4              | ENSAMBLAJE .....                                | 163 |
| 5.4.1            | ENSAMBLAJE POR SISTEMAS.....                    | 163 |
| 5.4.2            | ENSAMBLAJE FINAL .....                          | 170 |
| CAPÍTULO VI..... |   | 171 |
| 6.1              | PROTOCOLO DE PRUEBAS .....                      | 171 |

|   |     |
|---|-----|
| 6.1.1 SISTEMA DE PRE-ESTIRAMIENTO .....           | 171 |
| 6.1.2 SISTEMA DE ELEVACIÓN .....                  | 172 |
| 6.1.3 SISTEMA DE CORTE .....                      | 173 |
| 6.1.4 SISTEMA DE LOCOMOCIÓN.....                  | 174 |
| 6.1.5 ALARMAS .....                               | 175 |
| 6.1.6 INDICADORES LUMINOSOS.....                  | 175 |
| 6.1.7 CONTROL REMOTO POR RADIOFRECUENCIA.....     | 176 |
| 6.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....                   | 177 |
| 6.2.1 SISTEMA DE PRE-ESTIRAMIENTO .....           | 177 |
| 6.2.2 SISTEMA DE ELEVACIÓN .....                  | 177 |
| 6.2.3 SISTEMA DE LOCOMOCIÓN.....                  | 178 |
| 6.2.4 SISTEMA DE CORTE .....                      | 179 |
| 6.2.5 ALARMAS .....                               | 179 |
| 6.2.6 INDICADORES LUMINOSOS.....                  | 180 |
| 6.2.7 CONTROL REMOTO POR RADIOFRECUENCIA.....     | 181 |
| 6.3 TIEMPOS DE CICLO .....                        | 181 |
| 6.4 PORCENTAJE DE ESTIRAMIENTO .....              | 183 |
| 6.5 CALIDAD DEL ENFARDADO .....                   | 184 |
| 6.6 ÍNDICES DE MANTENIMIENTO.....                 | 187 |
| 6.6.1 CONFIABILIDAD.....                          | 187 |
| 6.6.2 DISPONIBILIDAD.....                         | 188 |
| 6.7 MEJORAS.....                                  | 191 |
| 6.7.1 MAYOR PORCENTAJE DE ESTIRAMIENTO .....      | 191 |
| 6.7.2 HISTORIAL DE FUNCIONAMIENTO Y ALARMAS ..... | 192 |
| 6.7.3 MEJORAR TIEMPOS DE CICLO.....               | 192 |
| 6.7.4 TIMÓN PARA DIRECCIÓN MANUAL.....            | 193 |

|   |     |
|---|-----|
| CAPÍTULO VII.....                                 | 194 |
| 7.1 COSTES DE INVERSIÓN.....                      | 194 |
| 7.1.1 SISTEMA MECÁNICO.....                       | 194 |
| 7.1.2 SISTEMA ELÉCTRICO Y ELECTRÓNICO.....        | 196 |
| 7.1.3 COSTE TOTAL.....                            | 197 |
| 7.1.4 GASTOS DE PERSONAL.....                     | 197 |
| 7.1.5 GASTOS DE GESTIÓN.....                      | 198 |
| 7.1.6 GASTO TOTAL.....                            | 198 |
| 7.1.7 RENTABILIDAD.....                           | 198 |
| 7.1.8 PRECIO DE VENTA AL PÚBLICO.....             | 199 |
| 7.2 COSTES DE EXPLOTACIÓN.....                    | 199 |
| 7.3 MÉTODO DE RECUPERACIÓN SIMPLE.....            | 200 |
| 7.4 MÉTODO DE RENDIMIENTO SOBRE LA INVERSIÓN..... | 203 |
| 7.5 VALOR ABSOLUTO NETO.....                      | 205 |
| 7.6 TASA INTERNA DE RETORNO.....                  | 206 |
| CAPÍTULO VIII.....                                | 208 |
| 8.1 CONCLUSIONES.....                             | 208 |
| 8.2 RECOMENDACIONES.....                          | 210 |

## INDICE DE TABLAS

|   |     |
|---|-----|
| Tabla 1 Especificaciones Técnicas .....                                   | 19  |
| Tabla 2 Selección del tipo de enfardadora.....                            | 20  |
| Tabla 3 Especificaciones técnicas mecánicas .....                         | 25  |
| Tabla 4 Características de los motores.....                               | 27  |
| Tabla 5 Elementos del sistema electrónico.....                            | 29  |
| Tabla 6 Funciones a realizar – Control .....                              | 30  |
| Tabla 7 Selección de Sistemas de pre- estiramiento .....                  | 37  |
| Tabla 8 Características técnicas de los motores de pre estiramiento ..... | 44  |
| Tabla 9 Tabla comparativa.....  | 49  |
| Tabla 10 Características del tornillo de potencia .....                   | 50  |
| Tabla 11 Características técnicas del motor de elevación .....            | 65  |
| Tabla 12 Sistemas de locomoción tipo carro .....                          | 90  |
| Tabla 13 Selección de sistema de locomoción .....                         | 91  |
| Tabla 14 Comparación entre propiedades del plástico y del acero.....      | 93  |
| Tabla 15 Corriente alterna vs Corriente directa .....                     | 100 |
| Tabla 16 Servomotor vs motor a pasos .....                                | 105 |
| Tabla 17 Características técnicas de los motores de estiramiento .....    | 109 |
| Tabla 18 Consumo eléctrico de la máquina .....                            | 111 |
| Tabla 19 Características eléctricas de los cables AWG.....                | 113 |
| Tabla 20 Selección del calibre de los cables AWG.....                     | 114 |
| Tabla 21 Niveles de voltaje requeridos .....                              | 117 |
| Tabla 22 Selección de sensores .....                                      | 120 |
| Tabla 23 Potencia disipada por los motores DC .....                       | 123 |
| Tabla 24 Configuración de los pines del driver de inversión de giro ..... | 124 |
| Tabla 25 Opciones de comunicación inalámbrica.....                        | 139 |
| Tabla 26 Selección del tipo de comunicación del control remoto.....       | 141 |
| Tabla 27 Pines requeridos para la unidad de control .....                 | 144 |
| Tabla 28 Características Placa Arduino Mega 2560 .....                    | 146 |
| Tabla 29 Funciones a sensor .....   | 150 |
| Tabla 30 Funciones a controlar.....                                       | 151 |

|  |     |
|--|-----|
| Tabla 31 Funciones actuadores .....                                  | 152 |
| Tabla 32 Entradas del driver del sistema de tracción.....            | 154 |
| Tabla 33 Velocidad de avance vs PWM.....                             | 155 |
| Tabla 34 Velocidad de avance de la máquina .....                     | 155 |
| Tabla 35 Entradas del driver del sistema de elevación .....          | 159 |
| Tabla 36 Velocidad de la torre vs PWM.....                           | 160 |
| Tabla 37 Velocidad de subida y bajada del sistema de elevación ..... | 160 |
| Tabla 38 Control del sistema de pre estiramiento.....                | 171 |
| Tabla 39 Control del sistema de elevación .....                      | 172 |
| Tabla 40 Control del subsistema de corte.....                        | 173 |
| Tabla 41 Control del sistema de locomoción .....                     | 174 |
| Tabla 42 Control de alarmas.....                                     | 175 |
| Tabla 43 Funcionamiento de los indicadores luminosos.....            | 175 |
| Tabla 44 Control remoto .....  | 176 |
| Tabla 45 Funcionamiento de la interfaz gráfica .....                 | 176 |
| Tabla 46 Tiempos de ciclo .....                                      | 182 |
| Tabla 47 Resultados con operación en modo manual .....               | 182 |
| Tabla 48 Comparación entre modo manual y semi-automático .....       | 183 |
| Tabla 49 Calidad del enfardado .....                                 | 185 |
| Tabla 50 Fallas en el funcionamiento de la máquina .....             | 189 |
| Tabla 51 Costes del sistema mecánico.....                            | 194 |
| Tabla 52 Costes del sistema eléctrico y electrónico .....            | 196 |
| Tabla 53 Coste total del proyecto .....                              | 197 |
| Tabla 54 Gastos de gestión .....                                     | 198 |
| Tabla 55 Gasto total del proyecto .....                              | 198 |

## INDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 Propiedades mecánicas de la película estirable .....        | 9  |
| Figura 2 Forma de aplicación del film .....                          | 10 |
| Figura 3: Enfardado Manual.....                                      | 11 |
| Figura 4 Enfardado semi-automático .....                             | 12 |
| Figura 5 Enfardadora automática.....                                 | 13 |
| Figura 6: Enfardadora de base giratoria.....                         | 15 |
| Figura 7 Enfardadora de anillo rodante.....                          | 16 |
| Figura 8 Enfardadora tipo robot .....                                | 17 |
| Figura 9 Enfardadora de brazo giratorio .....                        | 18 |
| Figura 10 Base del robot.....  | 22 |
| Figura 11 Torre para el movimiento vertical .....                    | 23 |
| Figura 12 Vista superior del sistema de pre estiramiento .....       | 23 |
| Figura 13 Sistema de pre-estiramiento de la máquina.....             | 24 |
| Figura 14 Sistema de corte automático.....                           | 24 |
| Figura 15 Batería .....  | 26 |
| Figura 16 Secuencia de Control.....                                  | 32 |
| Figura 17 Subsistemas del sistema mecánico .....                     | 33 |
| Figura 18 Secuencia de diseño.....                                   | 34 |
| Figura 19 Tipos de sistemas de pre-estiramiento .....                | 36 |
| Figura 20 Rodillo de copiadora .....                                 | 39 |
| Figura 21 Diagrama esquemático del sistema de pre-estiramiento ..... | 39 |
| Figura 22 Conexión entre motores y rodillos.....                     | 40 |
| Figura 23 Momento de inercia de un cilindro hueco .....              | 41 |
| Figura 24 Representación del torque sobre un eje .....               | 43 |
| Figura 25 Sistema de pre-estiramiento .....                          | 44 |
| Figura 26 Actuador lineal electromecánico .....                      | 47 |
| Figura 27 Tipos de roscas.....                                       | 51 |
| Figura 28 Parámetros del tornillo de potencia.....                   | 52 |
| Figura 29 Constantes de condiciones finales de las columnas de Euler | 56 |
| Figura 30 Diámetro nominal y paso del tornillo de potencia.....      | 57 |



|  |    |
|--|----|
| Figura 31 Dimensiones de tuercas de rosca trapezoidal .....        | 59 |
| Figura 32 Tuerca de bronce y brida de acero .....                  | 59 |
| Figura 33 Dimensiones tuerca (brida) .....                         | 60 |
| Figura 34 Dimensiones de la brida de acero.....                    | 60 |
| Figura 35 Fuerza normal en la rosca .....                          | 61 |
| Figura 36 Diagrama de cuerpo libre del tornillo de potencia .....  | 65 |
| Figura 37 Esfuerzo de aplastamiento entre tuerca y tornillo .....  | 67 |
| Figura 38 Falla producida por una fuerza cortante .....            | 68 |
| Figura 39 Representación de la flexión en los filetes .....        | 69 |
| Figura 40 Representación de esfuerzos en la raíz de la rosca ..... | 70 |
| Figura 41 Círculo de Mohr .....                                    | 72 |
| Figura 42 Conexión tuerca-brida-tornillo .....                     | 74 |
| Figura 43 Diseños para eliminar el juego lateral .....             | 75 |
| Figura 44 Conexión brida-tuerca superior e inferior .....          | 77 |
| Figura 45 Acople entre sistemas.....                               | 77 |
| Figura 46 Ángulos de acero .....                                   | 78 |
| Figura 47. Propiedades de ángulos de acero estructurales .....     | 79 |
| Figura 48 Rodamiento y guía lineal .....                           | 81 |
| Figura 49 Características técnicas del rodamiento lineal .....     | 82 |
| Figura 50 Torre de elevación .....                                 | 83 |
| Figura 51: Tipos de sistemas de locomoción .....                   | 84 |
| Figura 52: Representación de una rueda.....                        | 86 |
| Figura 53: Configuración diferencial .....                         | 87 |
| Figura 54 Configuración diferencial con ruedas de apoyo .....      | 87 |
| Figura 55 Configuración síncrona .....                             | 88 |
| Figura 56 Configuración tipo triciclo .....                        | 88 |
| Figura 57 Configuración tipo carro.....                            | 89 |
| Figura 58 Representación de la carga aplicada sobre el carro ..... | 93 |
| Figura 59 ABS-Propiedades Físicas y Mecánicas .....                | 94 |
| Figura 60 Tensión de Von Mises .....                               | 95 |
| Figura 61 Desplazamiento .....                                     | 96 |
| Figura 62 Coeficiente de seguridad .....                           | 96 |

|           |   |     |
|-----------|---|-----|
| Figura 63 | Ensamble final de sistemas .....                            | 97  |
| Figura 64 | Sistema de locomoción .....                                 | 102 |
| Figura 65 | Sistema de tracción .....                                   | 103 |
| Figura 66 | Vista inferior del sistema de dirección.....                | 103 |
| Figura 67 | Vista lateral del sistema de dirección .....                | 104 |
| Figura 68 | Servomotor empleado en el sistema de dirección .....        | 106 |
| Figura 69 | Motor DC acoplado al tornillo de potencia .....             | 107 |
| Figura 70 | Características del motor Z5D120-24GU [5GN3K] .....         | 108 |
| Figura 71 | Motor DC con caja reductora .....                           | 108 |
| Figura 72 | Servomotor empleado en el sistema de corte.....             | 109 |
| Figura 73 | Proceso de diseño electrónico .....                         | 116 |
| Figura 74 | Regulador de voltaje LM2596 .....                           | 118 |
| Figura 75 | Conexión del LM2596 .....                                   | 118 |
| Figura 76 | Sensor ultrasónico HC-SR04 .....                            | 121 |
| Figura 77 | Sensor final de carrera.....                                | 122 |
| Figura 78 | Driver de inversión de giro de 100W .....                   | 123 |
| Figura 79 | Diagrama de flujo – Alarma batería .....                    | 126 |
| Figura 80 | Representación gráfica de carga de batería .....            | 127 |
| Figura 81 | Circuito esquemático de alarma de agotamiento de batería .  | 128 |
| Figura 82 | Ruteado alarma de agotamiento de batería.....               | 129 |
| Figura 83 | Visualización 3D del alarma de agotamiento de batería ..... | 129 |
| Figura 84 | Diagrama de flujo – Alarma anti-choque.....                 | 131 |
| Figura 85 | Pines del AVR ATMEGA 8.....                                 | 132 |
| Figura 86 | Circuito esquemático de la alarma anti-choque .....         | 133 |
| Figura 87 | Ruteado de pistas de la alarma anti-choque.....             | 134 |
| Figura 88 | Visualización 3D del alarma anti-choque .....               | 134 |
| Figura 89 | Diagrama de flujo – Alarma rotura de film.....              | 135 |
| Figura 90 | Circuito esquemático .....                                  | 136 |
| Figura 91 | Ruteado de pistas .....                                     | 137 |
| Figura 92 | Visualización 3D del circuito impreso.....                  | 137 |
| Figura 93 | Pantalla táctil.....  | 139 |
| Figura 94 | Módulo Bluetooth .....                                      | 140 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 95 Control remoto .....                                       | 143 |
| Figura 96 Arduino Mega 2560.....                                     | 145 |
| Figura 97 Diagrama de bloques del sistema electrónico.....           | 147 |
| Figura 98 Representación gráfica de la mecatrónica .....             | 148 |
| Figura 99 Elementos Sensoriales .....                                | 150 |
| Figura 100 Elemento de control principal.....                        | 151 |
| Figura 101 Actuadores.....   | 152 |
| Figura 102 Diagrama de conexión del sistema de tracción.....         | 154 |
| Figura 103 Diagrama de flujo del sistema de tracción. ....           | 156 |
| Figura 104 Diagrama de flujo del control de dirección .....          | 157 |
| Figura 105 Diagrama de conexión del motor del sistema de elevación   | 159 |
| Figura 106 Diagrama de flujo del sistema de elevación.....           | 161 |
| Figura 107 Diagrama de conexión del control remoto .....             | 162 |
| Figura 108 Diagrama de conexión del módulo bluetooth.....            | 163 |
| Figura 109 Sistema de pre-estiramiento .....                         | 164 |
| Figura 110 Despiece sistema de pre-estiramiento.....                 | 164 |
| Figura 111 Sistema de elevación.....                                 | 165 |
| Figura 112 Despiece sistema de elevación.....                        | 166 |
| Figura 113 Distribución de sensores sobre el sistema de locomoción.. | 167 |
| Figura 114 Distribución del panel eléctrico .....                    | 168 |
| Figura 115 Localización de finales de carrera.....                   | 169 |
| Figura 116 Alarma de agotamiento de batería.....                     | 169 |
| Figura 117 Comparación entre el modelo simulado y construido .....   | 170 |
| Figura 118 Calidad del enfardado .....                               | 187 |

## GLOSARIO

- **Enfardado:** Operación por la que se aseguran las cargas sobre el palé mediante la utilización de film plástico.
- **Palet:** Armazón de madera, plástico u otros materiales empleado en el movimiento de carga ya que facilita el levantamiento y manejo con pequeñas grúas hidráulicas, llamadas carretillas elevadoras.
- **Film Plástico:** Utilizado para el enfardado de cargas previamente paletizadas.
- **Máquina:** Conjunto de elementos móviles y fijos cuyo funcionamiento posibilita aprovechar, dirigir, regular o transformar energía o realizar un trabajo con un fin determinado.
- **Robot:** Manipulador *multifuncional reprogramable*, capaz de mover materiales, piezas, herramientas o dispositivos especiales, a través de movimientos variables programados, para el desempeño de tareas diversas
- **Driver:** Dispositivo de control electrónico.
- **Enable:** Señal lógica para la habilitación de un driver.

## RESUMEN

El presente proyecto se lo realiza con la finalidad de brindar una solución al problema de enfardado manual de cargas ubicadas sobre palés, mediante el diseño y construcción de un prototipo de máquina enfardadora, denotando la importancia de los sistemas mecatrónicos dentro la industria nacional. Se inicia con el detalle de todos los aspectos técnicos sobre el diseño del sistema mecánico, se indica los diferentes sistemas y subsistemas que conforman la máquina. Luego se define la fuente de alimentación. Se detalla la instrumentación requerida, así como la unidad que controla todo el sistema y los actuadores que se requieren para realizar los movimientos. Además se indica las opciones de configuración de la máquina mediante un dispositivo táctil Android a través de una comunicación Bluetooth. Se define un protocolo de pruebas, el cual permite determinar el cumplimiento de los objetivos planteados al inicio, se señala las ventajas y desventajas del sistema propuesto, así como también mejoras futuras que permita que la máquina funcione de una manera más eficiente, manteniendo su flexibilidad, incrementando su robustez y reduciendo su costo. Además se realiza un análisis económico el cual permite conocer la rentabilidad del proyecto para Enkador S.A.

**Palabras clave:** Mecatrónica, enfardado, prototipo, palé.

## **ABSTRACT**

The next project is done in order to provide a solution to the problem of manual wrapping loads on pallets, through the design and construction of a baler prototype machine, denoting the importance of mechatronics systems within the domestic industry. It starts with the details of all technical aspects of the design of the mechanical system, the various systems and subsystems that make up the machine indicated. Later is defined the power supply. The instrumentation required is detailed, and the unit that controls the entire system and actuators required for movement. Also is indicated the different options to setting by a touch Android device executed by a Bluetooth communication. Is defined a protocol which allows determining compliance with the objectives defined at the beginning, indicated the advantages and disadvantages of the proposed system at the beginning, showing future improvements that allow the machine to operate more efficiently, while maintaining its flexibility, increasing its robustness and reducing cost. Finally is made an economic analysis which studies the profitability of the project for ENKADOR S.A.

**Keywords:** Mechatronics, wrapping, prototype, pallet.

# **CAPÍTULO I**

## **DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA**

### **1.1 ANTECEDENTES**

La industria es el conjunto de procesos y actividades que tienen como finalidad transformar las materias primas en productos elaborados. Para su desarrollo, la industria necesita materias primas, maquinarias y equipos para transformarlas.

Debido a la adaptación de la industria ecuatoriana para cumplir con estándares internacionales de embalaje y a los latentes avances tecnológicos en el área de desarrollo de nueva maquinaria, surge la necesidad de aumentar el volumen de producción y disminuir los tiempos de proceso, además de la constante competitividad entre las empresas hace que las mismas se vean obligadas a adquirir nueva maquinaria para poder competir y seguir a la vanguardia industrial.

La mayor parte de empresas internacionales vienen normalizando el embalaje de productos apilados sobre pallets o palés para facilitar el transporte, manipulación y apilamiento de manera que la operación de pesaje, verificación de lote, protección y seguridad sea lo más práctico, eficiente y económico posible.

El embalaje tiene una gran importancia, debido a que se tiene un contacto directo entre el producto y el consumidor final, es por eso que el sector empresarial tiene que buscar nuevos métodos de embalamiento de cargas, de manera que los productos no tengan problemas de corrosión, aplastamiento por peso, daños por rayos ultravioleta, riesgo de sustracción o caída de producto por mala apilación.

El embalaje, mejor conocido como enfardado en el ámbito industrial, es el proceso en el cual las cargas situadas sobre palés son envueltas mediante la utilización de película estirable. Una bobina de película estirable se despliega de abajo hacia arriba para envolver la carga sobre el palé. Existen diversos procedimientos para realizar esta acción, siendo la tendencia actual a emplear máquinas automatizadas para mejorar la velocidad y eficacia del proceso. Actualmente existe una gran cantidad de tipos de máquinas enfardadoras, que van desde las semiautomáticas como las de base giratoria y tipo robot para producciones medias, hasta equipos completamente automáticos orbitales requeridos en empresas con una elevada producción.

## **1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA**

ENKADOR S.A. es una empresa ecuatoriana dedicada a la fabricación y comercialización de filamentos sintéticos de poliéster y nailon para usos textiles, industriales y de limpieza. Al final de la línea de producción los productos finalizados (hilos en sus distintas presentaciones) son



almacenados en cajas, las cuales a su vez son apiladas sobre palés y enfardadas con una película estirable. Estos palés cargados son movilizados mediante un montacargas a la zona de almacenaje. Actualmente el proceso de enfardado se lo realiza de forma manual.

Este proyecto pretende reemplazar al proceso manual con una máquina semiautomática que presente mayores beneficios en cuanto a tiempo de ciclo, ahorro de película estirable y calidad de acabado; convirtiéndose en el compañero ideal para todas las realidades industriales que requieren de una máxima flexibilidad en términos de logística y de organización del depósito, así como de una elevada autonomía de embalaje. Se propone como líder en su categoría con un eficiente manejo, tanto en los tiempos de operación, como en manejo de la película estirable y aplicabilidad en planta.

### **1.3 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA**

Dada la necesidad de disminuir los tiempos de proceso y aumentar el volumen de producción, así como la constante competitividad entre empresas hace que las mismas se vean obligadas a adquirir nueva maquinaria para poder competir y seguir a la vanguardia industrial.

El presente proyecto de grado pretende cubrir las necesidades actuales de enfardado mediante el diseño y construcción de un prototipo de máquina enfardadora, la cual brinde un mayor ahorro en el consumo de película estirable (20%), ya la máquina aplicará siempre la misma cantidad según modelos y prestaciones evitando los altibajos producidos por las oscilaciones

de los brazos al enfardarlo de una forma manual, reduciendo el desperdicio y por ende mejoras al medio ambiente.

Además de brindar una mejor presencia del acabado de la carga sobre palé, la máquina enfardadora se encarga de que la película estirable se distribuya de forma uniforme, mejorando la calidad de vida para los empleados: menos fatiga, menos lesiones y mayor productividad.

La empresa ENKADOR S.A. trabaja veinte y cuatro horas diarias de lunes a viernes, divididos en tres turnos al día, el proceso de enfardado se realiza solamente durante el primer turno (8 horas), durante el cual se consume en promedio 10 rollos de film extensible al día.

Por estas razones, una máquina enfardadora es una buena inversión para ENKADOR S.A. y cualquier otra empresa por optimización de la producción, acabado, mejora de la salud de los operarios y sobretodo ahorro de dinero.

## **1.4 OBJETIVOS**

### **1.4.1 OBJETIVO GENERAL**

Solucionar el problema de enfardado manual en la Empresa ENKADOR S.A. mediante el diseño y construcción de un prototipo de máquina

enfardadora semiautomática controlada por microprocesador para cargas ubicadas sobre palés de mínimo 800x800 mm.

#### **1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Realizar el diseño mecánico, electrónico y mecatrónico de una máquina enfardadora semi-automática para productos que requieran una protección contra agentes externos de bajo impacto.
- Permitir una mayor calidad en el acabado del enfardado mediante el sistema de pre-estiramiento de la película plástica, eliminando el exceso de traslape entre las capas de plástico y también los espacios entre capas.
- Optimizar el uso de película extensible reduciendo el consumo de materia prima entre un 20 % y 40 %.
- Controlar el recorrido de la máquina alrededor del palé, manteniendo una velocidad entre 20 y 50 m/min.
- Implementar sinérgicamente los subsistemas de la máquina denotando la importancia de la Mecatrónica.

## 1.5 DESCRIPCIÓN GENERAL Y ALCANCE DEL PROYECTO

El desarrollo del presente proyecto aspira brindar una solución al problema de embalamiento manual de cargas sobre palés de la Empresa ENKADOR S.A., mediante el diseño y construcción de un prototipo de máquina enfardadora que se adapte a todos los requerimientos y sincronización de todo el sistema de producción, de manera que la máquina pueda disminuir el tiempo de proceso y aumentar el volumen de producción.

Para determinar la manera más eficiente de solucionar el problema de embalamiento manual es necesario conocer las diferentes formas de enfardado, así como los tipos de máquinas existentes en el mercado.

Las personas y empresas que compran o venden productos para empaque y embalaje a veces no tienen claras las diferencias entre estos. A continuación se presenta las definiciones básicas que cualquier persona interesada en este sector debe conocer y dominar.

### ***Envase:***

Se entiende por envase al material que contiene o guarda a un producto y que forma parte integral del mismo; sirve para proteger la mercancía y distinguirla de otros artículos. En forma más estricta, el envase es cualquier recipiente, lata, caja o envoltura propia para contener alguna materia o artículo. También se le conoce como “Embalaje Primario”.

***Empaque:***

Es cualquier material que encierra o protege un artículo con o sin envase con el fin de preservarlo y facilitar su entrega al consumidor. También se le conoce como “Embalaje Secundario”.

***Embalaje:***

Son todos los materiales, procedimientos y métodos que sirven para acondicionar, presentar, manipular, almacenar, conservar y transportar una mercancía. El embalaje en su expresión más breve es la caja o envoltura con que se protegen las mercancías para su transporte y almacenamiento. Es conocido también como “Embalaje Terciario o Enfardado”. La película estirable es el embalaje por excelencia. Sirve para transportar la mercancía de un lugar a otro sin problemas.

Algunos productos pueden ser utilizados como envase, empaque o embalaje.

Por ejemplo, una caja que contenga un producto es el envase. Pero una caja que contenga cajas más pequeñas puede ser un empaque.

La película estirable si se usa para envolver cajas sobre una tarima puede ser embalaje, pero si se usa para que en sí proteja al producto puede ser considerada empaque.

## 1.6 PROCESO Y FORMAS DE ENFARDADO

De acuerdo a lo explicado anteriormente se puede decir que el proceso que se va a desarrollar es un proceso de embalaje; mejor conocido en la industria como enfardado; el enfardado es la operación por la que se aseguran las cargas sobre el palé mediante la utilización de una película de plástico extensible.

### ***Película estirable***

La película estirable o también conocida como stretch film, es un material plástico transparente, hecho con resina de polietileno de baja densidad lineal, característica que le permite tener una alta resistencia mecánica y un bajo espesor.

La película estirable es utilizada dentro de la industria, principalmente para sostener y proteger productos en una tarima de madera o plástico. Su uso facilita la transportación y almacenaje de los artículos a un costo bajo.

La película estirable tiene algunas características mecánicas que se miden siguiendo normas dictadas por ASTM International (American Society for Testing and Materials). Figura 1.

| Propiedad                | Norma          | Unidades | Manual | Alta Resistencia |       |
|--------------------------|----------------|----------|--------|------------------|-------|
| Opacidad                 | ASTM<br>D-1003 | %        | 2.5    | 1.8              |       |
| Brillo                   | ASTM<br>D-2457 | 45°      | 92     | 96               |       |
| Resistencia a la tensión | DM             | ASTM     | PSI    | 5000             | 11000 |
|                          |                | D-882    | MPa    | 34               | 75    |
|                          | DT             | ASTM     | PSI    | 3600             | 3000  |
|                          |                | D-882    | Mpa    | 25               | 20    |
| Elongación a la rotura   | DM             | ASTM     | %      | 450              | 400   |
|                          | DT             | D-882    |        | 850              | 320   |
| Módulo de Elasticidad    | DM             | ASTM     | PSI    | 22000            | 43000 |
|                          |                | D-882    | Mpa    | 152              | 292   |
|                          | DT             | ASTM     | PSI    | 24000            | 19000 |
|                          |                | D-882    | Mpa    | -165             | 129   |

**Figura 1 Propiedades mecánicas de la película estirable**

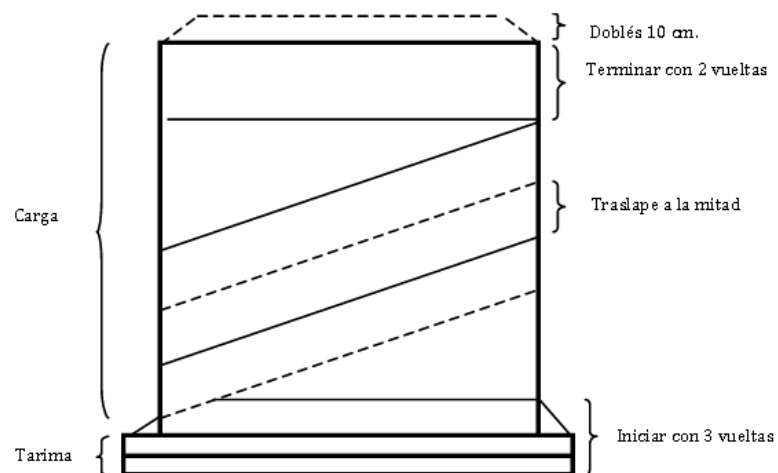
Fuente: (Plásticos Enres, 2012)

### 1.6.1 FORMA DE APLICACIÓN

- 1) Se localiza el lado de la película que contiene el adherente.
- 2) Se sujeta la punta del rollo a la tarima, con el adherente contra la carga.
- 3) Es conveniente fijar la carga a la tarima con 3 vueltas por lo menos, aplicando la tensión adecuada para no romper la película en las esquinas.
- 4) Se desenrolla la película separada de los productos, hasta la esquina de la carga; llegando a esta, tensionar la película 20% en la película normal y 10% en el caso de la película de alta resistencia.
- 5) Pasar a la otra cara fijando la cara anterior, y así sucesivamente.

- 6) Es recomendable traslapar entre una tercera parte y la mitad del ancho de la película.
- 7) Al terminar dar dos vueltas en la parte superior de la tarima cuidando que la película que sobre sale arriba no sea más de 10 cm.
- 8) Finalmente se corta la película estirable.

El siguiente diagrama muestra cómo queda la película después de ser colocada Figura 2.



**Figura 2 Forma de aplicación del film**

Fuente: (Plásticos Enres, 2012)

### 1.6.2 FORMAS DE ENFARDADO

Los sistemas de enfardado han evolucionado con el paso del tiempo, mejorando su eficiencia, calidad, tecnología y reduciendo sus costos de fabricación. A continuación se presenta los tipos de enfardado existentes en el mercado.



### 1.6.2.1 Enfardado manual

En sus inicios el embalaje de los productos apilados sobre palés se realizaba manualmente, es decir, se requería de personal para embalar el producto paletizado (Figura 3); sin embargo, este procedimiento no es el adecuado debido a que el enfardado no es uniforme, se usa ineficiente y excesivamente la película estirable, se requiere de esfuerzo físico y entrenamiento previo del operario, el tiempo empleado es innecesariamente alto debido a las diferentes alturas de las pilas de los productos, se denota una envoltura inadecuada en la parte superior de los palés, formación de cuellos de botellas en la áreas de empaque e ineficiente control de calidad.



**Figura 3: Enfardado Manual**

### 1.6.2.2 Enfardado semiautomático.

Este tipo de proceso (Figura 4), permite embalar productos paletizados gracias a la intervención del operario, para asegurar la película estirable al palé y luego del enfardado, retirar la película cortándola.

Las máquinas que realizan este proceso no disponen de un sistema que detecte si existe o no carga sobre la base giratoria, ni el control del recorrido vertical en la torre, tampoco la regulación de tensión de la película plástica, y menos aún la detección de rotura del film, y su principal desventaja es que no son móviles.



**Figura 4 Enfardado semi-automático**

Fuente: (ROBOPAC, 2013)

### **1.6.2.3 Enfardado automático.**

El proceso de enfardado automático es requerido para grandes plantas de producción, como se muestran en la Figura 5, las cuales no necesitan la intervención del operario para colocar y retirar la película estirable. Este tipo de máquinas traen consigo un sistema automático de acople, un panel de operador de mandos para seleccionar las necesidades de embalaje, disposición de pre-estiro de película plástica, sensores de posición y hasta

incorporan básculas para controlar el peso de los palés. La desventaja de este tipo de enfardado es su elevado costo.



**Figura 5 Enfardadora automática**

Fuente: (ROBOPAC, 2013)

### **1.6.3 TIPOS DE ENFARDADORAS**

Existen máquinas enfardadoras semiautomáticas y automáticas, la principal diferencia está en que la segunda cuenta con un sistema de sujeción y corte de película estirable, lo que la hace totalmente autónoma.

Ambas máquinas tienen el mismo funcionamiento; es decir, aplican película plástica alrededor del palé por efecto de rotación, de manera que se obtenga un paquete embalado y compactado consiguiendo así, seguridad respecto a posibles desplazamientos de la carga y protección contra polvo, suciedad y humedad.

### 1.6.3.1 Descripción de los tipos de enfardadoras

#### ✓ **Enfardadora de base giratoria**

La estructura básica para este tipo de enfardadora consta de una base con una plataforma giratoria que lleva incorporado un camino de rodillos motorizado y una columna donde se halla integrado el conjunto del carro porta-bobinas y el cuadro eléctrico. En este modelo de máquina es siempre el palé el que gira y la bobina de película solo se mueve a lo largo del mástil.

Normalmente las características principales para este tipo de enfardadora que están relacionadas con las medidas del palé son el peso máximo soportado, el diámetro de la plataforma y la altura del mástil.

En cambio, las características relacionadas con la naturaleza de la carga son: El arranque progresivo o sea la rampa de aceleración que hace la plataforma al empezar, el carro porta bobina (que puede ser de simple estiramiento o de pre-estiraje motorizado), los ciclos de envolvimiento programables, la fotocélula o encoder para detectar la altura del palé, el prensor neumático o electromecánico para la estabilización de la carga

Además poseen un sistema de agarre de la película para sujetarlo cuando se entra en la fase de corte del mismo o al principio del ciclo cuando hay que dar las primeras vueltas. (Figura 6)

Este tipo de máquina no puede pasar de los 35-40 palés por hora de producción debido a que es imposible aumentar la rotación de la plataforma a más de 15 vueltas por minuto debido a que el palé podría sufrir los efectos

de la alta fuerza centrífuga. La configuración más común es un tramo de transporte a la entrada de la máquina, el transporte de la máquina y un tramo de salida.



**Figura 6: Enfardadora de base giratoria**

Fuente: (abc-pack, 2013)

✓ **Enfardadora de anillo rodante**

La ventaja más evidente de este tipo de máquina es de que el palé queda parado y el brazo con el carro porta bobina gira alrededor, pero, dado que el carro gira soportado por una pista de forma circular que ella misma sube y baja se puede alcanzar la velocidad de 40 rotaciones por minuto, siendo este sistema entre los más rápidos para el envolvimiento de palés. (Figura 7)

Permite obtener una envoltura compacta y uniforme de todo tipo de cargas paletizadas mediante la envoltura diferenciada de productos de naturaleza diversa.

La posibilidad de situar de forma automática una lámina de cobertura superior confiere una protección suplementaria al producto paletizado frente a los agentes atmosféricos.

Esta máquina puede ser instalada en cualquier línea de embalaje ya existente y satisface perfectamente las necesidades de una producción intensiva.



**Figura 7 Enfardadora de anillo rodante**

Fuente: (CONTROLPACK, 2013)

✓ **Enfardadora tipo robot**

Las máquinas semiautomáticas de tipo autopropulsada denominada comúnmente “robot” requieren que un operario asegure la película estirable a la tarima de madera, éstas realizan un ciclo completo de envolvimiento

permitiendo subir hasta 3 metros de altura (Figura 8). Estas máquinas por su naturaleza son indicadas para todo tipo de palé que tenga un perímetro superior a los 4 metros, una inestabilidad elevada al transporte con carretilla o al movimiento centrífugo de una plataforma giratoria.

Además agilizan el proceso de enfardado en los casos en los cuales los palés a envolver se encuentren en diferentes lugares. Esto se debe a que la máquina se desplaza fácilmente hasta donde se encuentra la carga. El sistema autopropulsado tiene una productividad del 40% superior al sistema con plataforma giratoria.



**Figura 8 Enfardadora tipo robot**

Fuente: (CONTROLPACK, 2013)

#### ✓ **Enfardadora de brazo giratorio**

Estas máquinas tienen las mismas ventajas que la máquina autopropulsada o tipo robot que da vueltas alrededor del palé con la excepción de que son fijas, ya que el brazo que gira está montado en una estructura en posición determinada. (Figura 9)

Al igual que la máquina autopropulsada o tipo robot, ésta tiene la ventaja de que no hay que subir una rampa o empotrar una plataforma giratoria para envolver la carga, no hay que montar un plato prensor en caso de inestabilidad del palé, porque éste no se mueve durante el envolvimiento, pero si hay que llevarlo a la máquina y colocarlo en una posición predeterminada.

El brazo con el carro porta bobina gira alrededor así que se pueden alcanzar velocidades de rotación hasta 35 vueltas por minuto con sistemas de refuerzo en la columna y en la estructura de soporte del sistema.

A veces estas máquinas por problemas de espacio se pueden instalar directamente en una pared o una columna eliminando la estructura que normalmente apoya en el suelo.



**Figura 9 Enfardadora de brazo giratorio**

Fuente: (ROBOPAC, 2013)



## 1.7 SELECCIÓN DEL TIPO DE ENFARDADORA

Para determinar el tipo de enfardadora adecuada para implementar en ENKADOR S.A. se debe tener en cuenta los requerimientos de diseño que la empresa necesita para envolver, transportar y almacenar sus productos. (Tabla 1)

Enkador S.A. requiere una máquina con un alto grado de autonomía, eficiente, confiable y de bajo costo. Las enfardadoras automáticas son las más desarrolladas en este ámbito, pero su costo es sumamente elevado, razón por la cual una máquina semi-automática es la opción adecuada en este caso.

**Tabla 1 Especificaciones Técnicas**

| <b>ESPECIFICACIONES TÉCNICAS</b>                        |                 |
|---|-----------------|
| <b><i>Características del producto</i></b>              |                 |
| Dimensiones mínimas                                     | 800x800 mm      |
| Altura máxima   | 1500 mm         |
| Peso máximo   | sin restricción |
| <b><i>Características de la película extensible</i></b> |                 |
| Diámetro exterior                                       | 200 mm          |
| Diámetro interior                                       | 76 mm           |
| Altura  | 250 mm          |
| Peso  | 4 kg            |
| Espesor   | 15-35 um        |

### 1.7.1 MATRIZ DE SELECCIÓN DE SOLUCIONES

**Tabla 2 Selección del tipo de enfardadora**

|                                   | <i>Tamaño</i> | <i>Movilidad</i> | <i>Costo</i> | <i>Velocidad</i> | <i>Autonomía</i> | <i>Peso</i> | <i>Total</i> |
|-----------------------------------|---------------|------------------|--------------|------------------|------------------|-------------|--------------|
| Enfardadora de base<br>Giratoria  | 6             | 5                | 7            | 5                | 6                | 7           | 36           |
| Enfardadora de anillo<br>Rodante  | 4             | 1                | 1            | 9                | 9                | 5           | 29           |
| Enfardadora de brazo<br>giratorio | 4             | 1                | 1            | 10               | 10               | 5           | 31           |
| Enfardadora tipo<br>Robot         | 8             | 10               | 8            | 5                | 8                | 9           | 48           |

Calificaciones: 8 - 10 (muy bueno), 7 - 5 (regular), 4 – 2 (malo), 1 – 0 (no posee)

Al comparar estos tipos de enfardadoras se observa que la tipo robot posee mejores características que las demás, a excepción de la velocidad de enfardado. La producción de Enkador S.A. es media por lo que la enfardadora tipo robot cumple con todos los requerimientos de diseño.

## **1.8 ALCANCE DEL PROCESO DE ENFARDADO**

La enfardadora tipo robot requiere que un operario asegure la película estirable a la base del palé. A partir de ese momento la máquina tiene completa autonomía hasta el fin del proceso cuando la película plástica es cortada automáticamente.

El operario además podrá configurar ciertos parámetros de funcionamiento como: velocidad de bajada del carro porta bobina (alta-media-baja), tipo de ciclo (solo subida o subida y bajada), o ejecutar la última configuración guardada.

Después de ser configurada la máquina procederá a realizar el recorrido alrededor del palé envolviendo la carga. Además contará con varios sistemas de seguridad y sensores que le otorgan gran funcionalidad y autonomía al proyecto.

## **1.9 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS SISTEMAS**

### **1.9.1 SISTEMA MECÁNICO**

Un sistema mecánico es un conjunto de elementos dinámicamente relacionados, que permiten producir, transmitir, regular o modificar

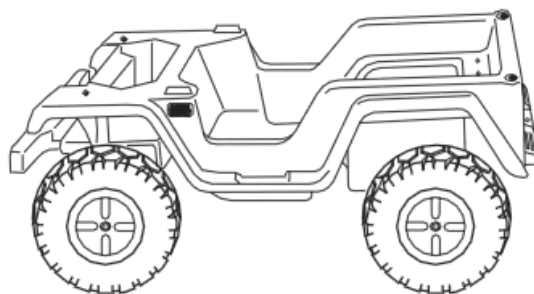
movimiento. Cada elemento cumple una función específica dentro del sistema, razón por la cual se basará en los siguientes aspectos generales, para posteriormente detallarlos hasta el punto de obtener un diseño práctico y eficiente.

#### **1.9.1.1 Base del Robot**

En el cual se encontrará el sistema de locomoción de la máquina, que constará con un par de ruedas delanteras para la dirección y dos ruedas traseras que le darán la tracción necesaria para realizar los giros cada  $90^\circ$  y así la máquina sea capaz de realizar el recorrido completo alrededor del palé (Figura 10).

Además dentro de este se ubicará la batería que alimente el sistema, la placa micro-controlada para los sistemas de control y los motores encargados de dar el movimiento al robot.

Otra función de gran importancia es la de soportar la torre para el movimiento del carro porta bobina.



**Figura 10 Base del robot**

Fuente: (Power Wheels by Fisher Price, 2004)

### 1.9.1.2 Torre

Encargada de la protección y guía de mecanismos para realizar el movimiento vertical del rollo de película extensible para envolver la carga, sobre el cual se encontrará el actuador para el ascenso y descenso del carro porta bobina (Figura 11).

La torre de elevación restringe la altura máxima de envolvimiento, dentro de esta se ubicarán sensores para detectar la parte superior e inferior del recorrido. La función más importante es la de soportar al carro porta bobina y proveer las facilidades para que se desplace dentro de él.

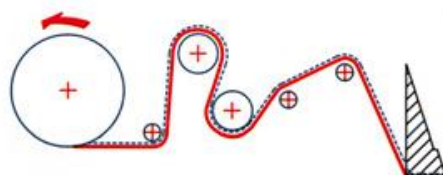


**Figura 11 Torre para el movimiento vertical**

Fuente: (CONTROLPACK, 2013)

### 1.9.1.3 Carro porta bobina

Constará de un sistema de rodillos para realizar el pre-estiramiento de la película extensible. (Figura 12)



**Figura 12 Vista superior del sistema de pre estiramiento**

Fuente: (CONTROLPACK, 2013)

Además un sistema de carga y descarga de la película estirable, para proveer un fácil, rápido y seguro recambio de plástico para paletizar.



**Figura 13 Sistema de pre-estiramiento de la máquina**

Fuente: (CONTROLPACK, 2013)

Además almacenará un sistema para el corte automático de la película una vez que haya terminado el recorrido alrededor del palé. (Figura 14)



**Figura 14 Sistema de corte automático**

Fuente: (CONTROLPACK, 2013)

En base a las características propuestas inicialmente, se realizará el diseño de la estructura donde se colocarán los elementos necesarios para que la enfardadora semiautomática tipo robot pueda desplazarse libre y autónomamente.

Posteriormente será necesario realizar un análisis de cargas y esfuerzos que deberá soportar la máquina, además se deberá considerar la inercia que debe vencer para iniciar el movimiento, la fricción existente tanto estáticamente como dinámicamente, y a partir del respectivo análisis se realizará la selección de motores y cajas reductoras de velocidad, para poder mover el prototipo a la velocidad requerida.

Se requiere un diseño apropiado para la elección de los diferentes mecanismos requeridos tanto para la torre así como para el carro porta bobina, y así poder controlar su movimiento dependiendo del análisis estático y dinámico realizado anteriormente.

Mediante este diseño se aspira cumplir las características señaladas en la Tabla 3:

**Tabla 3 Especificaciones técnicas mecánicas**

| <b>ESPECIFICACIONES TÉCNICAS MECÁNICAS</b> |                     |
|--|---------------------|
| <b>Dimensiones</b>                         | <b><i>mm</i></b>    |
| Base                                       | 1100 x 650          |
| Torre (altura máxima)                      | 1500                |
| <b>Velocidades</b>                         | <b><i>m/min</i></b> |
| Avance                                     | 20-50               |
| Carro porta bobina (subida-bajada)         | 1-4                 |

## 1.9.2 SISTEMA ELÉCTRICO

Un sistema eléctrico es un conjunto de elementos dinámicamente relacionados, que permiten generar, conducir y recibir corriente eléctrica.

Dentro de este sistema, cada elemento de la máquina tiene una conexión eléctrica determinada, así para abastecer a cada uno de los elementos se tiene diferentes niveles de voltaje, por lo cual se requiere esencialmente de una batería o acumulador, cables, un interruptor principal y un actuador, generalmente motores.

### 1.9.2.1 Sistema de alimentación

Debido a que esta máquina es un dispositivo móvil y genera un movimiento alrededor de un palé, no es factible adquirir la alimentación de un tomacorriente, razón por la cual se utilizará una batería (Figura 15), la cual proveerá la energía a todos los dispositivos presentes.



**Figura 15 Batería**

Fuente: (Power Wheels by Fisher Price, 2004)

La potencia de la batería será calculada en base al consumo de todos los componentes presentes en la máquina.



### 1.9.2.2 Motores

Cada subsistema mecánico necesita actuadores que generen el movimiento deseado para cada proceso. En la Tabla 4 se detalla la potencia requerida en cada subsistema.

**Tabla 4 Características de los motores**

| <b>FUNCIONES</b>                           | <b>POTENCIA</b> |
|--|-----------------|
| Dirección de la máquina alrededor del palé | Media           |
| Corte automático de la película extensible | Baja            |
| Movimiento de ruedas traseras              | Alta            |
| Movimiento vertical del carro porta bobina | Alta            |
| Pre-estiramiento de la película extensible | Baja            |

Motores de corriente continua, alterna, motores a pasos, servomotores son las opciones más probables para ser empleadas para cumplir eficientemente con las funciones de la máquina.

### 1.9.3 SISTEMA ELECTRÓNICO

Un sistema electrónico es un conjunto de circuitos que interactúan entre sí para obtener un resultado. Una forma de entender los sistemas electrónicos consiste en dividirlos en las siguientes partes:

- Entradas
- Circuitos de procesamiento de señales
- Salidas

Básicamente son tres etapas: La primera (transductor), la segunda (circuito procesador) y la tercera (circuito actuador).

#### **1.9.3.1 Entradas**

Sensores o transductores electrónicos o mecánicos que toman las señales del mundo físico y las convierten en señales de corriente o voltaje. Ejemplo: los sensores ultrasónicos para determinar obstáculos.

#### **1.9.3.2 Circuitos de procesamiento de señales**

Consisten en artefactos electrónicos conectados juntos para manipular, interpretar y transformar las señales de voltaje y corriente provenientes de las entradas y accionando el módulo de salida. Son los dispositivos que deciden cuál es la acción a realizar. Ejemplo: Micro controlador.

#### **1.9.3.3 Salidas**

Actuadores u otros dispositivos (también transductores) que convierten las señales de corriente o voltaje provenientes del micro controlador en señales físicamente útiles. Por ejemplo: un indicador luminoso que indique que la máquina se encuentra trabajando.

Para implementar un eficaz sistema de control del robot es necesaria la correcta selección de los dispositivos electrónicos presentes en el sistema, de acuerdo a la función que éstos estén destinados a cumplir. (Tabla 5)

Tabla 5 Elementos del sistema electrónico

| <b>FUNCIÓN PRINCIPAL</b>   | <b>SUB-FUNCIONES</b>             | <b>ELEMENTO(S)<br/>ELECTRÓNICO(S)</b>                            |
|--|----------------------------------|--|
| <b>Configuración de parámetros de control</b>                                | Ingreso y visualización de datos | Panel táctil   |
| <b>Implementación del sistema de control</b>                                 | Control local                    | Micro-controlador  |
|  | Control remoto                   | Micro-controlador, emisor y receptor de comunicación inalámbrica |
| <b>Alarmas</b>   | Rotura de film extensible        | Sensor de presencia  |
|  | Agotamiento de batería           | Convertor análogo a digital                                      |
|  | Anti-choque                      | Sensor de distancia  |
| <b>Detección de posición del carro porta bobina en la torre de elevación</b> | Posición máxima y mínima         | Finales de carrera mecánicos                                     |
| <b>Detección de la altura de la carga</b>                                    |                                  | Sensor de presencia  |

#### 1.9.4 SISTEMAS DE CONTROL

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

Los sistemas de control deben conseguir los siguientes objetivos:

- Ser estables y robustos frente a perturbaciones y errores en los modelos.
- Ser eficiente según un criterio preestablecido evitando comportamientos bruscos e irreales.

#### 1.9.4.1 Control del sistema eléctrico

En este punto es necesario determinar que variables se va a controlar para realizar cada función específica de la máquina, así como también el tipo de control que se implementará. Tabla 6.

**Tabla 6 Funciones a realizar – Control**

| <b>FUNCIONES</b>                                  | <b>VARIABLE CONTROLADA</b> | <b>VARIABLE MANIPULADA</b> | <b>TIPO DE CONTROL</b> |
|---|----------------------------|----------------------------|------------------------|
| <b>Dirección de la máquina alrededor del palé</b> | Posición                   | Tren de pulso              | Lazo Cerrado           |
| <b>Corte automático de la película extensible</b> | Posición                   | Tren de pulso              | Lazo abierto           |
| <b>Movimiento de ruedas traseras</b>              | Velocidad                  | Ciclo de trabajo (PWM)     | Lazo abierto           |
| <b>Movimiento vertical del carro porta bobina</b> | Velocidad                  | Ciclo de trabajo (PWM)     | Lazo abierto           |

#### **1.9.4.2 Secuencia de control de la máquina con alarmas**

En la Figura 16 se muestra el diagrama de funcionamiento del robot accionado mediante un control de mando a distancia.

#### **1.9.4.3 Control remoto**

Debido a que la máquina se encuentra en constante movimiento y el panel de control se encuentra sobre esta es necesario implementar un control remoto para controlar el movimiento de la máquina en casos específicos. Por ejemplo, cuando por algún motivo se desee detener la máquina en pleno funcionamiento.

Para esto se estudiará la mejor alternativa, la cual brinde facilidad de uso, bajo precio, mayor confiabilidad y simpleza para ser configurada mediante un micro-controlador. Dentro de las alternativas se encuentran módulos bluetooth, de radiofrecuencia, infrarrojos, entre otros.

## ACTIVACIÓN

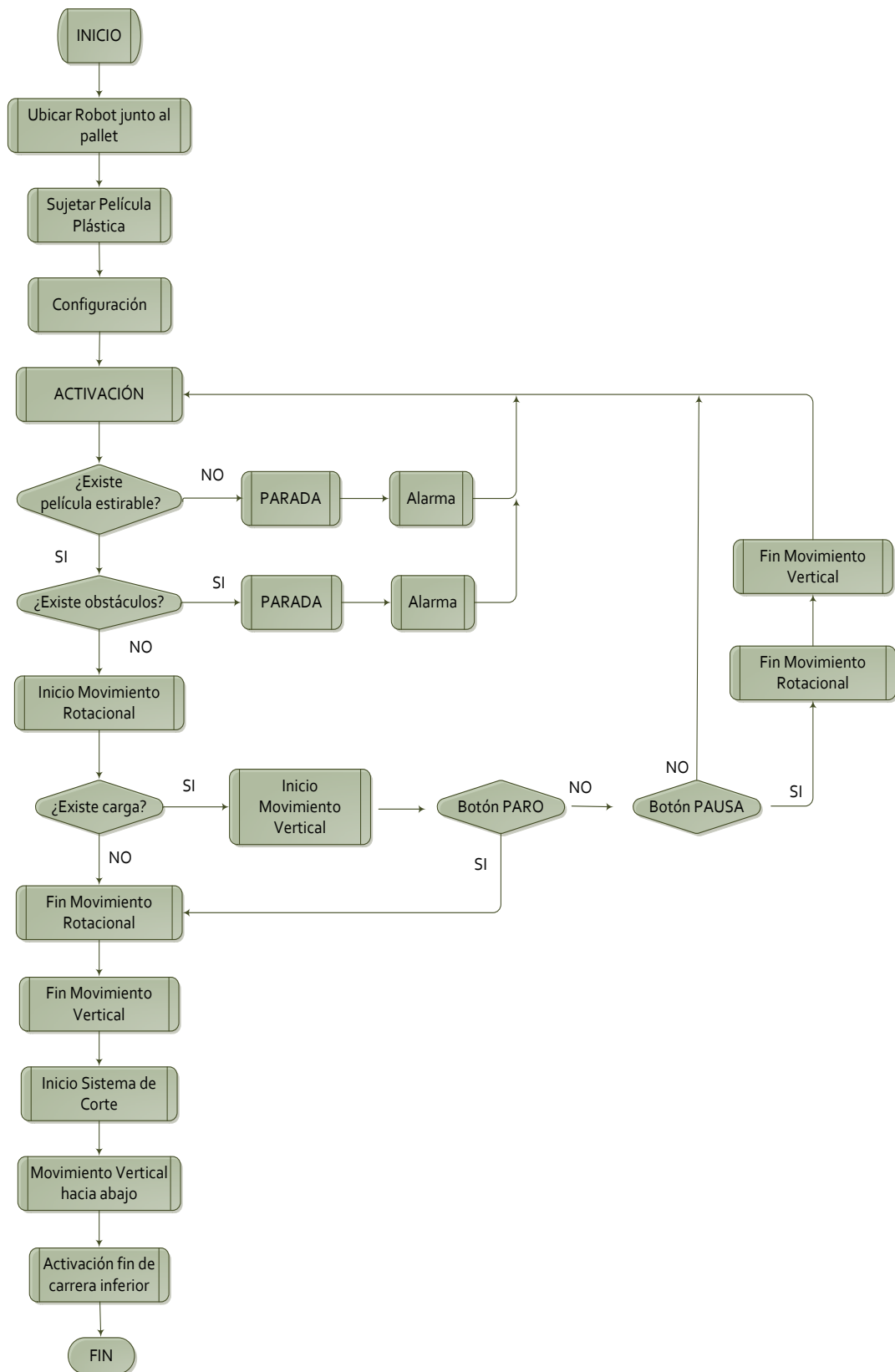


Figura 16 Secuencia de Control

## CAPÍTULO II

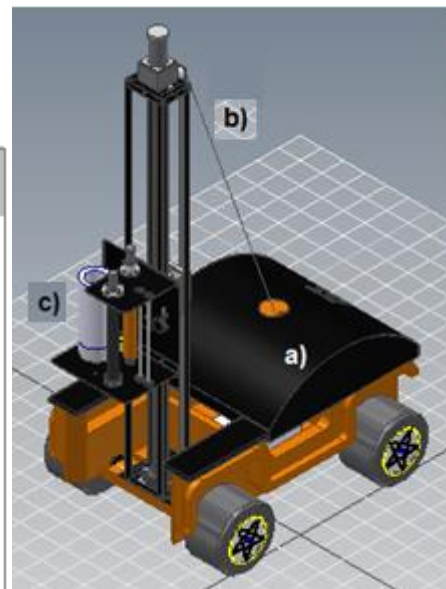
### SISTEMA MECÁNICO

En el desarrollo del presente capítulo se detalla los elementos necesarios para que la máquina enfardadora pueda realizar todas sus funciones dentro de los diferentes sistemas y subsistemas que la conforman. Teniendo en cuenta que el sistema está sometido a diferentes cargas y esfuerzos, se debe prevenir todo tipo de fallas en sus componentes.

El sistema se divide en tres subsistemas principales (Figura 17):

- a) Sistema de locomoción
- b) Sistema de elevación
- c) Sistema de pre estiramiento

| SUBSISTEMAS |  |
|-------------|--|
| <b>a)</b>   | <b>LOCOMOCIÓN</b><br>(Chasis, ruedas, soporte para batería, motores, panel de control y cableado)          |
| <b>b)</b>   | <b>ELEVACIÓN</b><br>(Mástil para subir y bajar la película estirable)                                      |
| <b>c)</b>   | <b>PRE ESTIRAMIENTO</b><br>(Soporte para el Film, así como las bobinas de estiramiento y sistema de corte) |



**Figura 17 Subsistemas del sistema mecánico**

Para iniciar con el diseño de la enfardadora se necesita determinar el peso que va a desplazarse a través de la torre de elevación, es decir, el peso del sistema de pre estiramiento. Una vez conocida esta variable se diseña el sistema de elevación detallando la velocidad máxima de subida y bajada, así como el tiempo para realizar esta acción.

Una vez diseñado el sistema de elevación se puede conocer todo el peso que afecta a la estructura de soporte del robot (chasis), debido a que se dispone de un sistema de locomoción de un vehículo eléctrico para niños de tres años en adelante se requiere la verificación de que dicho vehículo es capaz de soportar todo el peso de la estructura. (

Figura 18)



**Figura 18 Secuencia de diseño**



## **2.1 DISEÑO DEL SISTEMA DE PRE-ESTIRAMIENTO**

El sistema de pre-estiramiento consiste en un conjunto de rodillos que mediante su diferencia de velocidad angular permiten una elongación la película plástica. Entre mayor es la diferencia de velocidad entre el primer rodillo y el siguiente, mayor es el porcentaje de estiramiento.

La función principal de este sistema es proporcionar la tensión necesaria a la película plástica para aprovechar toda la capacidad de elongación de la película, para que ésta pueda desplazarse a través de los rodillos sin romperse y así obtener el mayor rendimiento a la película.

### **2.1.1 TIPOS DE SISTEMAS DE PRE-ESTIRAMIENTO**

Hay sistemas con el porcentaje de estiramiento fijo y variable. La diferencia de velocidades entre rodillos es obtenida mediante relaciones de engranes, frenos electromecánicos o electromagnéticos, rodillos motorizados, entre otros. (CONTROLPACK, 2013)

- **Sistema con freno mecánico**

El carro porta bobinas posee un freno mecánico sobre el rodillo de goma, el cual permite un ajuste manual de la tensión de película plástica. Además existe un estiramiento constante del plástico independientemente del diámetro de la bobina. Los rodillos de metal suplementarios están posicionados de manera tal que asegurar un mayor agarre de la película alrededor del rodillo de freno.

- **Sistema con freno electromecánico**

El carro porta bobinas está dotado de un dispositivo de estiraje de la película plástica, realizado mediante un freno electromecánico. La tensión de plástico es ajustable desde panel de control

- **Sistema con freno electromagnético**

El carro porta bobinas cuenta con un freno electromagnético, el cual tiene un valor de pre-estiro ajustable desde panel de control.

- **Sistema electrónico**

Este sistema posee rodillos motorizados cuyo valor de pre-estiraje es ajustable de 0% hasta 200% desde panel de control. Además cuenta con un control de la fuerza aplicada a la carga mediante un dispositivo electrónico.

La

Figura 19 muestra los esquemas de los distintos tipos de sistemas de pre-estiramiento.



**Figura 19 Tipos de sistemas de pre-estiramiento**

Fuente: (CONTROLPACK, 2013)

## 2.1.2 MATRIZ DE SELECCIÓN DE SOLUCIONES

Tabla 7 Selección de Sistemas de pre- estiramiento

|                                 | Facilidad de<br>instalación | Mantenimiento | Elongación<br>% | Costo | Control de<br>estiramiento | Total |
|---------------------------------|-----------------------------|---------------|-----------------|-------|----------------------------|-------|
| <b>Sistema mecánico</b>         | 8                           | 8             | 5               | 7     | 1                          | 29    |
| <b>Sistema electro mecánico</b> | 7                           | 8             | 6               | 7     | 7                          | 35    |
| <b>Sistema electromagnético</b> | 5                           | 5             | 8               | 6     | 7                          | 31    |
| <b>Sistema electrónico</b>      | 9                           | 9             | 8               | 8     | 9                          | 43    |

Calificaciones: 8 - 10 (muy bueno), 7 - 5 (regular), 4 – 2 (malo), 1 – 0 (no posee)

Al comparar las diferentes alternativas de pre estiramiento (Tabla 7) se puede concluir que el sistema electrónico con rodillos motorizados es la opción que se adapta a los requerimientos de diseño, ya que posee mayor porcentaje de elongación, además de poseer una gran controlabilidad y fácil instalación.

### **2.1.3 DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN ESCOGIDA**

La función principal de este sistema es proveer al rollo de película estirable un soporte para que pueda dispensar libremente el plástico a enfardar, el cual a su vez debe pasar a través de un par de rodillos motorizados para estirar la película de plástico y brindar una salida uniforme del mismo.

Los rodillos de pre estiramiento deben ser completamente lisos para que la película estirable circule libremente a través de estos, sin sufrir alteraciones y previniendo su rotura.

La opción más adecuada para este tipo de sistema es el uso de rodillos de impresoras y copiadoras (Figura 20), ya que sus tamaños oscilan entre las dimensiones de formatos de láminas (desde una altura de 210 mm para formatos A5 hasta alturas de 1189 para formatos A0), mientras que la altura de la película a emplear en este proyecto es de 250mm. Además poseen un recubrimiento de teflón industrial que los hacen ideales para realizar la tarea de pre estiramiento.

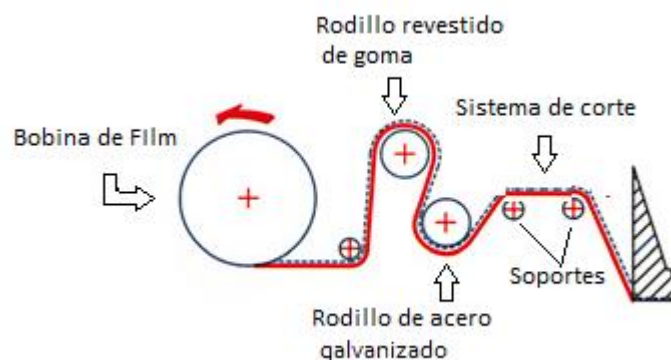


**Figura 20 Rodillo de copiadora**

Fuente: (PACKSYS ACADEMY, 2012)

El primer rodillo tendrá un recubrimiento de goma para brindar un soporte suave a la película plástica, permitiendo un reparto más uniforme del plástico sobre el rodillo y mejorando su calidad. El segundo rodillo, de acero galvanizado servirá como un sistema de alineamiento para que la película extensible tenga una salida tensa, continua y sin arrugas.

A la salida de este par de rodillos de alineamiento se coloca un par de soportes para que el operario pueda tomar fácilmente la película extensible y sujetar al palé, además entre este par de soportes se ubica el sistema de corte de la película extensible (Figura 21)



**Figura 21 Diagrama esquemático del sistema de pre-estiramiento**

Para poder controlar el porcentaje de estiramiento del film se requiere un motor sobre cada rodillo como se muestra en la Figura 22



**Figura 22 Conexión entre motores y rodillos**

Fuente: (CONTROLPACK, 2013)

### **Cálculo de motores para rodillos de pre estiramiento**

Datos:

|                   |   |         |
|-------------------|---|---------|
| Masa              | = | 0,66 kg |
| Diámetro exterior | = | 50 mm   |
| Diámetro interior | = | 30 mm   |
| Longitud          | = | 326 mm  |

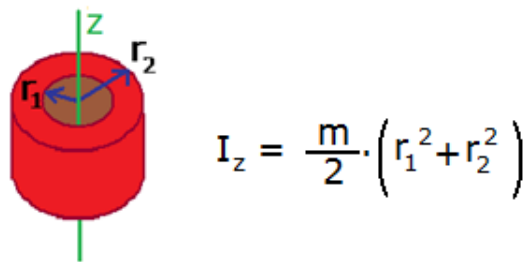
Primero se va a determinar el trabajo necesario para realizar un movimiento de rotación, mediante la relación existente entre el trabajo total realizado y la variación de la energía cinética (Ecuación 1)

$$T = \Delta E_c = \frac{1}{2} m v^2 + \frac{1}{2} I \omega^2 \quad \text{Ecuación 1}$$

Dónde:

|              |   |                               |
|--------------|---|-------------------------------|
| T            | = | trabajo                       |
| $\Delta E_c$ | = | variación de energía cinética |
| m            | = | masa                          |
| v            | = | velocidad lineal              |
| I            | = | momento de Inercia            |
| w            | = | velocidad angular             |

El momento de inercia de un cilindro hueco es:



**Figura 23 Momento de inercia de un cilindro hueco**

Fuente: (valvias, 2013)

Dónde:

$I_z$  = momento de Inercia respecto al eje z

m = masa

r1 = radio interior

r2 = radio exterior

$$I_z = \frac{0,66 \text{ kg}}{2} \cdot (15^2 + 25^2) \text{ mm}^2$$

$$I_z = 280,5 \text{ Kg. mm}^2 [2,805 \cdot 10^{-4} \text{ kg. m}^2]$$

La velocidad lineal de salida de la película estirable es igual a la velocidad de avance (20 – 50 m/min) Si se reemplaza la mayor velocidad en la ecuación 2 se tiene que:

$$w = \frac{v}{r} \quad \text{Ecuación 2}$$

$$w = \frac{50 \text{ m/min}}{0,025 \text{ m}}$$

$$w = 2000 \text{ rad/min}$$

$$w = 33.33 \frac{\text{rad}}{\text{s}} [318 \text{ rpm}]$$

Debido a que los rodillos permanecen estáticos, la velocidad lineal es cero, la ecuación 2.1 se escribe de la siguiente manera (Ecuación 3)

$$\Delta Ec = \frac{1}{2} I w^2 \quad \text{Ecuación 3}$$

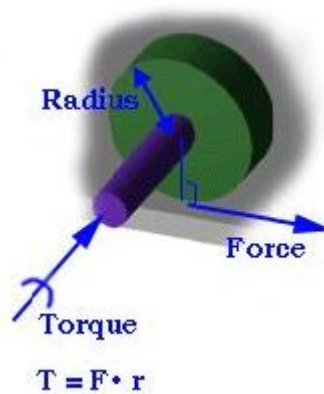
$$\Delta Ec = \frac{1}{2} \cdot 2,805 \cdot 10^{-4} \text{ kg. m}^2 * (33.3 \text{ rad/s})^2$$

$$\Delta Ec = 0,1558 \text{ N. m}$$

$$T = 0,1558 \text{ J}$$

La Figura 24 representa gráficamente el efecto del torque sobre un eje y permite deducir la fórmula necesaria para hallar la fuerza que requiere el motor para mover al eje (Ecuación 4)





**Figura 24 Representación del torque sobre un eje**

Fuente: (Center for innovation in product development, 2007)

$$F = \tau / r$$

**Ecuación 4**

$$F = \frac{0,1558 \text{ N.m}}{0,025 \text{ m}}$$

$$F = 6,23 \text{ N}$$

La ecuación 5 permite realizar el cálculo de la potencia del motor:

$$P = F * v = \tau * \omega$$

**Ecuación 5**

$$P = 6,23 \text{ N} * 50 \text{ m/min}$$

$$P = 5,19 \text{ W [0,007 HP]}$$

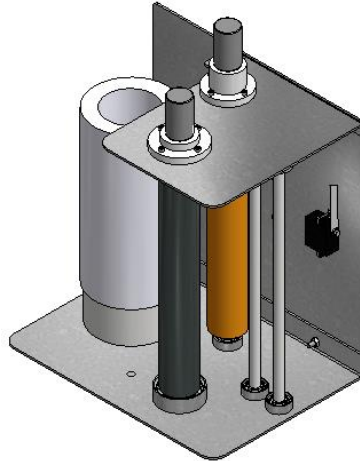
A continuación se realiza un resumen de la potencia, torque y velocidad que requieren los motores (Tabla 8).

**Tabla 8 Características técnicas de los motores de pre estiramiento**

|                  | <b>Motor 1</b>          | <b>Motor 2</b>          |
|------------------|-------------------------|-------------------------|
| <b>Potencia</b>  | 5,2 W [0,007Hp]         | 5,2 W [0,007Hp]         |
| <b>Torque</b>    | 1,58 kg.cm [0,1558 N.m] | 1,58 kg.cm [0,1558 N.m] |
| <b>Velocidad</b> | 33,33 rad/s [318 rpm]   | 33,33 rad/s [318 rpm]   |

Fuente: (pololu, 2013)

La Figura 25 muestra la visualización 3D con la disposición y conexión de los elementos del sistema de pre-estiramiento.

**Figura 25 Sistema de pre-estiramiento**

Una vez determinados todos los parámetros de funcionamiento del sistema de pre estiramiento y obtenido su peso total (20 kg), se puede avanzar hacia el diseño del sistema de elevación.

## **2.2 DISEÑO DEL SISTEMA DE ELEVACIÓN**

Una necesidad común en el diseño mecánico es mover componentes en línea recta. En la máquina enfardadora el sistema de elevación debe transportar verticalmente al sistema de pre estiramiento, para lo cual se va a definir qué sistema de actuación lineal es la mejor opción para realizar esta tarea.

### **2.2.1 TIPOS DE ACTUADORES LINEALES**

Muchos tipos de aparatos mecánicos producen movimiento lineal en máquinas; por ejemplo equipos de automatización, sistemas de empaque y máquinas de herramientas.

#### **2.2.1.1 Actuadores lineales**

Un actuador es un dispositivo capaz de convertir la energía eléctrica, hidráulica o neumática en la realización de un determinado proceso con el fin de generar un movimiento en un proceso automatizado. Ejerciendo, de este modo, funciones de control o de regulación.

Según la energía transformada, los actuadores pueden ser: electrónicos, neumáticos (simples posicionamientos), eléctricos o hidráulicos (cuando lo que se necesita es potencia). Siendo los tres últimos utilizados para el manejo de aparatos mecatrónicos.

Dentro de cada tipo de actuador lineal, se pueden estructurar en la siguiente clasificación:

- **Actuadores hidráulicos:** Motor hidráulico, cilindro hidráulico y motor hidráulico de oscilación.
- **Actuadores neumáticos:** De efecto simple, cilindro neumático, actuador neumático de efecto doble, con engranaje, motor neumático con veleta, con pistón, con una veleta a la vez, multi-veleta, motor rotatorio con pistón, de ranura vertical, de émbolo, fuelles, diafragma y músculo artificial.
- **Actuadores lineales eléctricos:** En esta línea existirán una amplia gama de modelos según los motores eléctricos utilizados, siendo necesario, en la mayoría de los casos, la utilización de reductores, debido a que los motores son de operación continua.
- **Actuador lineal electromecánico:** Ideales para realizar levantamientos, aperturas y cierres en cualquier tipo de industria.

Dentro de esta clasificación se opta por usar un actuador lineal electromecánico debido a que la utilización de actuadores neumáticos e hidráulicos implica la utilización de diversos componentes que complican la puesta a punto del sistema de elevación (mantenimiento y precisión) y tienen un alto coste.

#### **2.2.1.2 Actuador lineal electromecánico**

Los actuadores lineales electromecánicos, son una combinación de husillos a bolas o trapeciales con motores eléctricos, cuyo efecto es el

desplazamiento del vástago de un cilindro, con total control de la velocidad y posicionamiento.

Los tornillos de potencia y los tornillos de bolas son dos de los elementos con movimiento lineal más utilizados (Figura 26), están diseñados para convertir movimiento de rotación en movimiento lineal, y ejercer la fuerza necesaria para mover un elemento de máquina a lo largo de determinada trayectoria. Usan el principio de tornillo y tuerca.



**Figura 26 Actuator lineal electromecánico**

Fuente: (MAGZA, 2010)

### ***Ventajas***

- Fácil montaje en cualquier posición; horizontal, vertical o inclinada.
- Funcionamiento independiente y autónomo de otras instalaciones.
- El movimiento se efectúa a velocidad uniforme.
- Solamente consume energía mientras actúa.
- Funcionamiento silencioso.
- La fuerza de empuje y tracción es constante e igual en ambos sentidos.

- Insensible en gran medida a las variaciones de temperatura.
- No precisa mantenimiento durante largos períodos.
- Facilidad de realizar variaciones de velocidad y posicionamiento.

### **2.2.2 MATRIZ DE SELECCIÓN DE SOLUCIONES**

La primera decisión que se plantea es qué tipo de husillo se necesita, de bolas o de rosca trapecial. Los husillos a bolas se caracterizan por una alta eficiencia debido a su rodadura de bolas, la cual minimiza las mínimas pérdidas por fricción entre rosca y tornillo. En cambio, si la carga no es elevada y el factor de trabajo es bajo, es decir, el actuador funciona periódicamente con largas pausas, suele ser suficiente con un husillo trapecial. La Tabla 9 muestra una comparación entre el tornillo de potencia y el tornillo de bolas.

En conclusión el tornillo de potencia satisface las condiciones propuestas, además como la carga que se va a elevar no es elevada (20 Kg) el husillo trapezoidal es suficiente.

Tabla 9 Tabla comparativa

| Factor                          | Factor de ponderación | Tornillo de Potencia | Tornillo de bolas |
|---------------------------------|-----------------------|----------------------|-------------------|
| <i>Facilidad de instalación</i> | 0,2                   | 7<br>0,14            | 8<br>0,16         |
| <i>Menor fricción</i>           | 0,15                  | 5<br>0,075           | 9<br>0,135        |
| <i>Menor Mantenimiento</i>      | 0,2                   | 8<br>0,16            | 9<br>0,18         |
| <i>Menor Costo</i>              | 0,45                  | 8<br>0,36            | 6<br>0,27         |
| <b>Total</b>                    | 1                     | 0,735                | 0,475             |

### 2.2.3 DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN ESCOGIDA

A continuación se detalla el procedimiento y fórmulas utilizadas para el diseño del tornillo de potencia.

#### 2.2.3.1 TORNILLO DE POTENCIA

Los tornillos de potencia, llamados también tornillos de transmisión, son dispositivos mecánicos que convierten un giro o desplazamiento angular en un desplazamiento rectilíneo, transmitiendo fuerza y potencia mecánica (Tabla 10)

**Tabla 10 Características del tornillo de potencia**

---

**Usos:**

Gatos, prensas de tornillo, transmisión de carga elevadas, tornos, instrumentos de medida y en general máquinas de herramientas.

**Ventajas:**

Sencillez de su estructura, alta relación de transmisión, auto frenado, auto bloqueo, posibilidad de fabricación con gran exactitud del paso.

**Inconvenientes:**

Rozamiento relativamente alto con el consiguiente desgaste y bajo coeficiente de rendimiento.

---

Fuente: (Mott, 2006).

**Materiales**

El tornillo debe construirse de un acero resistente al desgaste con buenas características de maquinado y tratado térmicamente.

Las tuercas se fabrican de bronce al estaño, así como de fundición de antifricción. Para ahorrar bronce las tuercas también pueden fabricarse bimetálicas esto es fundición o acero revestido de bronce.

La altura de la tuerca está generalmente entre 1,2 y 2,5 veces el diámetro medio del tornillo ( $H = 1,2 - 2,5 \text{ dm}$ ). (Mott, 2006)

• **Aceros al carbón o aleados:**

AISI 1018, 1045, 1060, 4130, 4140, 4340, 4620, 6150, 8620, entre otros.



- **Aceros inoxidables para ambientes corrosivos o cuando existan altas temperaturas:**

AISI 304, 305, 316, 384, 430, 431, 440.

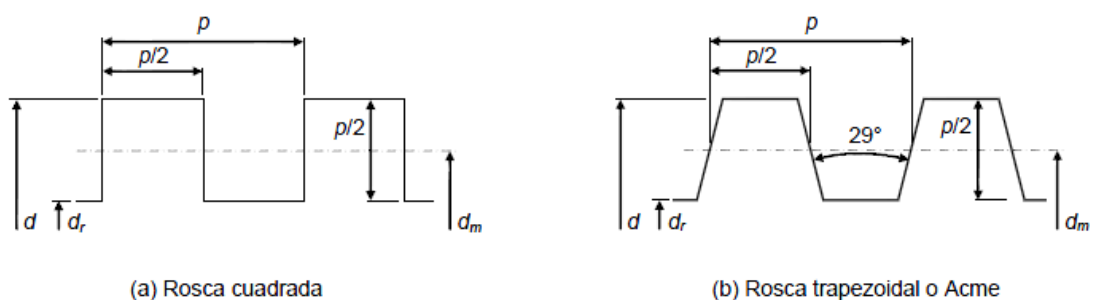
- **Aleaciones de Aluminio:**

1100, 2014, 3003.

### Comparación de rosca trapecial (ACME) vs rosca rectangular (cuadrada).

La rosca rectangular pese a que tiene un menor rozamiento que la trapecial no está estandarizada y casi no se usa. La rosca trapecial es fácil de maquinar que la rectangular (Figura 27). Además la rosca trapecial es más resistente que la rectangular.

El juego axial de la rosca trapecial se puede regular, tensando la tuerca partida lo que no es posible con la rosca rectangular.

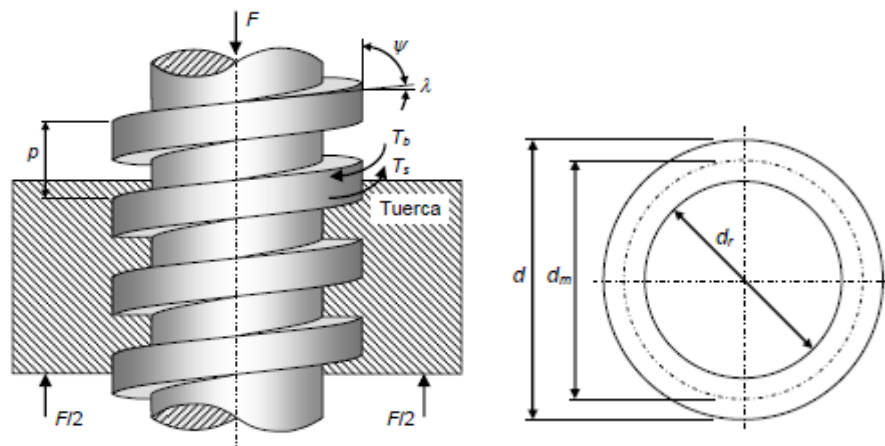


**Figura 27 Tipos de roscas**

Fuente: (USECHE, 2013)

## Características principales

La Figura 28 muestra los principales parámetros presentes en el diseño de un tornillo de potencia.



**Figura 28 Parámetros del tornillo de potencia**

Fuente: (USECHE, 2013)

Donde,

- $p$ : paso
- $d$ : diámetro mayor
- $d_r$ : diámetro menor
- $d_m$ : diámetro medio
- $\lambda$ : ángulo de avance
- $\psi$ : ángulo de hélice
- $F$ : fuerza axial de compresión
- $T_s$ : par requerido para subir
- $T_b$ : par requerido para bajar

## **DISEÑO DEL TORNILLO DE POTENCIA:**

Como no existe un procedimiento unificado para el diseño de este tipo de transmisión mecánica, este estudio se basa en diferentes teorías de diseño para obtener un resultado que cubra los requerimientos, sea práctico, eficiente y fácil de construir.

Para el diseño de este elemento se toma en cuenta que el tornillo de potencia está sometido a esfuerzos de: flexión, torsión, compresión y tracción, que además sufre desgaste superficial en los filetes de la rosca.

### ***Parámetros de diseño:***

- Peso a elevar: 20 kg (44 lb)
- Altura de la torre: 1500 mm
- Velocidad vertical: 1 - 4 m/min
- Tiempo de elevación: 22,5 – 90 s
- Material: acero AISI 1018 HR
- Resistencia a la tensión: 400 MPa (58 Kpsi)
- Resistencia a la fluencia: 220 MPa (32 Kpsi)

### **Cálculos para el dimensionamiento del tornillo de potencia:**

Un aspecto fundamental para el diseño del tornillo de potencia es su longitud, ya que si es superior a 8 veces su diámetro es necesario considerar el efecto de pandeo y se diseña como si el tornillo fuese una columna.

La carga a la cual va a estar sometido es de 20 kgf, *el diámetro de la columna será el diámetro de raíz del tornillo*, que se calcula por medio de la fórmula de Euler (Ecuación 6), y sus características se muestra en Figura 29.

$$\mathbf{n * \frac{P}{A} \leq \frac{C * \pi^2 * E}{(Sr)^2}} \quad \text{Ecuación 6}$$

*Dónde:*

|         |   |                                       |   |   |
|---------|---|---------------------------------------|---|---|
| $n$     | = | <i>coeficiente de seguridad</i>       | = | 6                                       |
| $P$     | = | <i>carga a elevar</i>                 | = | 20 kg                                   |
| $n * P$ | = | <i>carga crítica</i>                  | = | 120 kg                                  |
| $C$     | = | <i>condición en los extremos</i>      | = | 1,2                                     |
| $E$     | = | <i>módulo elástico</i>                | = | 2100000 $\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$ |
| $A$     | = | <i>área de la sección transversal</i> | = | $\frac{\pi * dr^2}{4}$                  |
| $Sr$    | = | <i>razón de esbeltez</i>              | = | $\frac{l}{k}$                           |
| $l$     | = | <i>largo de la columna</i>            | = | 1500 mm                                 |
| $k$     | = | <i>radio de giro</i>                  | = | $\sqrt{\frac{I}{A}} = \frac{dr}{4}$     |

$$6 * \frac{20}{\frac{\pi * dr^2}{4}} \leq \frac{1,2 * \pi^2 * 2100000}{\left(\frac{150}{4}\right)^2}$$

$$dr \geq 2,21 \text{ cm } (dr \geq 0,87 \text{ plg})$$

El valor calculado debe ser mayor que 0,87 plg, sin embargo debe aproximarse a un valor estandarizado que en este caso es de 0,9998 plg (Tabla 17-1 Mott).

Para comprobar que se trata de una columna de Euler debe cumplirse la condición descrita en la ecuación 7

$$Sr \geq \left(\frac{l}{k}\right)_I \quad \text{Ecuación 7}$$

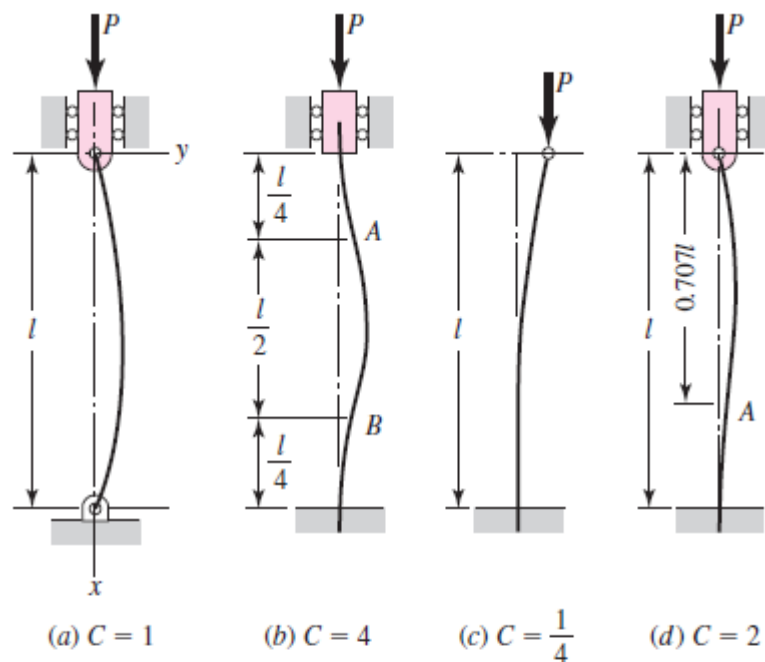
La ecuación 8 representa la condición de la ecuación 7 cuando se reemplaza sus términos.

$$\frac{l}{k} \geq \sqrt{\frac{2\pi^2 * C * E}{S_y}} \quad \text{Ecuación 8}$$

$$\frac{1500}{\frac{2,21}{4}} \geq \sqrt{\frac{2\pi^2 * 1,2 * 207 \text{ GPa}}{220 \text{ MPa}}}$$

$$236,27 \geq 149,29$$

Se cumple que  $Sr \geq \left(\frac{l}{k}\right)_I$ , entonces se comprueba que es una columna de Euler y no va a fallar por pandeo.



| <b>End-Condition Constant C</b> |                          |                           |                           |
|---------------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|
| <b>Column End Conditions</b>    | <b>Theoretical Value</b> | <b>Conservative Value</b> | <b>Recommended Value*</b> |
| Fixed-free                      | $\frac{1}{4}$            | $\frac{1}{4}$             | $\frac{1}{4}$             |
| Rounded-rounded                 | 1                        | 1                         | 1                         |
| Fixed-rounded                   | 2                        | 1                         | 1.2                       |
| Fixed-fixed                     | 4                        | 1                         | 1.2                       |

**Figura 29 Constantes de condiciones finales de las columnas de Euler**

Fuente: (Joseph E Shigley, 2008)

A partir del valor del diámetro menor estándar se obtiene los demás parámetros necesarios para definir completamente el tornillo de potencia (Figura 30).

| Diámetro mayor nominal, $D$ (pulg) | Roscas por pulg., $n$ | Paso, $p = 1/n$ (pulg) | Diámetro menor mínimo, $D_r$ (pulg) | Diámetro mínimo de paso, $D_p$ (pulg) | Área al esfuerzo de tensión, $A_t$ (pulg <sup>2</sup> ) | Área al esfuerzo cortante, $A_s$ (pulg <sup>2</sup> ) <sup>a</sup> |
|------------------------------------|-----------------------|------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|---|--|
| 1/4                                | 16                    | 0.0625                 | 0.1618                              | 0.2043                                | 0.026 32  | 0.3355   |
| 5/16                               | 14                    | 0.0714                 | 0.2140                              | 0.2614                                | 0.044 38  | 0.4344   |
| 3/8                                | 12                    | 0.0833                 | 0.2632                              | 0.3161                                | 0.065 89  | 0.5276   |
| 7/16                               | 12                    | 0.0833                 | 0.3253                              | 0.3783                                | 0.097 20  | 0.6396   |
| 1/2                                | 10                    | 0.1000                 | 0.3594                              | 0.4306                                | 0.1225  | 0.7278   |
| 5/8                                | 8                     | 0.1250                 | 0.4570                              | 0.5408                                | 0.1955  | 0.9180   |
| 3/4                                | 6                     | 0.1667                 | 0.5371                              | 0.6424                                | 0.2732  | 1.084  |
| 7/8                                | 6                     | 0.1667                 | 0.6615                              | 0.7663                                | 0.4003  | 1.313  |
| 1                                  | 5                     | 0.2000                 | 0.7509                              | 0.8726                                | 0.5175  | 1.493  |
| 1 1/8                              | 5                     | 0.2000                 | 0.8753                              | 0.9967                                | 0.6881  | 1.722  |
| 1 1/4                              | 5                     | 0.2000                 | 0.9998                              | 1.1210                                | 0.8831  | 1.952  |
| 1 1/2                              | 4                     | 0.2500                 | 1.0719                              | 1.2188                                | 1.030   | 2.110  |
| 1 3/4                              | 4                     | 0.2500                 | 1.1965                              | 1.3429                                | 1.266   | 2.341  |
| 1 3/4                              | 4                     | 0.2500                 | 1.4456                              | 1.5916                                | 1.811   | 2.803  |
| 2                                  | 4                     | 0.2500                 | 1.6948                              | 1.8402                                | 2.454   | 3.262  |

**Figura 30 Diámetro nominal y paso del tornillo de potencia**

Fuente: (Mott, 2006)

|       |   |                |            |             |
|-------|---|----------------|------------|-------------|
| $p$   | = | paso           | 0,2 plg    | (5,08 mm)   |
| $d$   | = | diámetro mayor | 1,25 plg   | (31,75 mm)  |
| $d_r$ | = | diámetro menor | 0,9998 plg | (25,395 mm) |
| $d_m$ | = | diámetro medio | 1,121 plg  | (28,473 mm) |

El ángulo de avance ( $\lambda$ ) se calcula mediante la ecuación 9:

$$\tan \lambda = \frac{p}{\pi \cdot d_m} \quad \text{Ecuación 9}$$

$$\tan \lambda = \frac{0,2}{\pi \cdot 1,121}$$

$$\lambda = 3,25^\circ$$

### **Diseño de la tuerca**

El diseño de la tuerca debe contemplar la longitud de la misma, debido a que ésta tiende a incidir en las magnitudes de los esfuerzos cortantes, por flexión y por aplastamiento en los filetes

Las tuercas de rosca trapezoidales están diseñadas bajo la norma DIN-103 para husillos y tuercas. (Figura 31).

La altura de la tuerca está generalmente entre 1,2 y 2,5 veces el diámetro medio del tornillo (Mott, 2006) En este caso se dispone de dos tuercas, razón por la cual se selecciona una altura de 1,25 veces el diámetro medio del tornillo.

La longitud de la tuerca se calcula mediante la ecuación 10

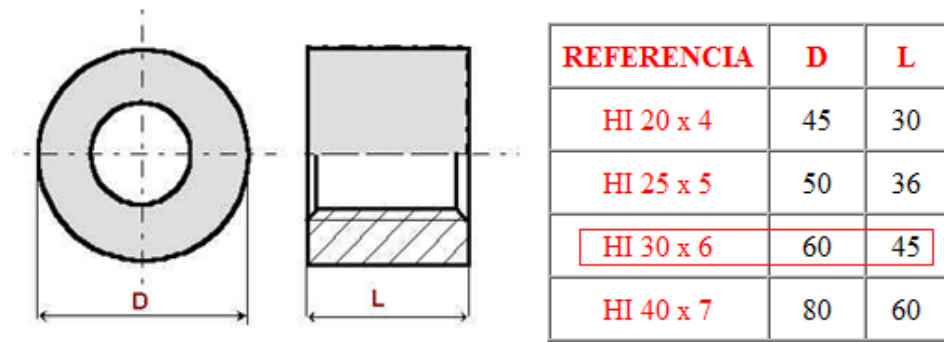
$$L = 1,25 * Dm \quad \text{Ecuación 10}$$

$$L = 1,25 * 28,47$$

$$L = 35,4 \text{ mm}$$

Para determinar el diámetro de la tuerca se usa el factor obtenido de la norma DIN-103 para husillos y tuercas. Esta relación se expresa en la ecuación 11





**Figura 31 Dimensiones de tuercas de rosca trapezoidal**

Fuente: (BAIZ, S.L., 2013)

$$D = 1,33 * L$$

**Ecuación 11**

$$D = 1,33 * 35,4$$

$$D = 47,2 \text{ mm}$$

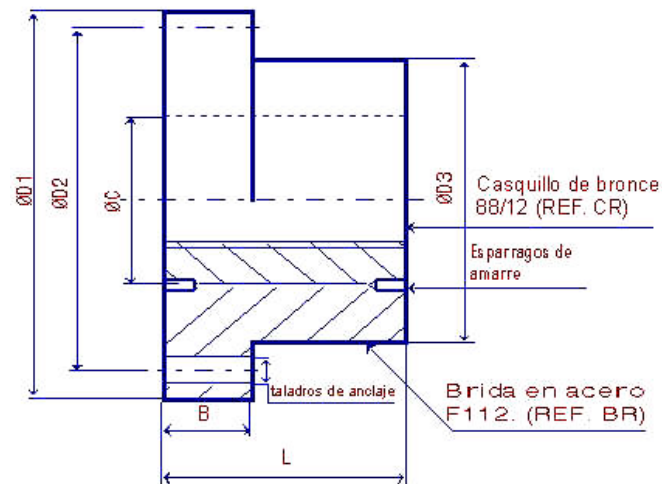
Para obtener menor rozamiento se usa una tuerca interna de bronce y en la parte externa una brida de acero. (Figura 32).



**Figura 32 Tuerca de bronce y brida de acero**

Fuente: (BAIZ, S.L., 2013)

Para tuercas con brida de fijación (Figura 32), se usan las siguientes dimensiones (Figura 33):



**Figura 33 Dimensiones tuerca (brida)**

Fuente: (BAIZ, S.L., 2013)

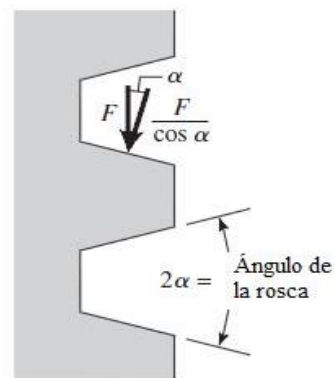
| REFERENCIA<br>(CR/BR) | D1  | D2  | D3  | L  | B  | C  | TALADROS<br>ANCLAJE |
|-----------------------|-----|-----|-----|----|----|----|---------------------|
| CR/BR 15 x 3          | 60  | 50  | 38  | 25 | 10 | 25 | 3 x M-6             |
| CR/BR 20 x 4          | 70  | 55  | 42  | 30 | 12 | 30 | 4 x M-6             |
| CR/BR 25 x 5          | 80  | 65  | 52  | 37 | 12 | 35 | 4 x M-6             |
| CR/BR 30 x 6          | 100 | 82  | 65  | 45 | 16 | 45 | 4 x M-8             |
| CR/BR 40 x 7          | 110 | 93  | 75  | 60 | 16 | 55 | 6 x M-8             |
| CR/BR 50 x 8          | 135 | 113 | 90  | 75 | 18 | 65 | 6 x M-10            |
| CR/BR 60 x 9          | 155 | 129 | 105 | 90 | 22 | 75 | 6 x M-12            |

**Figura 34 Dimensiones de la brida de acero**

Fuente: (BAIZ, S.L., 2013)

**Cálculo del par requerido para elevar y bajar la carga:**

Debido a que se trata de una rosca trapecial (ACME), la carga normal está inclinada hacia el eje por el ángulo de la rosca  $2\alpha$ , razón por la cual al momento de realizar los cálculos se debe considerar este ángulo, dividiendo la fuerza por el coseno de dicho ángulo.



**Figura 35 Fuerza normal en la rosca**

Fuente: (Joseph E Shigley, 2008)

- **Para elevar la carga:**

El par torsional requerido para mover una carga hacia arriba se calcula mediante la ecuación 12 (Joseph E Shigley, 2008):

$$T_{up} = \frac{F \cdot d_m}{2} \left( \frac{p + \pi f d_m \sec \alpha}{\pi d_m - f p \sec \alpha} \right) \quad \text{Ecuación 12}$$

Dónde:

$T_{up}$  = torque de subida

$F$  = peso a mover

$dm =$  diámetro medio del tornillo

$p =$  paso diametral

$f =$  coeficiente de fricción

$\alpha =$  ángulo de avance

$$T_{up} = \frac{44 * 1,121}{2} \left( \frac{0,2 + \pi * 0,15 * 1,121 * \sec 14,5}{\pi * 1,121 - 0,15 * 0,2 * \sec 14,5} \right)$$

$$T_{up} = 5,144 \text{ lbf. plg } (0,582 \text{ N. m})$$

- **Para bajar la carga:**

El torque para bajar la carga  $T_{down}$ , se calcula mediante la ecuación 13

$$T_{down} = \frac{F * dm}{2} \left( \frac{\pi f dm \sec \alpha - p}{\pi dm + f p \sec \alpha} \right) \quad \text{Ecuación 13}$$

$$T_{down} = \frac{44 * 1,121}{2} \left( \frac{\pi * 0,15 * 1,121 * \sec 14,5 - 0,2}{\pi * 1,121 + 0,15 * 0,2 * \sec 14,5} \right)$$

$$T_{down} = 2,279 \text{ lbf. plg } (0,258 \text{ N. m})$$

Debido a que el torque necesario para bajar la carga es positivo, el tornillo es auto-bloqueante.

**Criterio de auto-bloqueo:**

Para que exista auto-bloqueo, es decir que la carga no descienda sin la acción del motor, se debe cumplir la siguiente relación de la ecuación 14

$$\pi * f * dm > p \quad \text{Ecuación 14}$$

Donde  $f$  representa el coeficiente de fricción de la rosca.  $f = 0,15$  es un valor conservador (Joseph E Shigley, 2008).

$$\pi * 0,15 * 1,121 > 0,2$$

$$0,528 > 0,2$$

Cumple, por tanto el tornillo es auto-bloqueante.

***Eficiencia del tornillo:***

Es la relación entre el trabajo de salida y el de entrada, está dada por la ecuación 15 (Joseph E Shigley, 2008):

$$e = \frac{F * p}{2\pi * T * u} \quad \text{Ecuación 15}$$

$$e = \frac{44 * 0,2}{2\pi * 5,144}$$

$$e = 27,23 \%$$

***Potencia requerida para impulsar el tornillo de potencia:***

Para determinar la potencia necesaria para impulsar el tornillo es necesario primero conocer la velocidad a la cual está rotando.

Como se conoce la velocidad lineal a la cual se desea que la carga se desplace se puede obtener la velocidad de rotación:

- *Altura de la torre: 1500 mm*

- *Velocidad vertical: 1 - 4 m/min (0,65 – 2,62 plg/s)*
- *Tiempo de elevación: 22,5 – 90 s*

Se va a trabajar con una velocidad promedio de 1,64 *plg/s*, así calculamos la velocidad de rotación como se muestra a continuación (Mott, 2006):

$$n = v/p \quad \text{Ecuación 16}$$

*Dónde:*

$n$  = velocidad de giro (rpm)

$v$  = velocidad lineal (*plg/s*)

$p$  = paso diametral (*plg*)

$$n = 1,64 \frac{plg}{s} \cdot \frac{1 rev}{0,2 plg} \cdot \frac{60 s}{1 min}$$

$$n = 492 rpm \left[ 51,52 \frac{rad}{s} \right]$$

Si se trabaja con todo el rango de velocidad lineal se obtiene un rango de velocidad rotacional entre:

$$n = [200 - 800] rpm, \quad [20 - 80] \frac{rad}{s}$$

Para el cálculo de la potencia se emplea la ecuación 17

$$P = \frac{T_{up} * n}{63000} \quad \text{Ecuación 17}$$

$$P = \frac{5,144 * 800}{63000}$$

$$P = 0,065 \text{ HP} = 50 \text{ W}$$

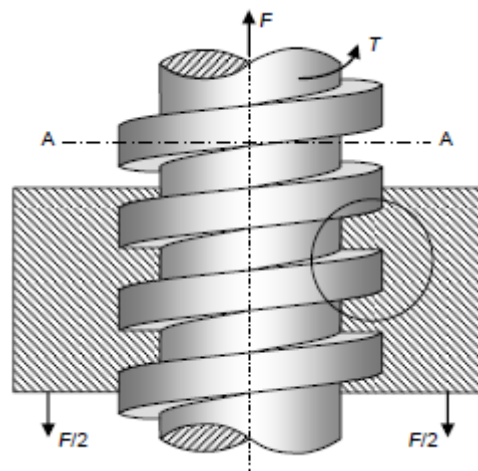
Con lo cual se determina que la potencia máxima a consumir es de 50 Watts.

La Tabla 11 muestra la potencia, torque y velocidad que requiere el motor para subir y bajar el sistema de pre estiramiento

**Tabla 11 Características técnicas del motor de elevación**

| Motor            |                     |
|------------------|---------------------|
| <b>Potencia</b>  | 50 W [0,065 Hp]     |
| <b>Torque</b>    | 6 kg.cm [0,582 N.m] |
| <b>Velocidad</b> | 80 rad/s [800rpm]   |

### Consideraciones de esfuerzo para el diseño del tornillo de potencia



**Figura 36 Diagrama de cuerpo libre del tornillo de potencia**

Fuente: (USECHE, 2013)

Debido a la complejidad geométrica y a la forma en que se transmiten las cargas en los tornillos de potencia, éstos están expuestos a diferentes tipos de fallas:

- El núcleo está sometido a una combinación de carga axial y torsión.
- Los filetes del tornillo y de la tuerca pueden fallar por cortante o por flexión.
- Los flancos de los filetes están sometidos a aplastamiento, el cual puede producir deformación plástica.

Los esfuerzos nominales en el cuerpo de los tornillos de potencia pueden relacionarse con los parámetros de la rosca de la siguiente forma:

### **Esfuerzo de tracción/compresión ( $\sigma_{t/c}$ )**

Los tornillos de potencia están sometidos a esfuerzos de tracción y compresión, el área utilizada para el cálculo del esfuerzo se muestra en la ecuación 18 (USECHE, 2013):

$$A = \frac{\pi}{4} \left( \frac{dm+dr}{2} \right)^2 \quad \text{Ecuación 18}$$

$$A = \frac{\pi}{4} \left( \frac{1,25 + 0,9998}{2} \right)^2$$

$$A = 0,8831 \text{ plg}^2$$

El esfuerzo se calcula mediante la ecuación 19 (Joseph E Shigley, 2008):

$$\sigma_{t/c} = \frac{F}{A} \quad \text{Ecuación 19}$$



$$\sigma_{t/c} = \frac{44}{0.8831}$$

$$\sigma_{t/c} = 49,82 \text{ psi (343,26 KPa)}$$

### **Esfuerzo cortante debido a la torsión ( $\tau$ )**

El esfuerzo cortante nominal en torsión del cuerpo del tornillo se expresa como se detalla en la ecuación 20 (Joseph E Shigley, 2008):

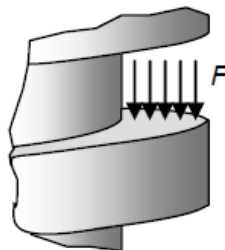
$$\tau = \frac{16 * T * u_p}{\pi * d r^3} \quad \text{Ecuación 20}$$

$$\tau = \frac{16 * 5,144}{\pi * 0,9998^3}$$

$$\tau = 26,214 \text{ psi (180,614 kPa)}$$

### **Presión por aplastamiento ( $\sigma_b$ )**

Es el esfuerzo que se tiene entre la superficie de la rosca del tornillo y la superficie de contacto de la tuerca. (Figura 37)



**Figura 37 Esfuerzo de aplastamiento entre tuerca y tornillo**

Fuente: (USECHE, 2013)

El esfuerzo por aplastamiento viene dado por la ecuación 21

$$\sigma_b = \frac{2 * 0,38F}{\pi * dm * n * p} \quad \text{Ecuación 21}$$

Dónde:

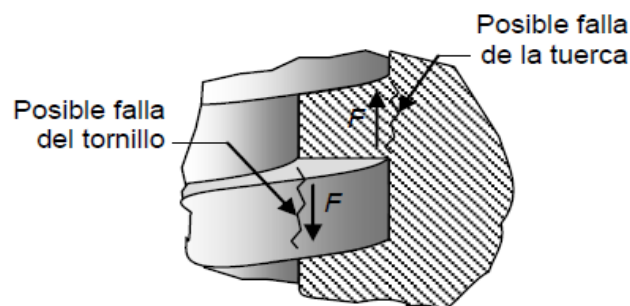
$n$  es el número de roscas en contacto ( $n=1$ ), además se usa el factor de 0,38 multiplicado por la carga para obtener el nivel máximo de esfuerzos en la combinación rosca-tuerca (Joseph E Shigley, 2008).

$$\sigma_b = \frac{2 * 0,38 * 44}{\pi * 1,121 * 1 * 0,2}$$

$$\sigma_b = 47,47 \text{ psi (327,068 kPa)}$$

### Cortante en los filetes ( $\tau_b$ )

Los filetes del tornillo y de la tuerca pueden fallar por cortante, produciéndose el barrido de estos (Figura 38). El esfuerzo cortante máximo es 1.5 veces el esfuerzo promedio (Joseph E Shigley, 2008):



**Figura 38** Falla producida por una fuerza cortante

Fuente: (USECHE, 2013)

El esfuerzo cortante en los filetes se calcula mediante la ecuación 22

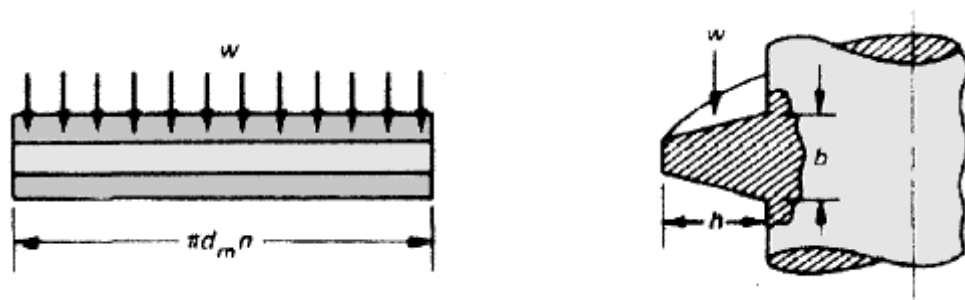
$$\tau_b = \frac{3}{2} \frac{F}{\pi * d_m * n * p} \quad \text{Ecuación 22}$$

$$\tau_b = \frac{3}{2} \frac{44}{\pi * 1,121 * 2 * 0,2}$$

$$\tau_b = 46,852 \text{ psi (322,81 kpa)}$$

### Flexión en los filetes ( $\sigma_{flex}$ )

La flexión del tornillo se obtiene considerando al filete de la rosca como una viga en voladizo (Figura 39).



**Figura 39 Representación de la flexión en los filetes**

Fuente: (Mott, 2006)

Dónde el momento flector máximo se calcula mediante la ecuación 23 (Joseph E Shigley, 2008):

$$M_{max} = \frac{F * p}{4} \quad \text{Ecuación 23}$$

$$M_{max} = \frac{44 * 0,2}{4}$$

$$M_{max} = 2,2 \text{ lbf} * plg (0,25 \text{ N.m})$$

La ecuación 24 muestra la fórmula para determinar el esfuerzo de flexión máximo (Joseph E Shigley, 2008):

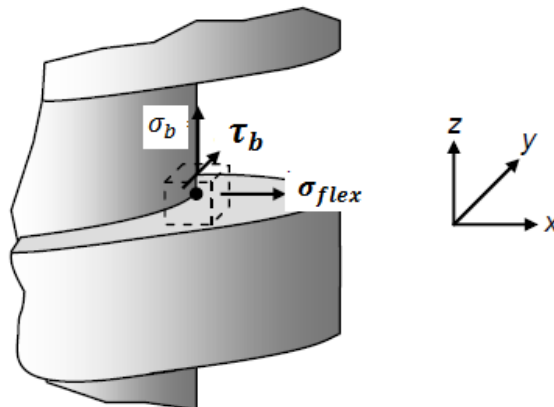
$$\sigma_{flex} = \frac{6 * F}{\pi * dm * n * p} \quad \text{Ecuación 24}$$

$$\sigma_{flex} = \frac{6 * 44}{\pi * 1,121 * 2 * 0,2}$$

$$\sigma_{flex} = 187,41 \text{ psi} (1,2912 \text{ MPa})$$

### Teorías de fallas

Debido a que se trata de un material dúctil en el cual la resistencia a la fluencia tanto en tracción como en compresión son iguales se puede usar la teoría de energía de distorsión o la de cortante máximo.



**Figura 40 Representación de esfuerzos en la raíz de la rosca**

Fuente: (USECHE, 2013)

De acuerdo al sistema de ejes mostrado en la Figura 40, se tiene que los esfuerzos bidimensionales son:

$$\begin{aligned}\sigma_x = \sigma_{flex} &= 187,41 \text{ psi} & \tau_{xy} &= 0 \\ \sigma_y &= 0 & \tau_{yz} = \tau_b &= 26,214 \text{ psi} \\ \sigma_z = \sigma_b &= -49,82 \text{ psi} & \tau_{zx} &= 0\end{aligned}$$

Luego, se determina los esfuerzos principales mediante la ecuación 25:

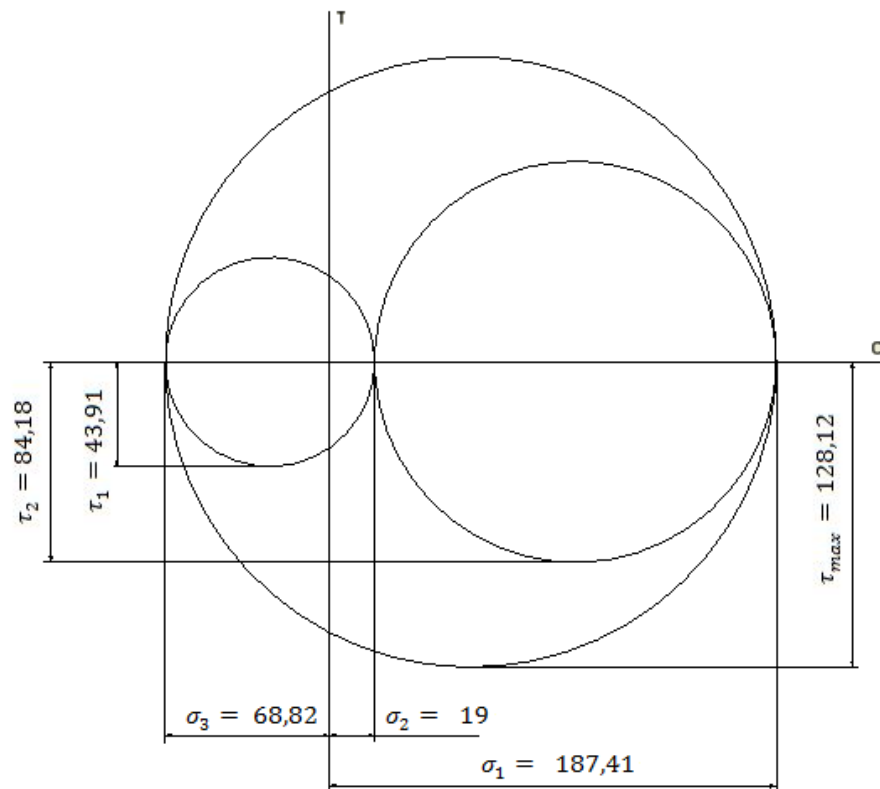
$$\sigma_2, \sigma_3 = \frac{\sigma_y + \sigma_z}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_y - \sigma_z}{2}\right)^2 + \tau_{yz}^2} \quad \text{Ecuación 25}$$

$$\sigma_2, \sigma_3 = \frac{0 - 49,82}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{0 - (-49,82)}{2}\right)^2 + 26,214^2}$$

$$\sigma_2, \sigma_3 = -24,91 \pm 43,91$$

**Esfuerzos principales:**

- $\sigma_1 = 187,41 \text{ psi}$
- $\sigma_2 = 19 \text{ psi}$
- $\sigma_3 = -68,82 \text{ psi}$



**Figura 41 Círculo de Mohr**

**Teoría de la Energía de distorsión:**

La ecuación correspondiente a la teoría de la energía de distorsión se muestra en la ecuación 26

$$\sigma' = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{yz}^2)} \quad \text{Ecuación 26}$$

$$\sigma' = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(187,41)^2 + (49,82)^2 + (-49,82 - 187,41)^2 + 6(26,214^2)}$$

$$\sigma' = 221,366 \text{ psi [1,5252 MPa]}$$

La ecuación 27 describe la fórmula para realizar el diseño en función de la fluencia:

$$\sigma' = \frac{S_y}{n} \quad \text{Ecuación 27}$$

Dónde:

- $n$  = factor de seguridad
- $S_y$  = resistencia a la fluencia
- $\sigma'$  = esfuerzo de Von Mises
- $\tau_{yz}$  = esfuerzo cortante en el plano  $y-z$

$$n = \frac{S_y}{\sigma'} = \frac{220 \text{ MPa}}{1,52 \text{ MPa}} = 144,24$$

La resistencia a la fluencia cortante determinada por la teoría de la energía de la distorsión está dada por la ecuación 28 (Joseph E Shigley, 2008):

$$\tau_{yz} = 0,577 S_y \quad \text{Ecuación 28}$$

$$\tau_{yz} = 126,94 \text{ MPa}$$

### Teoría del cortante máximo:

Primero se debe determinar el esfuerzo cortante máximo mediante la ecuación 2.29

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad \text{Ecuación 29}$$

$$\tau_{max} = \frac{187,41 - (-68,82)}{2}$$

$$\tau_{max} = 128,115 \text{ psi } [0,8827 \text{ MPa}]$$

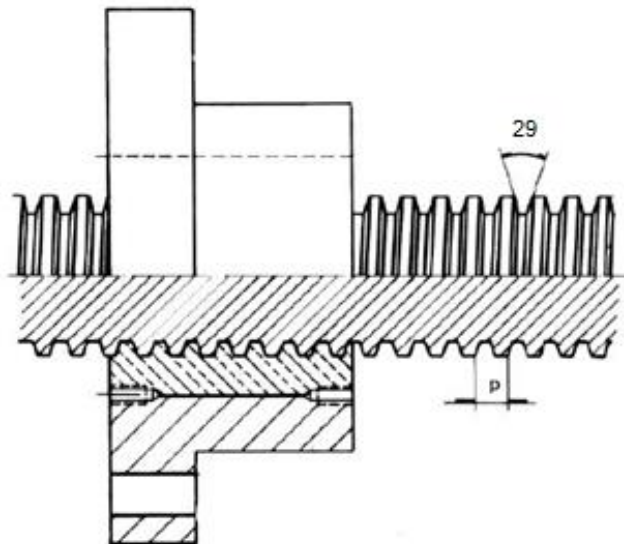
Luego se aplica la ecuación 30 para hallar el factor de seguridad mediante la teoría del cortante máximo

$$\tau_{max} = \frac{S_y}{2n} \quad \text{Ecuación 30}$$

$$n = \frac{S_y}{2 * \tau_{max}} = \frac{220 \text{ MPa}}{2 * 0,88 \text{ MPa}} = 125,25$$

### Acople sistema de elevación - sistema de pre estiramiento

Para que el sistema pueda subir y bajar la carga (sistema de pre estiramiento), es necesario el diseño de un acople entre la tuerca y la carga. Las tuercas de rosca trapezoidales están diseñadas bajo la norma DIN-103 para husillos y tuercas. (Figura 42)



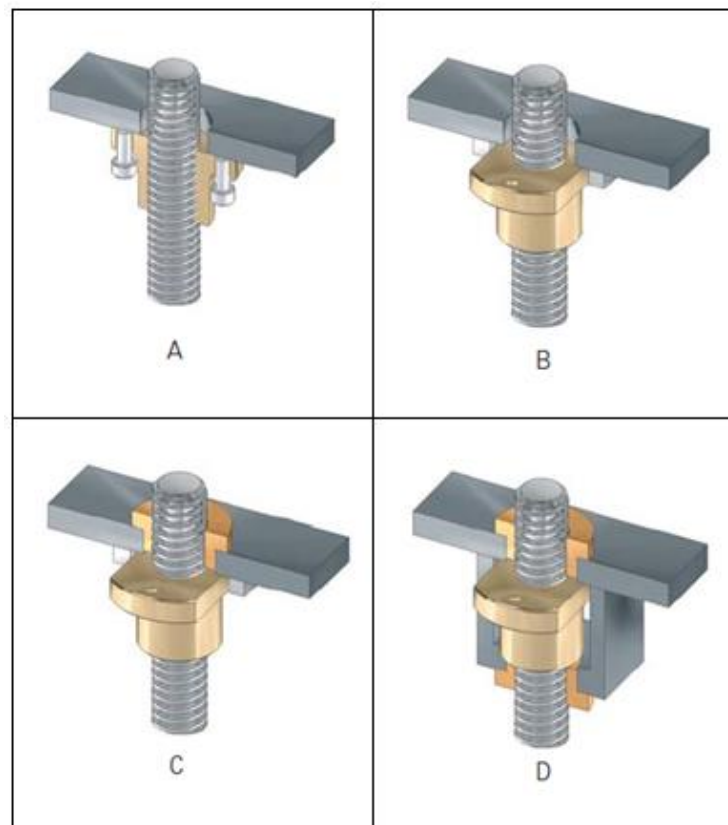
**Figura 42 Conexión tuerca-brida-tornillo**

Fuente: (BAIZ, S.L., 2013)



Para obtener menor rozamiento se usa una tuerca interna de bronce y en la parte externa una brida de acero (BAIZ, S.L., 2013).

Para un correcto funcionamiento del husillo con rosca trapezoidal es necesario tomar medidas para mantener alineados el husillo y la tuerca. Las guías pueden ser externas o incluir directamente la estructura de la tuerca, como se puede observar en los siguientes gráficos (Figura 43).



**Figura 43 Diseños para eliminar el juego lateral**

Fuente: (unimec, 2012)

**Diseño A:** La tuerca está vinculada a la carga con tornillos especiales que le permiten adaptarse en cada momento a la posición del husillo. Las guías se deben realizar en la parte externa.

**Diseño B:** La tuerca, está vinculada a la carga con mordazas que garantizan la no rotación de la misma. Las guías se deben realizar en la parte externa.

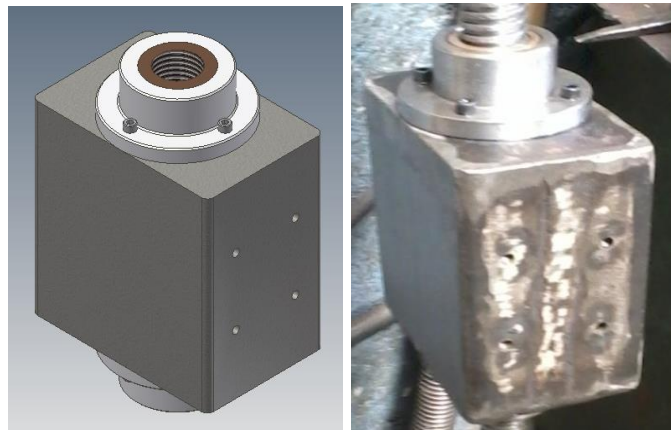
**Diseño C:** El casquillo superior le provee de una guía.

**Diseño D:** El doble casquillo de guía garantiza una fiabilidad en el guiado superior al sistema C.

Mediante estos diseños el husillo rota reduciendo al mínimo las oscilaciones ocasionadas por errores de concentricidad.

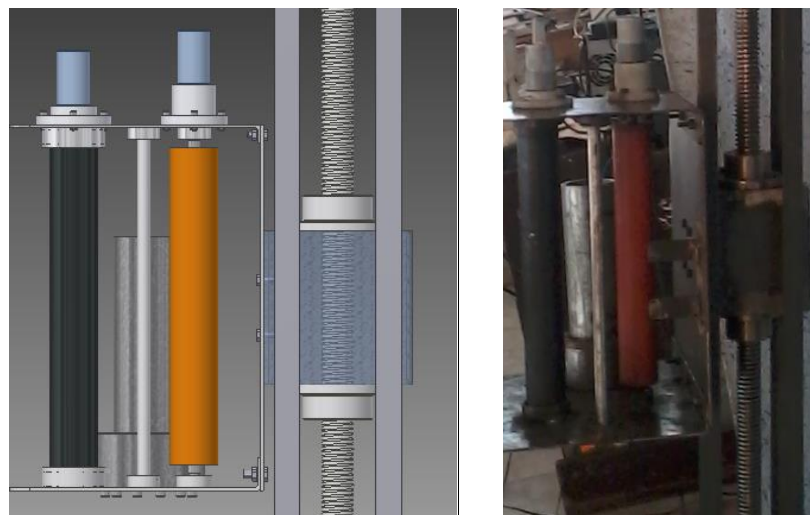
Para evitar el uso de casquillos y mordazas se opta por una unión emperrada como en el diseño A.

Ahora, para asegurar el agarre entre el sistema de elevación y el sistema de pre estiramiento se opta por usar dos tuercas, una en la parte superior del acople y una en la parte inferior, obteniendo una estructura más sólida y segura. Se tiene un sistema como el que se muestra en la Figura 44, donde la brida sirve de soporte para el acople que une los sistemas.



**Figura 44 Conexión brida-tuerca superior e inferior**

El acople tendrá en su interior una guía para así evitar juego entre los sistemas, además en su parte frontal interna se colocan tuercas soldadas al acople para así asegurar el sistema de pre estiramiento (Figura 45).



**Figura 45 Acople entre sistemas**

Una vez detallados los elementos que intervienen en el ensamblaje del sistema de elevación, es necesario proporcionar un armazón, el cual soporte

al motor encargado del movimiento vertical. En este caso, se opta por el uso de ángulos de acero estructural para formar el soporte (Figura 46)



**Figura 46 Ángulos de acero**

Fuente: (METANCOR, 2010)

### **Diseño de la torre de elevación**

La torre de elevación está sometida a compresión pura debido a que soporta únicamente el peso del motor de elevación (Ecuación 31)

$$\sigma_c = F/A$$

**Ecuación 31**

Dónde:

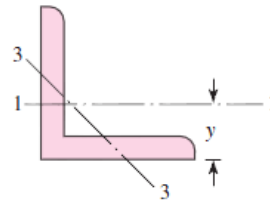
- $\sigma_c$  = esfuerzo de compresión
- $F$  = fuerza (peso del motor 2,2 kg)
- $A$  = área

$$\sigma_c = \frac{F}{A} = \frac{21,56 N}{127 * 170 mm^2}$$

$$\sigma_c = 1 kPa$$

Para el diseño se ha elegido ángulos de 1 x 1 x 1/8 de pulgada, ya que el marco estructural no está sometido a grandes esfuerzos por tanto no requiere de grandes dimensiones.

$w$  = weight per foot, lbf/ft  
 $m$  = mass per meter, kg/m  
 $A$  = area, in<sup>2</sup> (cm<sup>2</sup>)  
 $I$  = second moment of area, in<sup>4</sup> (cm<sup>4</sup>)  
 $k$  = radius of gyration, in (cm)  
 $y$  = centroidal distance, in (cm)  
 $Z$  = section modulus, in<sup>3</sup>, (cm<sup>3</sup>)



| Size, in                        | $w$  | $A$   | $I_{1-1}$ | $k_{1-1}$ | $Z_{1-1}$ | $y$   | $k_{3-3}$ |
|---------------------------------|------|-------|-----------|-----------|-----------|-------|-----------|
| $1 \times 1 \times \frac{1}{8}$ | 0.80 | 0.234 | 0.021     | 0.298     | 0.029     | 0.290 | 0.191     |
| $\times \frac{1}{4}$            | 1.49 | 0.437 | 0.036     | 0.287     | 0.054     | 0.336 | 0.193     |

**Figura 47. Propiedades de ángulos de acero estructurales**

Fuente: (Joseph E Shigley, 2008)

En base a los datos de la Figura 47, a continuación se realiza el cálculo de pandeo del perfil, para lo cual se emplea la fórmula de Euler (Ecuación 32)

$$P_c = C * \pi^2 * E * I / L^2 \quad \text{Ecuación 32}$$

Dónde:

$P_c$ : Carga crítica

$C$ : Condición en los extremos

$E$ : Módulo de elasticidad del Acero A36 (200 Gpa)

$I$ : Inercia

$L$ : Longitud del perfil

$$P_c = 1.2 * \pi^2 * 2039432 \text{ kg/cm}^2 * 0.021\text{cm}^4 / (161 \text{ cm})^2$$

$$P_c = 19.56 \text{ kg}$$

Entonces, la carga crítica es 19.56 Kg y el peso al que se somete el soporte es de tan sólo 2.2 kg. La ecuación 33 permite hallar el coeficiente de seguridad del estudio de pandeo.

$$n = P_c / P \quad \text{Ecuación 33}$$

Dónde:

n: Factor de seguridad

P<sub>c</sub>: Carga crítica

P: Peso del motor

$$n = 19.56 / 2.2$$

$$n = 8.9$$

### **Rodamiento lineal y guía**

Adicionalmente se ha decidido usar un rodamiento lineal (Figura 48) empernado al acople entre sistemas, el cual se desplaza sobre una guía lineal a lo largo de la torre de elevación, brindando una mayor rigidez a la estructura y evitando las oscilaciones producidas al subir y bajar el carro porta bobinas.



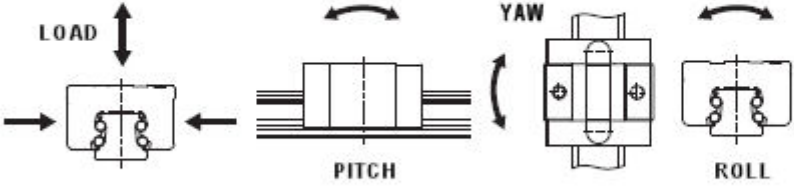
**Figura 48 Rodamiento y guía lineal**

Fuente: (MOTION AND CONTROL NSK, 2013)

Para el diseño de la guía y el rodamiento lineal se cuenta con una aplicación creada por el fabricante (Thomson), la cual permite seleccionar el modelo que mejor se acomoda según la aplicación.

En la aplicación se requiere varios parámetros. En este caso, se opta por un rodamiento de bolas con riel estándar, que soporte más de 0.582 N.m de “Roll moment”. El resultado de esta selección se detalla en la Figura 49.

La Figura 50 muestra la visualización 3D con la disposición y conexión de los elementos que conforman el sistema de elevación. Los ángulos de acero forman una estructura en forma de torre la cual sirve como protección del sistema en sí; así como de soporte para las chumaceras, motor del tornillo de potencia y la guía de precisión lineal (rodamiento lineal).

| <b>GENERAL</b>   |  |
|--|--|
| <b>Profile Rail Family:</b>  | 500 Series Ball Profile Rail Linear Guides |
| <b>Profile Size:</b>   | 15 mm                                      |
| <b>Standard Rail Part Number:</b>  | 521P15A                                    |
| <b>PERFORMANCE (@ 100KM TRAVEL LIFE)</b>   |  |
|  |  |
| <b>Dyn Load Rating N(lbf):</b>   | 5200 (1169)                                |
| <b>Dyn Pitch Moment Nm (lb-ft):</b>  | 18 (13)                                    |
| <b>Dyn Yaw Moment Nm (lb-ft):</b>  | 18 (13)                                    |
| <b>Dyn Roll Moment Nm(lb-ft):</b>  | 48 (35)                                    |
| <b>Static Load Rating N(lbf):</b>  | 8500 (1910)                                |
| <b>Static Pitch Moment Nm(lb-ft):</b>  | 30 (22)                                    |
| <b>Static Yaw Moment Nm(lb-ft):</b>  | 30 (22)                                    |
| <b>Static Roll Moment Nm(lb-ft):</b>   | 78 (57)                                    |
| <b>PERFORMANCE (@ 50KM TRAVEL LIFE)</b>  |  |
| <b>Dyn Load Rating N(lbf):</b>   | 6552 (1472)                                |
| <b>Dyn Pitch Moment Nm (lb-ft):</b>  | 23 (16)                                    |
| <b>Dyn Yaw Moment Nm (lb-ft):</b>  | 23 (16)                                    |
| <b>Dyn Roll Moment Nm(lb-ft):</b>  | 60 (44)                                    |
| <b>MECHANICAL</b>  |  |
| <b>Accuracy Class <math>\mu\text{m}</math>:</b>                                    | +/- 20                                     |
| <b>Preload Class:</b>  | 0.03 C                                     |
| <b>Material Type:</b>  | Carbon Steel                               |
| <b>Carriage Style:</b>   | Style G Narrow Short                       |
| <b>Carriage Weight kg(lbs):</b>  | 0.2 (0.44)                                 |
| <b>Max Single Rail Length mm(in):</b>  | 1500 (59)                                  |
| <b>Rail Weight kg/m(lb/ft):</b>  | 1.4 (10.12)                                |

**Figura 49 Características técnicas del rodamiento lineal**

Fuente: (MOTION AND CONTROL NSK, 2013)

Una vez determinados todos los elementos que constituyen el sistema de elevación, así como su peso (37 Kg.) se puede avanzar hacia el diseño del sistema de locomoción.





**Figura 50 Torre de elevación**

### **2.3 DISEÑO DEL SISTEMA DE LOCOMOCIÓN**

El sistema de locomoción es el responsable de la traslación de la máquina en el campo de trabajo. Las máquinas semiautomáticas de tipo autopropulsada se denominan comúnmente “robot”. Un robot es una máquina o ingenio electrónico programable, capaz de manipular objetos y realizar operaciones antes realizadas únicamente por personas.

### 2.3.1 TIPOS DE SISTEMAS DE LOCOMOCIÓN

La Figura 51 muestra los diversos sistemas de locomoción existentes en la actualidad.



**Figura 51: Tipos de sistemas de locomoción**

Dentro de esta clasificación el sistema que mejor se ajusta a las necesidades de un robot enfardador es el sistema de locomoción con ruedas, ya que los demás sistemas son empleados para emular los movimientos humanos. Los sistemas con locomoción de piernas sirven para caminar, gatear, trepar, saltar, rebotar, etc. Los sistemas con brazos se usan para trepar, gatear, colgar, y los sistemas con aletas sirven para nadar.

A pesar de que la mayor parte de los animales utiliza piernas para desplazarse, la locomoción en base a piernas es mucho más complicada

que la en base a ruedas. Esto principalmente debido a problemas de estabilidad.

Los robots con ruedas son más sencillos de controlar y más fáciles de construir, además la carga que pueden transportar es mayor que la que puede soportar otros tipos de robots móviles.

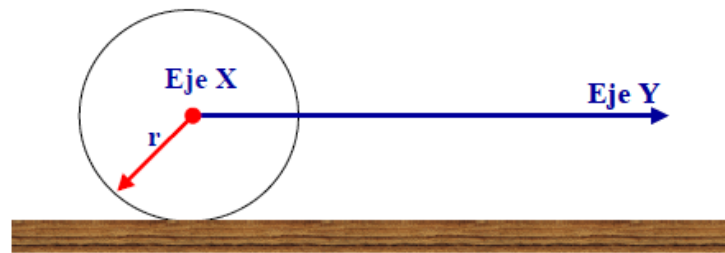
#### **Consideraciones de diseño:**

- Maniobrabilidad
- Controlabilidad
- Tracción
- Estabilidad
- Eficiencia
- Mantenimiento
- Impacto ambiental

#### **Robots móviles con ruedas**

Los robots móviles terrestres poseen diversas aplicaciones en la industria, tales como el almacenamiento, inspección y control de producción a distancia. A esto se puede añadir el que se pueden utilizar vehículos de ruedas de radio control para usarlos como bases de robots.

El elemento primordial dentro de un sistema de locomoción con ruedas como su nombre lo indica es la *rueda*.



**Figura 52: Representación de una rueda**

Fuente: (J. RUIZ DEL SOLAR y R. SALAZAR , 2010)

Las ruedas del robot móvil se mueven por el contacto superficial (o fricción con la superficie), idealmente, se desplaza  $2\pi*r$  por vuelta.

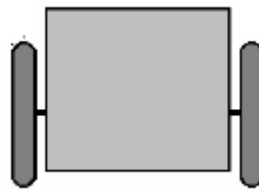
La principal desventaja de las ruedas es su empleo en terreno irregular, en el que se comportan bastante mal. Normalmente un vehículo de ruedas podrá sobrepasar un obstáculo que tenga una altura no superior al radio de sus ruedas.

### **Configuración de ruedas:**

Las formas más conocidas de disponer las ruedas en los robots móviles son:

- Diferencial
- Síncrono
- Tipo triciclo
- Tipo carro

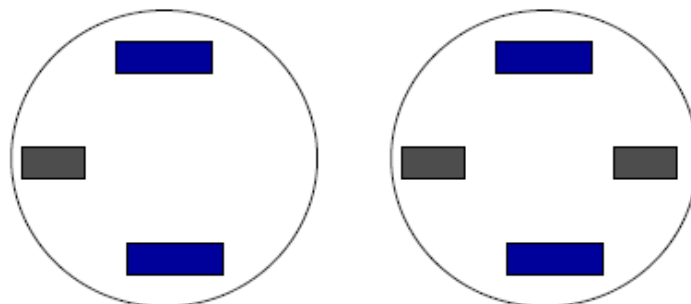
**Diferencial:** tanto desde el punto de vista de la programación como de la construcción, el diseño diferencial es uno de los menos complicados sistemas de locomoción (Figura 53). El robot puede ir recto, girar sobre sí mismo y trazar curvas.



**Figura 53: Configuración diferencial**

Fuente: (J. RUIZ DEL SOLAR y R. SALAZAR , 2010)

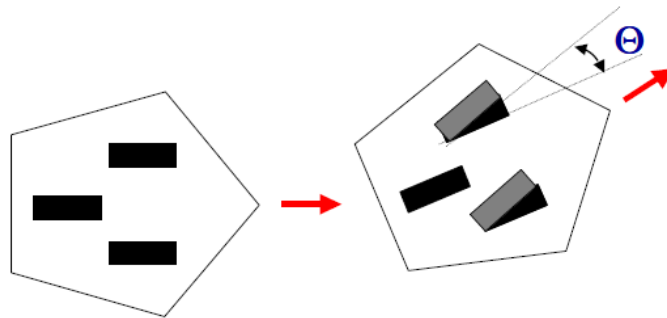
Una desventaja es el equilibrio del robot, ya que hay que colocar un apoyo adicional a las dos ruedas ya existentes, esto se consigue mediante una o dos ruedas de apoyo añadidas en un diseño triangular o romboidal (Figura 54)



**Figura 54 Configuración diferencial con ruedas de apoyo**

Fuente: (J. RUIZ DEL SOLAR y R. SALAZAR , 2010)

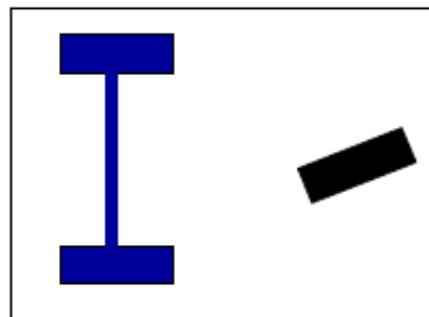
**Síncrono:** Las ruedas se mueven en forma síncrona, es decir, al mismo instante, este diseño generalmente posee tres ruedas, las cuales son tanto de dirección como motrices, las ruedas están enclavadas de tal forma que siempre apuntan en la misma dirección ( Figura 55)



**Figura 55 Configuración síncrona**

Fuente: (J. RUIZ DEL SOLAR y R. SALAZAR , 2010)

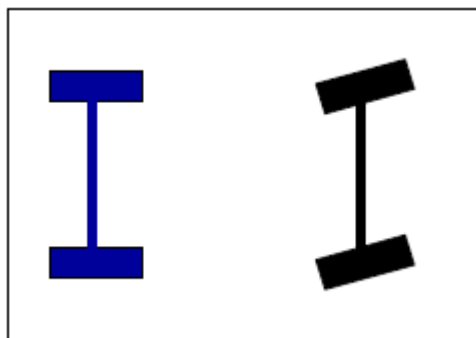
**Tipo triciclo:** poseen dos ruedas fijas que le dan tracción, además cuentan de una rueda para la dirección que normalmente no tiene tracción (Figura 56) Estos sistemas tienen buena estabilidad y simplicidad mecánica, tiene facilidad para ir recto y su cinemática es más compleja.



**Figura 56 Configuración tipo triciclo**

Fuente: (J. RUIZ DEL SOLAR y R. SALAZAR , 2010)

**Tipo carro:** similares al tipo triciclo, cuentan con dos ruedas de tracción y dos ruedas para dirección (Figura 57) Tiene una mayor complejidad mecánica que el triciclo por el acoplamiento entre las dos ruedas de dirección. Sus principales ventajas son buena estabilidad y facilidad de ir derecho. La desventaja es su complejidad cinemática.



**Figura 57 Configuración tipo carro**

Fuente: (J. RUIZ DEL SOLAR y R. SALAZAR , 2010)

Debido a que el sistema requiere una alta capacidad para soportar cargas, se requiere de un sistema móvil con ruedas en configuración tipo carro.

Todos los sistemas de la Tabla 12 incluyen algún sistema capaz de producir movimiento siendo los más comunes los motores de corriente continua (DC) y los servos motores o servos. Los primeros se utilizan casi siempre junto con un sistema de engranajes que reducen la velocidad y proporcionan mayor fuerza. El segundo sistema y quizás el más extendido

en robótica, consiste en la utilización de servos, los cuales tienen la gran ventaja de ser económicos y fáciles de usar en cualquier tipo de robot.

**Tabla 12 Sistemas de locomoción tipo carro**

| <b>SISTEMAS DE LOCOMOCIÓN</b>   |  |
|---|--|
|    |    |
| Móvil de cuatro ruedas direccionables   | Carro para palés   |
|  |  |
| Carro eléctrico jeep wrangler   | Sistema móvil diseño propio  |

Al comparar las diferentes alternativas (Tabla 13) y considerando que se dispone de un sistema de locomoción de cuatro ruedas de la empresa *FISHER PRICE*, además dado que el sistema presenta buenas características en su estabilidad, tracción e implementación se opta el carro eléctrico *jeep wrangler*, para lo cual se realiza un análisis de elementos finitos para comprobar que el sistema no falle.



### 2.3.2 MATRIZ DE SELECCIÓN DE SOLUCIONES

Tabla 13 Selección de sistema de locomoción

|                                       | Controlabilidad | Alta Tracción | Estabilidad | Fácil implementación | Mantenimiento | Costo | Total |
|---------------------------------------|-----------------|---------------|-------------|----------------------|---------------|-------|-------|
| <b>Móvil de ruedas direccionables</b> | 9               | 4             | 7           | 4                    | 5             | 5     | 34    |
| <b>Carro para palés</b>               | 5               | 7             | 10          | 6                    | 8             | 4     | 40    |
| <b>Carro eléctrico jeep wrangler</b>  | 7               | 9             | 9           | 7                    | 7             | 6     | 45    |
| <b>Sistema móvil diseño propio</b>    | 8               | 6             | 8           | 7                    | 6             | 5     | 40    |

Fuente: Elaboración propia.

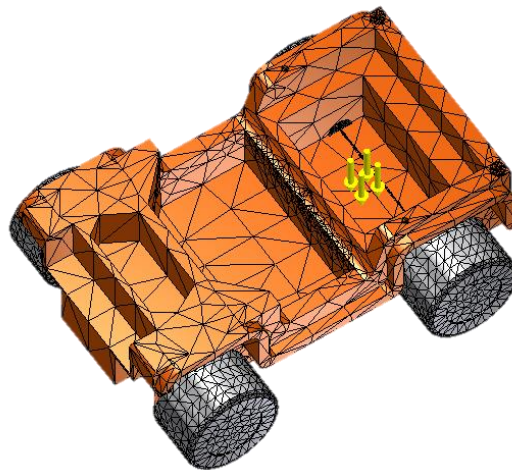
Calificaciones: 8 - 10 (muy bueno), 7 - 5 (regular), 4 – 2 (malo), 1 – 0 (no posee)

### 2.3.3 DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN ESCOGIDA

La función principal de este sistema es brindar un soporte a la estructura conformada por el sistema de pre estiramiento y el sistema de elevación, así como realizar el recorrido alrededor del palé. Además sobre éste se coloca la batería que alimenta al sistema, la placa micro-controlada para los sistemas de control y el panel de control del sistema en general.

De las especificaciones proporcionadas por el fabricante de este tipo de vehículos se conoce que el peso máximo a soportar es de 59 kg. La carga total que actúa sobre este auto eléctrico es la suma del sistema de pre estiramiento y el sistema de locomoción (47 Kg), pero debido a que el sistema va a someterse a un rediseño para que el carro puede desplazarse alrededor del palé, se va a realizar un análisis por elementos finitos para determinar el esfuerzo máximo que puede soportar, el desplazamiento al que estará sometido y el factor de seguridad del móvil.

La carga máxima que soporta el vehículo está aplicada en la parte posterior como se indica en la Figura 58, para el análisis se considera una fuerza aplicada sobre una determinada área, con lo cual el esfuerzo actúa directamente sobre la superficie del móvil sometiéndolo a compresión.



**Figura 58 Representación de la carga aplicada sobre el carro**

Se debe determinar las características del material, debido a que este es un material patentado por la empresa *FISHER PRICE* no existe información acerca de sus características mecánicas, por lo que se emplea las propiedades conocidas del plástico (Tabla 14)

**Tabla 14 Comparación entre propiedades del plástico y del acero**

| PROPIEDAD                 | PLÁSTICO                                  | ACERO                                     |
|---------------------------|---|---|
| Densidad                  | 800 - 100 kg/m <sup>3</sup>               | 7900 kg/m <sup>3</sup>                    |
| Módulo de Elasticidad     | 1 - 4 Gpa                                 | 210 Gpa                                   |
| Resistencia               | 7 - 100 Mpa                               | 400 - 1000 Mpa                            |
| Temperatura de distorsión | 50 - 150 °C                               |   |
| Temperatura de fusión     | < 350 °C                                  | 1700 °C                                   |
| Expansión Térmica         | 30 - 200x10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> | 30 - 200x10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> |
| Conductividad Térmica     | 0.1 - 0.4 W/mK                            | 63 W/mK                                   |

Fuente: (Plasticbages Industrial, S.L., 2012)

El material más utilizado para la fabricación de juguetes es el ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno), es un plástico muy resistente al impacto, utilizado especialmente en la industria de la automoción pero en ocasiones también en la doméstica.

### Características del ABS

El rasgo más importante del ABS es su gran tenacidad, incluso a baja temperatura (sigue siendo tenaz a  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Además es duro y rígido; resistencia química aceptable; baja absorción de agua, por lo tanto buena estabilidad dimensional; alta resistencia a la abrasión; se recubre con una capa metálica con facilidad.

El ABS se puede, en una de sus variantes, cromar por electrólisis dándole distintos baños de metal a los cuales es receptivo.

| Material                    | Módulo de elasticidad aproximado $E$ |     | Resistencia máxima a la tracción $S_u$ |     | Resistencia máxima a la compresión $S_w$ |     | Elongación (en 2 in) | Temperatura máxima | Densidad de masa $\rho$ |
|-----------------------------|--------------------------------------|-----|--|-----|--|-----|----------------------|--------------------|-------------------------|
|                             | $10^6$ psi                           | GPa | ksi                                    | MPa | ksi                                      | MPa | %                    | $^{\circ}\text{C}$ | $\text{Mg/m}^3$         |
| ABS                         | 0.3                                  | 2.1 | 6.0                                    | 41  | 10.0                                     | 69  | 5 a 25               | 70-95              | 1.05                    |
| ABS con 20-40% de vidrio    | 0.6                                  | 4.1 | 10.0                                   | 69  | 12.0                                     | 83  | 3                    | 95-110             | 1.30                    |
| Acetal                      | 0.5                                  | 3.4 | 8.8                                    | 61  | 18.0                                     | 124 | 60                   | 105                | 1.41                    |
| Acetal con 20-30% de vidrio | 1.0                                  | 6.9 | 10.0                                   | 69  | 18.0                                     | 124 | 7                    | 85-105             | 1.56                    |
| Acrílico                    | 0.4                                  | 2.8 | 10.0                                   | 69  | 15.0                                     | 103 | 5                    | 60-90              | 1.18                    |
| Fluoroplástico (FTFE)       | 0.2                                  | 1.4 | 5.0                                    | 35  | 6.0                                      | 41  | 100                  | 175-165            | 2.10                    |
| Nylon 6/6                   | 0.2                                  | 1.4 | 10.0                                   | 69  | 10.0                                     | 69  | 60                   | 80-150             | 1.14                    |
| Nylon 11                    | 0.2                                  | 1.3 | 8.0                                    | 55  | 8.0                                      | 55  | 300                  | 80-150             | 1.04                    |
| Nylon 11, 20-30% de vidrio  | 0.4                                  | 2.5 | 12.8                                   | 88  | 12.8                                     | 88  | 4                    | 120-170            | 1.26                    |
| Polycarbonato               | 0.4                                  | 2.4 | 9.0                                    | 62  | 12.0                                     | 83  | 100                  | 120                | 1.20                    |
| ... con 10-40% de vidrio    | 1.0                                  | 6.9 | 17.0                                   | 117 | 17.0                                     | 117 | 2                    | 135                | 1.35                    |
| Polietileno HMW             | 0.1                                  | 0.7 | 2.5                                    | 17  | -  | -   | 525                  | -                  | 0.94                    |

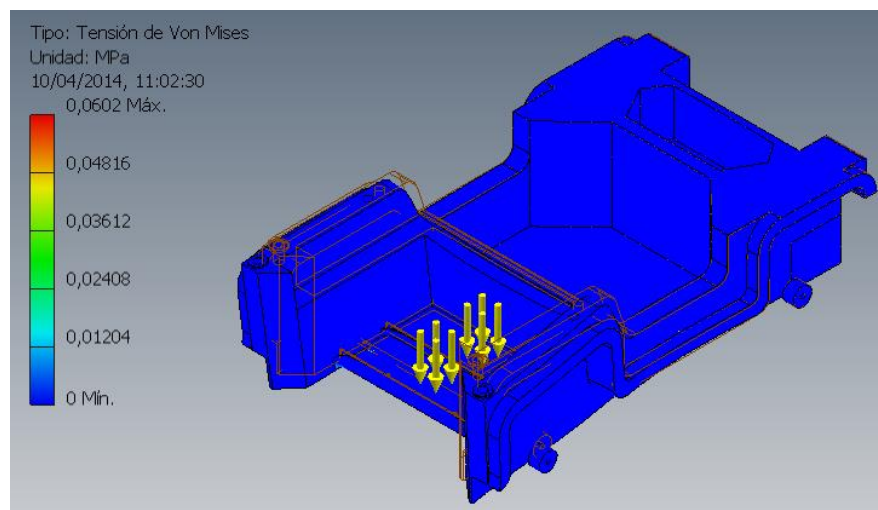
**Figura 59 ABS-Propiedades Físicas y Mecánicas**

Fuente: (Plasticbages Industrial, S.L., 2012)

Con base a estas características se tiene una resistencia a la compresión de 69 MPa y resistencia a la tracción de 41 MPa.

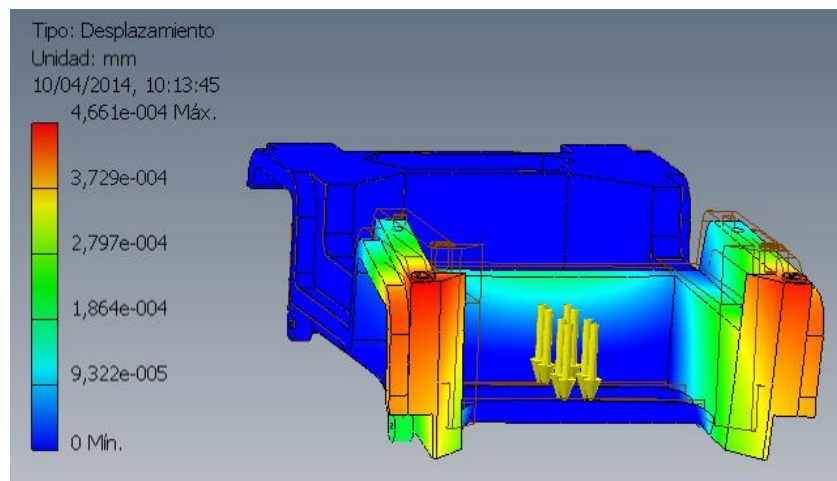
Ahora si se analiza la estructura del chasis, la cual está sometida a una carga máxima de 59 kg (578,2 N), actuando sobre un área equivalente a la base de la torre de elevación ( $A = 57500 \text{ mm}^2$ ) se obtiene un esfuerzo de compresión  $\sigma_c = 10,05 \text{ KPa}$ .

Realizando un análisis por elementos finitos mediante el software Autodesk Inventor 2013 se obtiene los siguientes resultados:



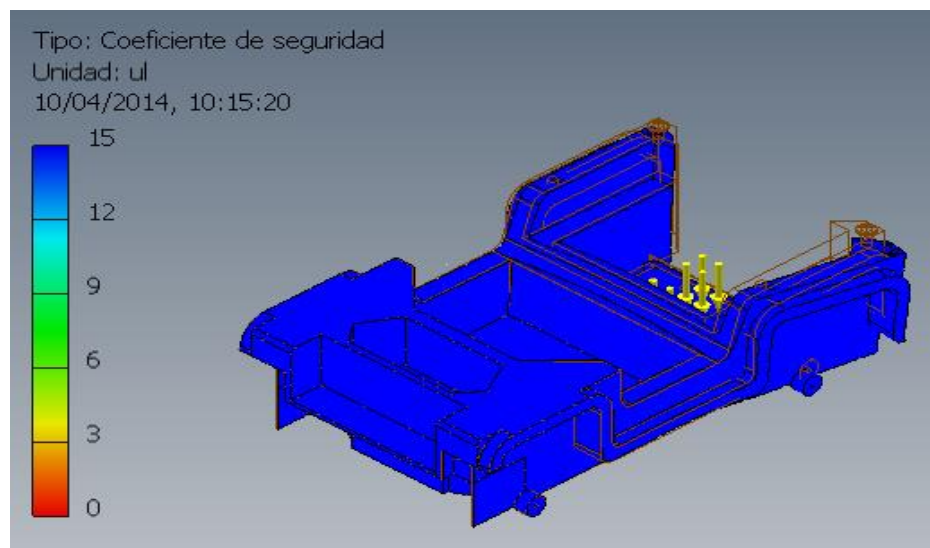
**Figura 60 Tensión de Von Mises**

Como se puede observar el sistema soporta un esfuerzo máximo de 0,06 MPa (Figura 60), el cual es mucho menor que la resistencia a la compresión del material, por tanto se observa que el sistema no falla.



**Figura 61 Desplazamiento**

Como se puede observar el desplazamiento máximo provocado por el peso de la carga es de  $4,66 \times 10^{-4}$  (Figura 61), el cual es prácticamente despreciable y no afecta al funcionamiento normal de la máquina.



**Figura 62 Coeficiente de seguridad**

Finalmente se observa que el sistema de locomoción posee un coeficiente de seguridad de 15 (Figura 62), el cual garantiza que no va a fallar ante la carga soportada por el mismo.

En la Figura 63 se muestra el ensamble final de todos los sistemas que conforma la máquina enfardadora.



**Figura 63 Ensamble final de sistemas**

## **CAPÍTULO III**

### **SISTEMA ELÉCTRICO**

En el presente capítulo se detalla el conjunto de elementos que permiten generar, conducir y recibir corriente eléctrica, se parte de la alimentación de la máquina para los sistemas de control y de potencia, definiendo niveles de voltaje y tipo de corriente requeridos para el correcto funcionamiento de los sensores y actuadores. Además se define los tipos y características de los motores empleados para cada subsistema presente en la enfardadora.

#### **3.1 SISTEMA DE ALIMENTACIÓN**

El tipo de enfardador propuesto en este proyecto es un robot de tipo móvil, el cual debe realizar el recorrido alrededor de la carga, razón por la cual una conexión a un tomacorriente no es factible ya que produciría un enredo entre el cable de alimentación y los paquetes ubicados sobre el palé.

La solución a este problema es el uso de corriente directa por medio de la implementación de baterías que proporcionen la energía necesaria para el funcionamiento de la máquina.

La importancia de diferenciar un sistema de alimentación para la parte de control y uno distinto para la parte de potencia se detalla a continuación.



### **3.1.1 SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DEL CIRCUITO DE CONTROL**

Los elementos característicos de un circuito de control micro-procesado son: elementos resistivos, capacitivos, amplificadores operacionales, micro-controladores, reguladores, sensores, entre otros.

Estos dispositivos generalmente trabajan con niveles de voltaje desde 1.5 a 12 voltios, razón por la cual es necesario un sistema de alimentación que provea 12 voltios DC. Además se requieren reguladores de tensión en caso de requerir niveles específicos de voltaje, como en un micro-controlador que funciona con 5 voltios.

### **3.1.2 SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DEL CIRCUITO DE POTENCIA**

El circuito de potencia es el encargado de proveer la energía necesaria a los actuadores, para que estos generen los movimientos necesarios para que la máquina enfardadora funcione adecuadamente. Los actuadores en este caso son los motores presentes en los sistemas de locomoción, dirección, corte, pre-estiramiento y elevación.

Existen varios parámetros para seleccionar el tipo de corriente de los motores que mejor se ajuste con el proyecto, y se resumen en la siguiente matriz de selección (Tabla 15).

**Tabla 15 Corriente alterna vs Corriente directa**

| Características                | Corriente alterna   |           | Corriente directa  |           |
|--------------------------------|---|-----------|--|-----------|
|                                | Descripción   | Ptos      | Descripción  | Ptos      |
| <b>Tamaño</b>                  | Son más voluminosos que un motor DC de la misma potencia                            | 5         | Ocupan menos espacio que un motor AC de la misma potencia                  | 8         |
| <b>Eficiencia</b>              | Emplea una menor cantidad de corriente para obtener el mismo torque que un motor DC | 8         | Se requiere una mayor cantidad de voltaje para obtener el torque requerido | 6         |
| <b>Sistema de arranque</b>     | Requiere un sistema de arranque apropiado   | 3         | No necesita sistema de arranque  | 9         |
| <b>Par a bajas velocidades</b> | Un motor AC no debe funcionar a menos de 1/3 de su velocidad nominal                | 5         | Posee un gran par a bajas velocidades                                      | 8         |
| <b>Facilidad de control</b>    | Requiere un sistema complicado y costoso  | 3         | Fácil implementación a un bajo precio                                      | 9         |
| <b>Precio</b>                  | Son más baratos que un motor DC de la misma potencia                                | 9         | Su precio es mayor que un motor AC de la misma potencia                    | 7         |
| <b>TOTAL</b>                   |   | <b>42</b> |  | <b>52</b> |

Fuente: (University Teknikal Malaysia Melaka, 2013)

Calificaciones: 8 - 10 (muy bueno), 7 - 5 (regular), 4 – 2 (malo), 1 – 0 (no posee)

Por los motivos que se detallan en la Tabla 15, los actuadores implementados en el desarrollo de la enfardadora son de corriente directa.

Dentro de los motores de corriente continua existen los motores con y sin escobillas, a pasos y servomotores. La alimentación de estos motores generalmente varía entre 5 y 24 VDC. El proyecto requiere de motores con un torque medio, razón por la cual motores a 12 o 24 VDC se adaptan perfectamente con las necesidades del robot. Las baterías comerciales generalmente tienen un voltaje de salida de 12 VDC, por esta razón se opta por emplear motores a 12VDC.

En resumen, el robot requiere la alimentación de una batería a 12VDC y existirán niveles de voltaje regulados entre 5 y 12. Además todos los sensores y actuadores trabajan con corriente directa, razón por la cual no es necesario el uso de inversores de corriente.

### **3.2 SELECCIÓN DE MOTORES**

En el punto anterior (Tabla 15) se define el uso de motores de corriente directa como mejor alternativa. Cada sistema tiene un requerimiento específico de potencia, torque y velocidad, por este motivo a continuación se detalla la selección de motores para cada subsistema.

### 3.2.1 SISTEMA DE LOCOMOCIÓN

El sistema de locomoción es el responsable de la traslación de la máquina en el campo de trabajo (Figura 64) De los datos suministrado por el fabricante del carro eléctrico se tiene que:

Velocidad máxima = 8 km/h = 133.33 m/min = 2,22 m/s

Peso máximo = 60 kg

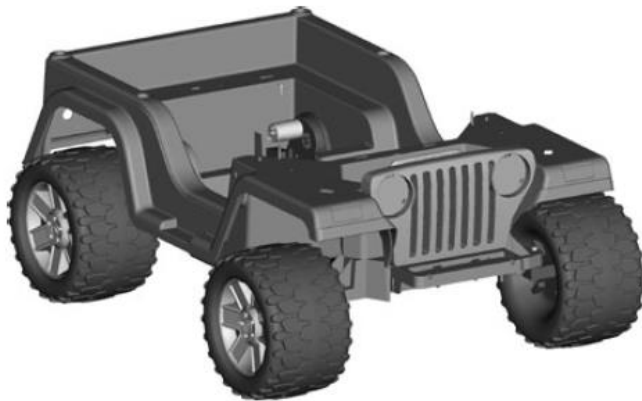
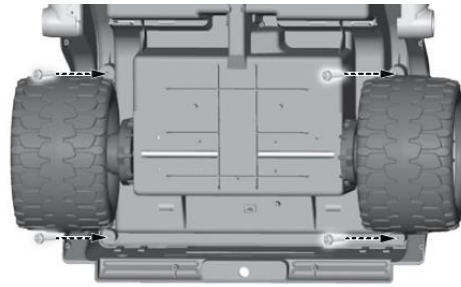


Figura 64 Sistema de locomoción

Fuente: (Power Wheels by Fisher Price, 2004)

#### 3.2.1.1 Movimiento de las ruedas traseras

En este sistema existen dos motores de corriente continua conectados a las ruedas traseras del carro (Figura 65), los cuales funcionan a 12 V y mediante una caja reductora reducen su velocidad e incrementan su torque, logrando así alcanzar una velocidad máxima de 133.33 m/min transportando una carga de 60 kg.

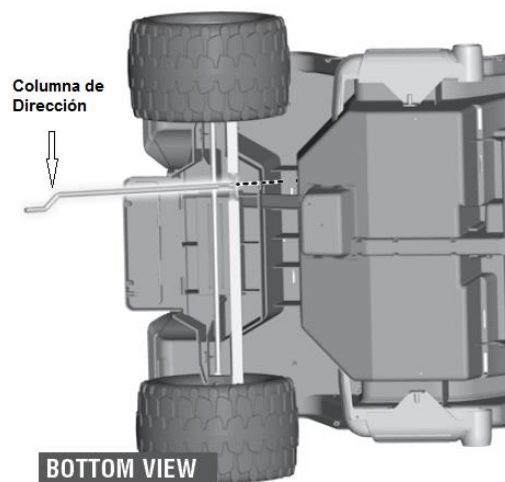


**Figura 65 Sistema de tracción**

Fuente: (Power Wheels by Fisher Price, 2004)

### 3.2.1.2 Sistema de dirección

En este subsistema existe un volante acoplado al eje delantero a través de la columna de dirección. (Figura 66)



**Figura 66 Vista inferior del sistema de dirección**

Fuente: (Power Wheels by Fisher Price, 2004)

Para simplificar el diseño y acople del sistema de dirección se opta por reemplazar el volante existente para controlar la dirección mediante un motor (Figura 67)



**Figura 67 Vista lateral del sistema de dirección**

Fuente: (Power Wheels by Fisher Price, 2004)

El motor del sistema de dirección requiere una gran facilidad en el control de posición para que el robot realice un giro adecuado alrededor de la carga situada sobre el palé. Los motores a pasos y los servomotores son los más empleados en situaciones donde el control de posición es primordial, por este motivo en la Tabla 16 se establece una comparación entre estos dos tipos de motores.

La principal ventaja del servomotor sobre el motor a pasos es que no necesita un driver adicional para obtener un correcto funcionamiento del mismo. La facilidad de conexión y el bajo consumo de corriente son factores que permiten que el servomotor sea la mejor opción para el sistema de dirección.

Tabla 16 Servomotor vs motor a pasos

| CARACTERÍSTICA                | SERVOMOTOR   |           | A PASOS  |           |
|-------------------------------|--|-----------|--|-----------|
|                               | Descripción  | Ptos      | Descripción  | Ptos      |
| <b>Tamaño</b>                 | Ocupan menos espacio que un motor a pasos de la misma potencia             | 8         | Son más voluminosos que un servomotor de la misma potencia     | 6         |
| <b>Eficiencia</b>             | Tiene una eficiencia entre 80 y 90%  | 8         | Tiene una eficiencia de menos de 70%                           | 7         |
| <b>Mantenimiento</b>          | Requieren poco mantenimiento (a excepción de los que tienen escobillas)    | 8         | Requieren poco mantenimiento                                   | 8         |
| <b>Resolución</b>             | Tiene una resolución de hasta 2000 pasos por revolución                    | 6         | Tiene una resolución de hasta 25000 pasos por revolución       | 8         |
| <b>Necesidad de drivers</b>   | No requiere ningún driver adicional  | 9         | Requiere un controlador adicional                              | 5         |
| <b>Relación Par-Velocidad</b> | Mantiene un par constante en la velocidad nominal                          | 9         | Su torque es muy bajo a altas velocidades                      | 5         |
| <b>Precio</b>                 | Tiene un costo mayor debido a la complejidad de sus controladores internos | 6         | Son un 10 o 20% más baratos que los sistemas servo controlados | 9         |
| <b>TOTAL</b>                  |  | <b>54</b> |  | <b>48</b> |

Fuente: (leisonmotor, 2013)

Calificaciones: 8 - 10 (muy bueno), 7 - 5 (regular), 4 - 2 (malo), 1 - 0 (no posee)

A continuación se indica las características del servomotor que se propone como actuador del sistema de dirección (Figura 68):



**Figura 68 Servomotor empleado en el sistema de dirección**

Fuente: (aliexpress, 2013)

Se trata de un servo motor que puede manejar el torque hasta 40 kg.cm., además es digital, posee engranajes de metal en el interior, los cuales garantizan el manejo de grandes cargas sin fallas mecánicas y asegurar la fiabilidad.

#### **Especificaciones**

- Voltaje: 6 - 7.2 V
- Velocidad: 60° en 0.14 segundos (7.2v)
- Par: 38 kg.cm (6v), 40 kg.cm (7.2v)
- Dimensiones: 59,2 \* 29,2 \* 53,9 mm
- Peso: 165 g



### 3.2.2 SISTEMA DE ELEVACIÓN

El diseño del actuador del sistema de elevación se encuentra en el CAPÍTULO II y sus resultados se detallan en la Tabla 11. En base a esos resultados y debido a que la variable a controlar es la velocidad, se propone el uso de un motor DC.

El mercado nacional no dispone de un motor de las características deseadas, razón por la cual se requiere la importación del actuador. El motor Z5D120-24GU [5GN3K] de *Leisonmotor* mostrado en la Figura 69 es una opción viable en este caso.



**Figura 69 Motor DC acoplado al tornillo de potencia**

Fuente: (leisonmotor, 2013)

La Figura 70 detalla las características del motor:

| Model     | Voltage | Power | No-Load Parameters |         | Load Parameters |        |         | Brush Life | Motor Weight |
|-----------|---------|-------|--------------------|---------|-----------------|--------|---------|------------|--------------|
|           |         |       | Speed              | Current | Speed           | Torque | Current |            |              |
|           |         |       | r/min              | A       | r/min           | mN.m   | A       |            |              |
| Z5D120-12 | 12      | 120   | 3100               | 2.0Max  | 2500            | 458    | 15.0    | 2000       | 2.2          |
| Z5D120-24 | 24      | 120   | 3200               | 1.2Max  | 2600            | 441    | 7.0     | 2000       | 2.2          |
| Z5D120-90 | 90      | 120   | 3000               | 0.3Max  | 2600            | 441    | 2.0     | 2000       | 2.2          |

| Type        | Gear Ratio       |        | 3    | 3.6  | 5    | 6    | 7.5  | 9    | 12.5 | 15   | 18   | 25   | 30   |
|-------------|------------------|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Z5D120-24GU | Speed            | r/min  | 866  | 777  | 520  | 433  | 346  | 288  | 208  | 173  | 144  | 104  | 86   |
|             | Allowance Torque | N.m    | 1.07 | 1.28 | 1.78 | 2.14 | 2.67 | 3.21 | 4.02 | 4.82 | 5.79 | 7.27 | 8.72 |
|             |                  | Kgf.cm | 10.9 | 13.1 | 18.2 | 21.8 | 27.3 | 32.7 | 41.1 | 49.2 | 59.1 | 74.2 | 89.1 |

**Figura 70 Características del motor Z5D120-24GU [5GN3K]**

Fuente: (leisonmotor, 2013)

### 3.2.3 SISTEMA DE PRE-ESTIRAMIENTO

En base al diseño realizado en el CAPÍTULO II, cuyos resultados se muestran en la Tabla 8, se escoge al motor DC como el actuador de este sistema, siendo la velocidad la variable a controlar.

La Figura 71 muestra la mejor alternativa disponible en el mercado nacional:



**Figura 71 Motor DC con caja reductora**

Fuente: (pololu, 2013)



Este servomotor opera de 0-180 grados de rango de movimiento, con un control de ángulo de alta calidad.

**Características:**

- Voltaje de funcionamiento: 4.8V a 6.0V
- Señal de control: ángulo neutro en 1.5 milisegundos ancho de pulso
- Par parada: 13Kg.cm
- Velocidad angular: 60 grados en 0.18 segundos
- Caja de cambios: Metal

### **3.3 DIMENSIONAMIENTO DE LA BATERÍA**

Los parámetros de selección de las baterías son el voltaje de salida y la capacidad. En puntos anteriores se determina a la batería de 12 VDC como la fuente de alimentación del robot enfardador. Para determinar su capacidad se debe calcular el consumo de corriente de todos los elementos eléctricos y electrónicos presentes en la máquina.

La Tabla 18 refleja el consumo eléctrico de los componentes presentes en la máquina. Siendo el consumo total de 17 amperios.

La enfardadora se estima que opera aproximadamente 40 minutos por hora, debido a que el resto del tiempo el o los operarios colocan las cajas o la carga sobre el palé.

Tabla 18 Consumo eléctrico de la máquina

| Sistema      | Descripción         | Cantidad | Consumo por unidad (A) | Consumo total (A) |
|--------------|---------------------|----------|------------------------|-------------------|
| Tracción     | Motor DC            | 2        | 2                      | 4                 |
| Dirección    | Servomotor          | 1        | 2                      | 2                 |
| Elevación    | Motor DC            | 1        | 6                      | 6                 |
| Estiramiento | Motor DC            | 2        | 2                      | 4                 |
| Control      | Dispositivos varios | 1        | 1                      | 1                 |
| <b>TOTAL</b> |                     |          |                        | <b>17</b>         |

Fuente: Elaboración propia.

La capacidad de una batería se calcula mediante la ecuación 34 (Todo Productividad, 2012)

$$C = I * t$$

**Ecuación 34**

Dónde:

C: Capacidad en amperios-hora (Ah)

I: Corriente eléctrica en amperios (A)

t: Tiempo en horas (h)

Reemplazando los datos en la ecuación 3.1 se obtiene que:

$$C = 17 (A) * \left(\frac{40}{60}\right) (h)$$

$$C = 11,33 (Ah)$$

Las baterías de plomo-acido no deben ser descargadas hasta el máximo ya que eso reduce la vida útil de la batería. Por esta razón, se debe incluir en el cálculo un factor de eficiencia de 0.8. (Todo Productividad, 2012)

Además las baterías cuando tienen que entregar un valor elevado de corriente se descargan rápidamente, por lo cual factor de velocidad de descarga de 0,5 debe ser tomado en cuenta. (Todo Productividad, 2012)

En conclusión la ecuación de capacidad de batería queda de la siguiente manera (Ecuación 35)

$$C = \frac{I*t}{0.8*0.5} \quad \text{Ecuación 35}$$

$$C = \frac{11.33}{0.8 * 0.5}$$

$$C = 28.33 \text{ (Ah)}$$

La batería BOSCH de 12 VDC y 40 Ah se escoge como la fuente de alimentación de la máquina, debido a que es el modelo comercial que más se adapta a la capacidad calculada (28.33 Ah).

### 3.4 DIMENSIONAMIENTO DEL CALIBRE DE LOS CABLES

Para determinar el calibre de los cables se emplea la Tabla 19 que presenta las características eléctricas de los cables AWG. Cabe recalcar que el estándar AWG (American Wire Gauge) es una norma estadounidense

empleada desde 1857, donde a medida que el número del calibre se incrementa, más delgado es el alambre.

**Tabla 19 Características eléctricas de los cables AWG**

| Codigo AWG | Diametro del conductor (mm) | Ohmios por kilometro | Amperaje maximo para distancias cortas | Amperaje maximo para distancias largas |
|------------|-----------------------------|----------------------|--|--|
| 7          | 3.66522                     | 1.634096             | 89                                     | 30                                     |
| 8          | 3.2639                      | 2.060496             | 73                                     | 24                                     |
| 9          | 2.90576                     | 2.598088             | 64                                     | 19                                     |
| 10         | 2.58826                     | 3.276392             | 55                                     | 15                                     |
| 11         | 2.30378                     | 4.1328               | 47                                     | 12                                     |
| 12         | 2.05232                     | 5.20864              | 41                                     | 9.3                                    |
| 13         | 1.8288                      | 6.56984              | 35                                     | 7.4                                    |
| 14         | 1.62814                     | 8.282                | 32                                     | 5.9                                    |
| 15         | 1.45034                     | 10.44352             | 28                                     | 4.7                                    |
| 16         | 1.29032                     | 13.17248             | 22                                     | 3.7                                    |
| 17         | 1.15062                     | 16.60992             | 19                                     | 2.9                                    |
| 18         | 1.02362                     | 20.9428              | 16                                     | 2.3                                    |
| 19         | 0.91186                     | 26.40728             | 14                                     | 1.8                                    |
| 20         | 0.8128                      | 33.292               | 11                                     | 1.5                                    |
| 21         | 0.7239                      | 41.984               | 9                                      | 1.2                                    |
| 22         | 0.64516                     | 52.9392              | 7                                      | 0.92                                   |
| 23         | 0.57404                     | 66.7808              | 4.7                                    | 0.729                                  |
| 24         | 0.51054                     | 84.1976              | 3.5                                    | 0.577                                  |
| 25         | 0.45466                     | 106.1736             | 2.7                                    | 0.457                                  |
| 26         | 0.40386                     | 133.8568             | 2.2                                    | 0.361                                  |

Fuente: (asterion, 2010)

En base a los datos de capacidad de corriente de los cables AWG descrita en la tabla anterior se selecciona el calibre de los cables según su requerimiento de corriente. Los resultados se muestran en laTabla 20.

**Tabla 20 Selección del calibre de los cables AWG**

| <b>Sistema</b>      | <b>Elemento</b>     | <b>Consumo (A)</b> | <b>Calibre AWG</b> |
|---------------------|---------------------|--------------------|--------------------|
| <b>Tracción</b>     | Motor DC            | 2                  | 24                 |
| <b>Dirección</b>    | Servomotor          | 2                  | 24                 |
| <b>Elevación</b>    | Motor DC            | 6                  | 18                 |
| <b>Estiramiento</b> | Motor DC            | 2                  | 24                 |
| <b>Control</b>      | Dispositivos varios | 1                  | 26                 |



## **CAPÍTULO IV**

### **SISTEMA ELECTRÓNICO**

En este capítulo se detalla los periféricos de entrada y salida, sensores, actuadores, unidades de control, así como también el diseño de circuitos impresos para que la máquina perciba su entorno de manera adecuada y pueda ejecutar las tareas requeridas.

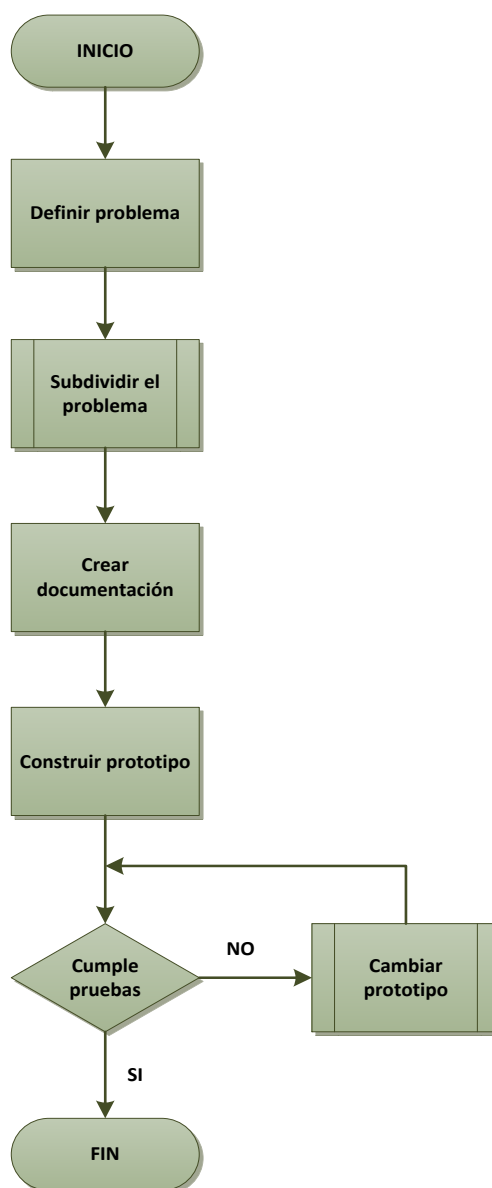
#### **4.1 INTRODUCCIÓN**

Un sistema electrónico está compuesto por elementos sensoriales que captan las variables que se van a supervisar, después la unidad de control manipula, interpreta y transforma las señales provenientes de los sensores para que finalmente un elemento actuador recibe la orden del controlador y en función de ella genere una acción. Estos elementos interactúan entre sí para obtener un resultado deseado.

Para desarrollar la solución que mejor se adapte a los requerimientos de diseño se sigue el orden mostrado en Figura 73 y se debe considerar los siguientes aspectos:

- Seleccionar la fuente de alimentación y niveles de voltaje requeridos para el correcto funcionamiento de la máquina.
- Determinar los sensores que capten señales físicas y las convierten en señales eléctricas.

- Seleccionar el mejor controlador para manipular, interpretar y transformar las señales provenientes de los sensores.
- Desarrollar una interfaz gráfica que permita la comunicación inalámbrica entre el sistema y el usuario.
- Diseño y selección de drivers y circuitos electrónicos que permitan controlar los actuadores.



**Figura 73** Proceso de diseño electrónico

## 4.2 FUENTE DE ALIMENTACIÓN Y NIVELES DE VOLTAJE

Como se definió en el capítulo anterior se va a usar una batería de 12 VDC y 40 Ah. Debido a que existen varios sistemas y subsistemas que conforman la máquina enfardadora es necesario determinar los niveles de voltaje requeridos para cada sistema.

. El voltaje de funcionamiento de componentes electrónicos en la enfardadora para sensores, unidad de control y actuadores tiene un rango de 1.8 a 12VDC. Pero existen ciertos dispositivos que tienen un rango específico de voltaje de alimentación y se detallan en la Tabla 21

**Tabla 21 Niveles de voltaje requeridos**

| ELEMENTOS  | VOLTAJE (V) |
|--|-------------|
| Instrumentación, placa micro controlada, sistemas auxiliares | 5           |
| Servomotor del sistema de corte                              | 6           |
| Servomotor del sistema de dirección                          | 7.2         |

### 4.2.1 REGULACIÓN A 5VDC.

En el diseño de un regulador de voltaje se considera la corriente máxima que éste debe proporcionar. Los elementos que funcionan con 5 VDC, en este caso, son sensores y la unidad de control. Su consumo de corriente está previsto que en conjunto requieran 1 amperio como máximo (Tabla 18).

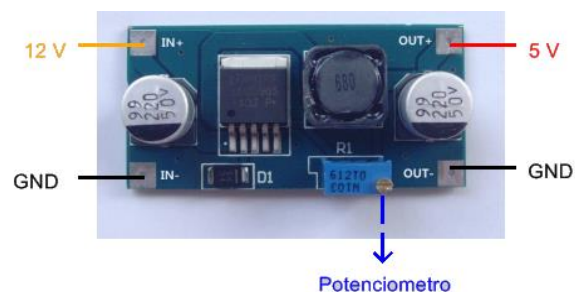
En este caso, se opta por adquirir un modelo comercial en lugar de diseñar un circuito impreso. Esta decisión se toma debido a que en el mercado nacional existen varios circuitos impresos que cumplen con los requerimientos de diseño y tienen un bajo costo. Uno de ellos es el circuito impreso Figura 74, el cual basa su funcionamiento en el regulador de voltaje LM2596



**Figura 74 Regulador de voltaje LM2596**

Fuente: (aliexpress, 2013)

Este circuito impreso es un regulador de voltaje tipo “step down”, es decir, su voltaje de salida es menor que su voltaje de alimentación. El valor de voltaje de salida se regula mediante el potenciómetro de precisión presente en la placa (Figura 75)



**Figura 75 Conexión del LM2596**

Las características de este driver se detallan a continuación:

- Convertidor de alta eficiencia: 80%
- Voltaje de entrada: 4.75 a 30V
- Voltaje de salida: 1.25 a 26V
- Voltaje de salida ajustable
- Corriente promedio de salida: 2A
- Corriente pico de salida: 3A
- Basado en el regulador LM2596S
- Led indicador de encendido

#### **4.2.2 REGULACIÓN A 6 VDC.**

El servomotor del sistema de corte posee una alimentación de 6 VDC y su requerimiento de corriente es de 1.5 amperios. Por este motivo, el regulador de voltaje de la Figura 74 se adapta perfectamente y se elige para esta regulación de voltaje.

#### **4.2.3 REGULACIÓN A 7.2 VDC.**

El servomotor empleado para controlar la dirección de la máquina alrededor del pallet trabaja a 7.2VDC y tiene un consumo de corriente de 2 amperios. En este caso, al igual que en anterior, se escoge el regulador de voltaje basado en el integrado LM2596 (Figura 74).

### 4.3 INSTRUMENTACIÓN

La correcta selección de los sensores permite que el sistema perciba el entorno que lo rodea de la mejor manera posible.

En la Tabla 22 se detalla la variable a medir requerida para realizar cada función de la enfardadora, así como su rango de medida.

**Tabla 22 Selección de sensores**

| <b>FUNCIÓN</b>   | <b>VARIABLE A<br/>MEDIR</b> | <b>RANGO DE<br/>MEDIDA</b> |
|--|-----------------------------|----------------------------|
| <b>Proximidad del robot al palé</b>  | Distancia                   | 0 – 80cm                   |
| <b>Altura de la carga</b>  | Distancia                   | 0 - 125cm                  |
| <b>Anti-choque</b>   | Distancia                   | 0 - 100cm                  |
| <b>Rotura de film extensible</b>   | Presencia                   | 0 - 10cm                   |
| <b>Posición máxima y mínima del<br/>carro porta bobinas en el<br/>mástil</b> | Presencia                   |                            |
| <b>Nivel de carga de la batería</b>  | Voltaje                     | 12 ± 1V                    |

#### 4.3.1 SENSORES DE DISTANCIA

El sensor de proximidad o distancia es un transductor que detecta objetos o señales que se encuentran cerca del elemento sensor.

Existen varios tipos de sensores de proximidad según el principio físico que utilizan. Los más comunes son los detectores capacitivos, inductivos, fotoeléctricos, infrarrojos y ultrasónicos.

El sensor ultrasónico HC-SR04 (Figura 76) se escoge para realizar la medición de distancia debido a su gran precisión, facilidad de uso, rango de medición (hasta 400cm), bajo precio y alta disponibilidad en el mercado ecuatoriano.



**Figura 76 Sensor ultrasónico HC-SR04**

Fuente: (inmotion, 2012)

#### **4.3.2 FINALES DE CARRERA**

Los sensores con contacto son sencillos, robustos, fiables y de coste reducido. Las ventajas que este tipo de sensores presentan frente a los sensores sin contacto se muestra a continuación.

- Pueden detectar cualquier objeto independientemente del material con el que estén realizando.
- Su funcionamiento es exclusivamente mecánico.

- No les afectan las interferencias procedentes del medio exterior, como por ejemplo los ruidos eléctricos, fuentes de luz, radiaciones electromagnéticas, etc.
- Su salida está constituida por uno o más contactos libres de potencial por lo que se pueden utilizar para proporcionar una variable binaria a un sistema electrónico digital.

Este tipo de sensores se requieren para determinar el punto más alto y más bajo del recorrido del sistema de pre-estiramiento dentro del mástil.



**Figura 77 Sensor final de carrera**

Fuente: (electronicaembajadores, 2010)

#### **4.4 CONVERTIDORES DE POTENCIA**

Los motores DC presentes en la enfardadora requieren una alimentación a 12VDC y un control de velocidad por PWM (Tabla 6). Además en el caso del motor conectado al tornillo de potencia se requiere una inversión en el sentido de giro.



Los parámetros para la correcta selección de un driver son: voltaje de alimentación, corriente eléctrica y potencia disipada. (Tabla 23)

**Tabla 23 Potencia disipada por los motores DC**

| SISTEMA      | CORRIENTE (A) | POTENCIA (W) |
|--------------|---------------|--------------|
| TRACCIÓN     | 4             | 48           |
| ELEVACIÓN    | 6             | 72           |
| ESTIRAMIENTO | 4             | 48           |

Cabe destacar que la disponibilidad en el mercado ecuatoriano de drivers de inversión de giro de potencias mayores a 20W es muy baja. Por esta razón, se opta por importar un modelo comercial.

La placa de la Figura 78 es un circuito con inversión de giro, con capacidad de disipación de 100 Watts y con control de velocidad por PWM.



**Figura 78 Driver de inversión de giro de 100W**

Fuente: (aliexpress, 2013)

Las características de este driver se detallan a continuación:

- Voltaje de alimentación: 5.5 a 27VDC
- Corriente máxima: 43 A
- Potencia disipada: 100W
- Frecuencia máxima del PWM: 25 kHz
- Protección contra sobre voltaje y exceso de temperatura

Por estas razones se selecciona este modelo comercial para controlar los actuadores de los sistemas de tracción, elevación y estiramiento.

La Tabla 24 contiene la información necesaria para el correcto uso del driver de inversión de giro. Las entradas EN1 y EN2 son los habilitadores o “enable”, los cuales se habilitan en alto, es decir, necesitan un 1 lógico para su activación. En cambio las entradas IN1 e IN2 reciben las señales de PWM provenientes del micro controlador.

**Tabla 24 Configuración de los pines del driver de inversión de giro**

| IN 1 | IN2  | EN1 | EN2 | MOTOR                |
|------|------|-----|-----|----------------------|
| 1    | 1    | 1   | 1   | Freno                |
| X    | X    | 0   | X   | Libre rotación       |
| X    | X    | X   | 0   | Libre rotación       |
| 0    | PWM2 | 1   | 1   | Giro anti<br>horario |
| PWM1 | 0    | 1   | 1   | Giro horario         |

La X en la tabla anterior significa que esa entrada puede adquirir cualquier valor lógico, debido a que éste no incidirá en el estado del motor.

## **4.5 SISTEMAS AUXILIARES - ALARMAS**

Durante el desarrollo del proceso de enfardado se presentan ciertos factores o circunstancias que entorpecen el correcto y eficiente funcionamiento del robot. Estos pueden ser:

- Agotamiento de la batería
- Colisión contra objetos cercanos al pallet
- Rotura o agotamiento de la película extensible

Para cada una de estas posibilidades se ha implementado una alarma para que el usuario tome las acciones pertinentes y solucione el problema.

### **4.5.1 ALARMA DE AGOTAMIENTO DE BATERÍA**

Debido a que en este proyecto se propone un robot autopulsado dependiente de baterías, es indispensable saber cuál es el estado de la alimentación de la máquina enfardadora para que esta pueda realizar su trabajo eficientemente.

La alimentación que se sugiere para este proyecto es una batería de plomo-ácido de 12 V. Generalmente la carga de este tipo de baterías tiene una tensión de salida de 12,7 V cuando está cargada al máximo y no se encuentra conectada la carga. A medida que se usa la batería y se va

descargando, esta tensión disminuye hasta alcanzar unos 11,7 V cuando la batería está totalmente descargada.

La lógica de funcionamiento se indica en el Figura 79.

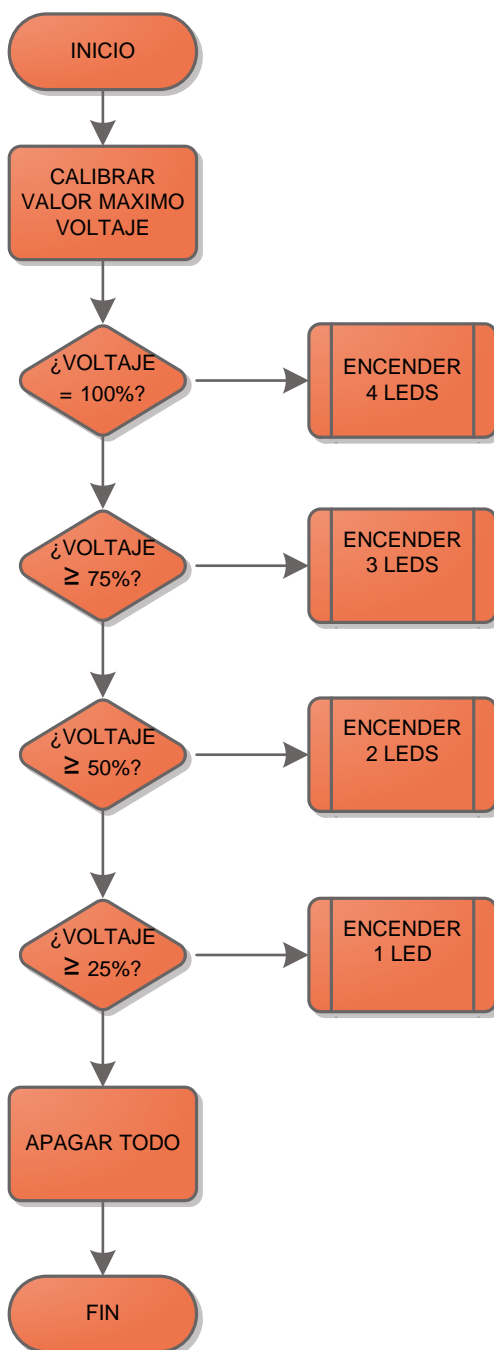


Figura 79 Diagrama de flujo – Alarma batería

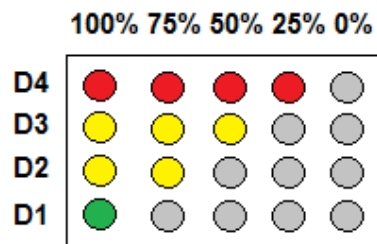
#### 4.5.1.1 Diseño del circuito impreso de alarma de agotamiento de batería

Para la elaboración de este circuito se propone el uso de un amplificador operacional en configuración de comparador de tensión.

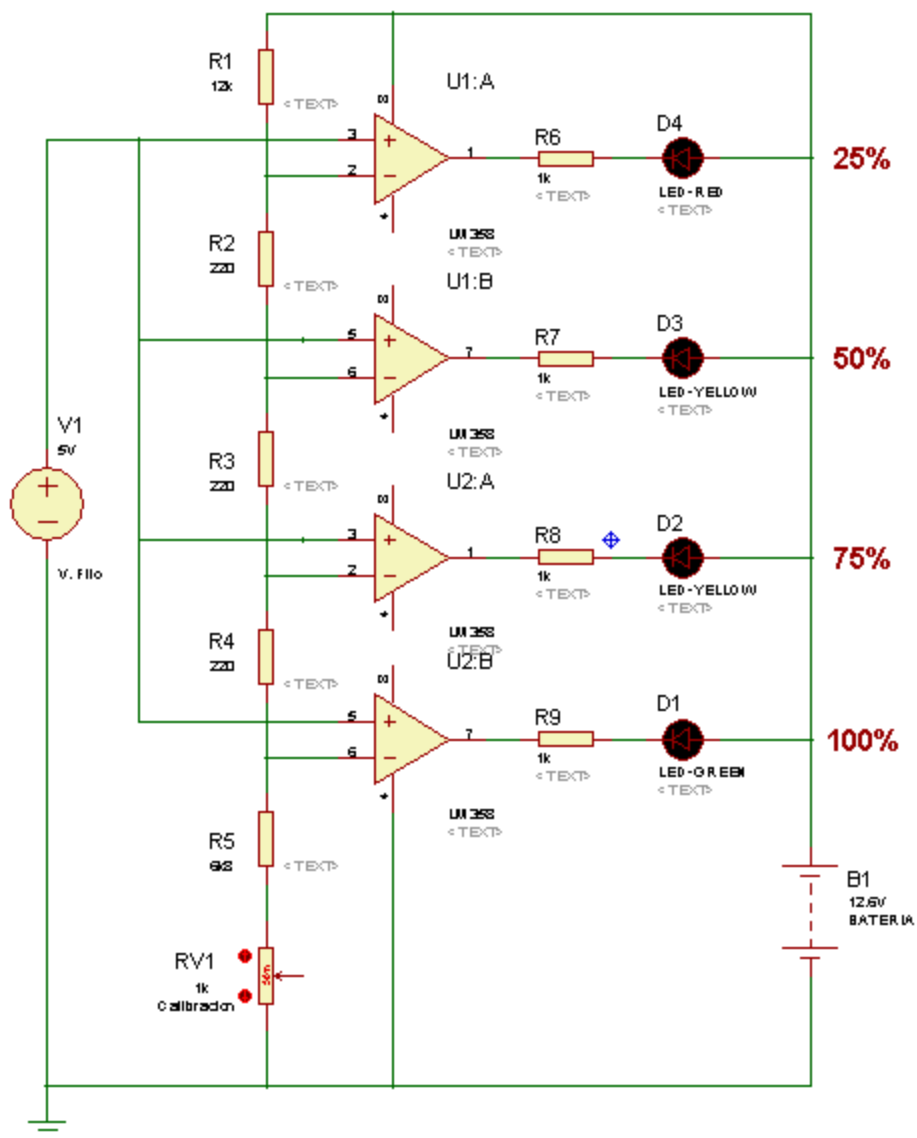
Se propone un circuito (Figura 81) donde las entradas positivas de todos los comparadores se conectan a un valor de tensión fijo de 5 VDC. Mientras que las entradas negativas dependen de un divisor de voltaje formado por una red de resistencias y un potenciómetro.

Dependiendo de la carga de la batería, los valores a la entrada de los comparadores varían y a medida que disminuye la carga de la batería, también disminuye el voltaje en los comparadores. Este cambio se ve reflejado en la activación de los indicadores luminosos, los cuales indican (en porcentajes) el estado de carga de la batería. (Figura 83 ).

El circuito permite que cada LED indique aproximadamente un 25% del estado de carga de la batería (Figura 80)

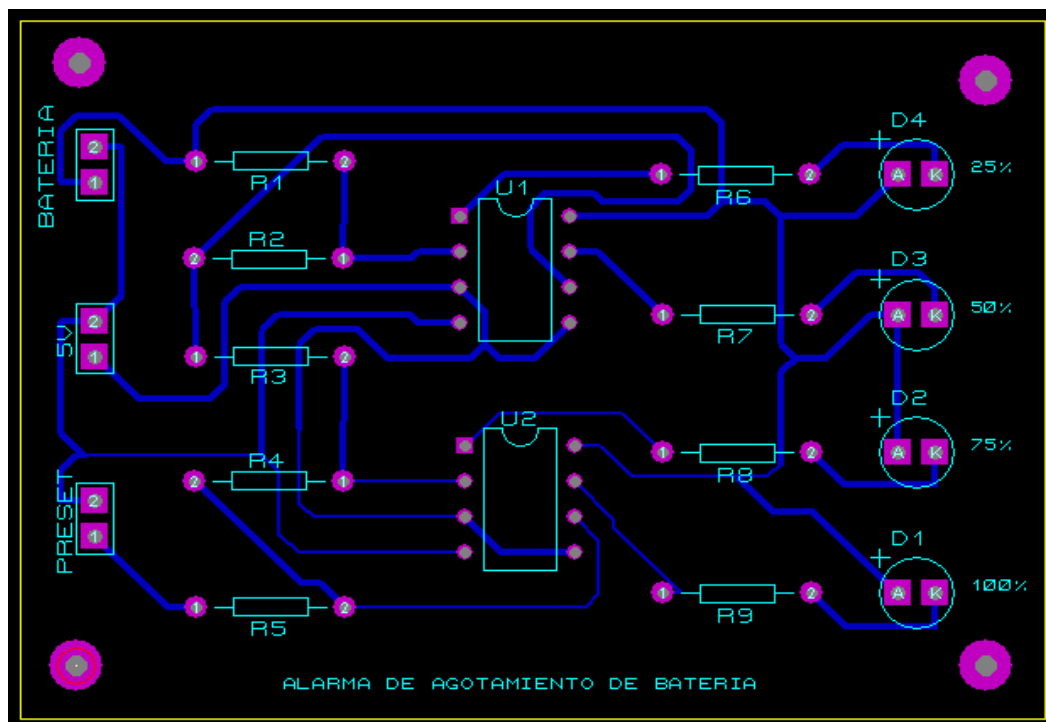


**Figura 80 Representación gráfica de carga de batería**



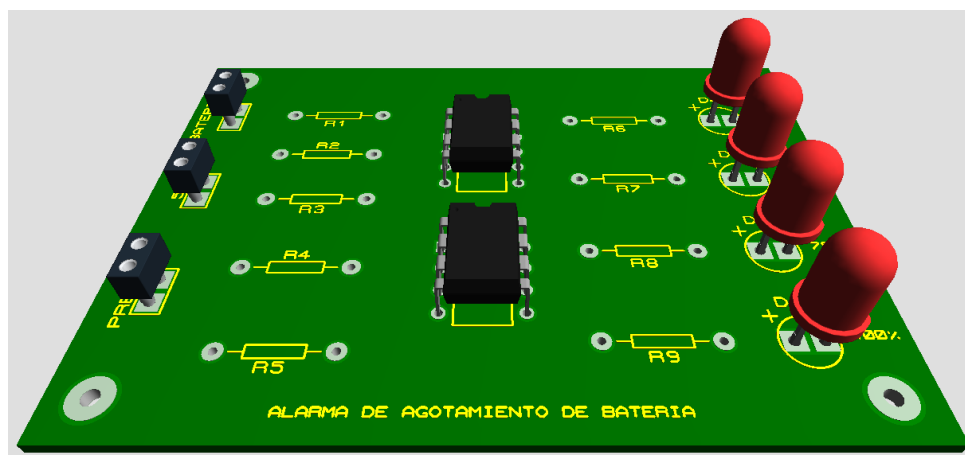
**Figura 81** Circuito esquemático de alarma de agotamiento de batería

En base al circuito esquemático de la Figura 81, se realiza el diseño del circuito impreso, el cual se muestra en la Figura 82.



**Figura 82 Ruteado alarma de agotamiento de batería**

La visualización en 3D del circuito de alarma de agotamiento de batería se muestra en la Figura 83



**Figura 83 Visualización 3D del alarma de agotamiento de batería**

#### **4.5.2 ALARMA ANTI-CHOQUE**

El tema de seguridad y prevención de accidentes en los sistemas robotizados, suele tratarse de manera marginal en casi todos los textos y demás fuentes de información que existen sobre robots industriales.

Las consideraciones sobre la seguridad de sistemas con robots móviles cobran especial importancia fundamentalmente porque la creencia de que el robot posee mayor índice de riesgo a un accidente que otra máquina de características similares. La realidad, sin embargo, es que el número de accidentes ocasionados por los robots industriales es bajo, existiendo pocos datos al respecto, siendo pocos los países que cuentan con suficiente información al respecto.

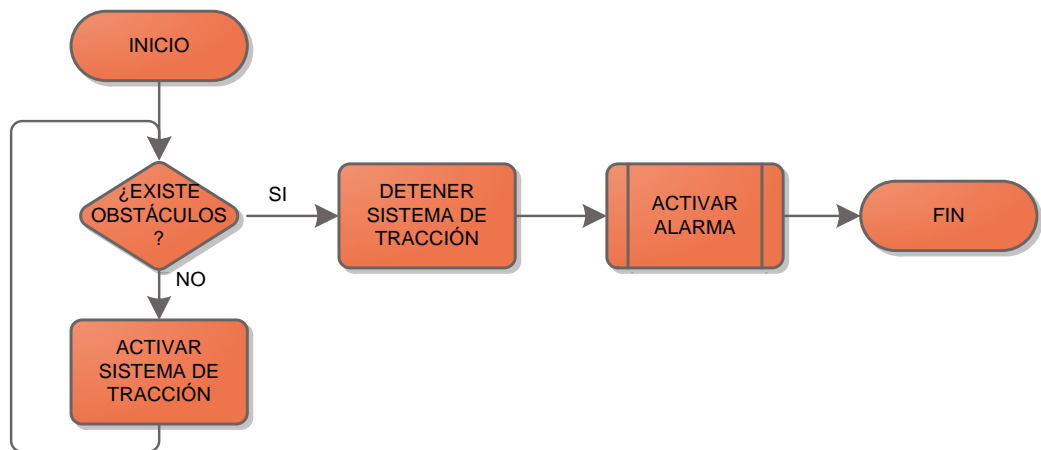
Es importante considerar que según estudios realizados por el instituto de Investigaciones de Seguridad en el Trabajo de Tokio, el 90% de los accidentes ocurren durante las operaciones de mantenimiento, ajuste, programación, etc., mientras que solo el 10% ocurre durante el funcionamiento normal de la línea. (Olimpiadas Nacionales de Contenidos Educativos en Internet, 2001)

Al disponer un robot móvil para el proceso de enfardado, el peligro inminente es que este colisione contra algún objeto o peor aún contra una persona, comprometiendo la integridad de ésta y de la máquina. Para ello se sugiere el diseño de una alarma anti-choque que reduzca la cantidad de colisiones.



Esta alarma se basa en dos sensores de presencia colocados en la parte frontal de la máquina. Al detectar un obstáculo a una distancia menor a 100 cm de la enfardadora, hace que ésta se detenga por completo hasta que el obstáculo sea removido. Después el operario deberá aplastar el botón de inicio para continuar con el proceso de enfardado

La lógica de funcionamiento de la alarma anti-choque se indica en la Figura 84



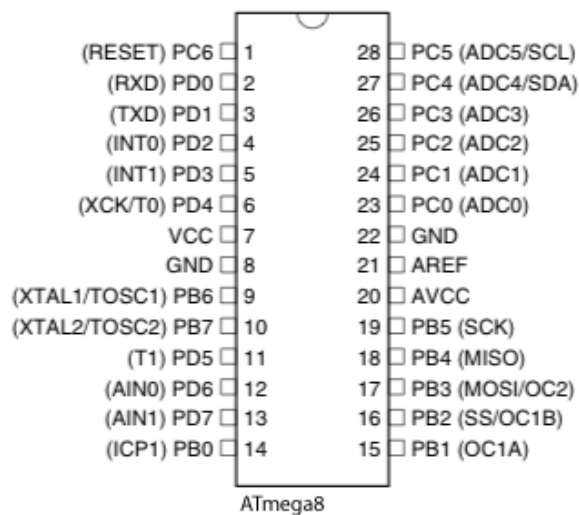
**Figura 84** Diagrama de flujo – Alarma anti-choque

#### 4.5.2.1 Diseño del circuito impreso de la alarma anti-choque

Un micro-controlador se requiere para obtener la lectura de los sensores ultrasónicos. La placa micro-procesada Sainsmart basada en un micro-controlador AVR ATMEGA 2560 tiene las suficientes entradas, salidas, capacidad de memoria y de procesamiento para realizar la medición de distancia. Pero en este caso, se sugiere crear una nueva placa micro-procesada. De esta manera, la placa Sainsmart se encarga solamente de la

programación del panel táctil y del sistema de control de la enfardadora; y es liberada de la tarea de detección de alarmas

El sistema de alarma anti-choque requiere un micro-controlador con dos pines digitales por cada sensor ultrasónico empleado (4 pines en total) y 2 pines digitales para enviar la señal de alarma a la placa Sainsmart. Es decir, solamente 6 pines digitales son requeridos.

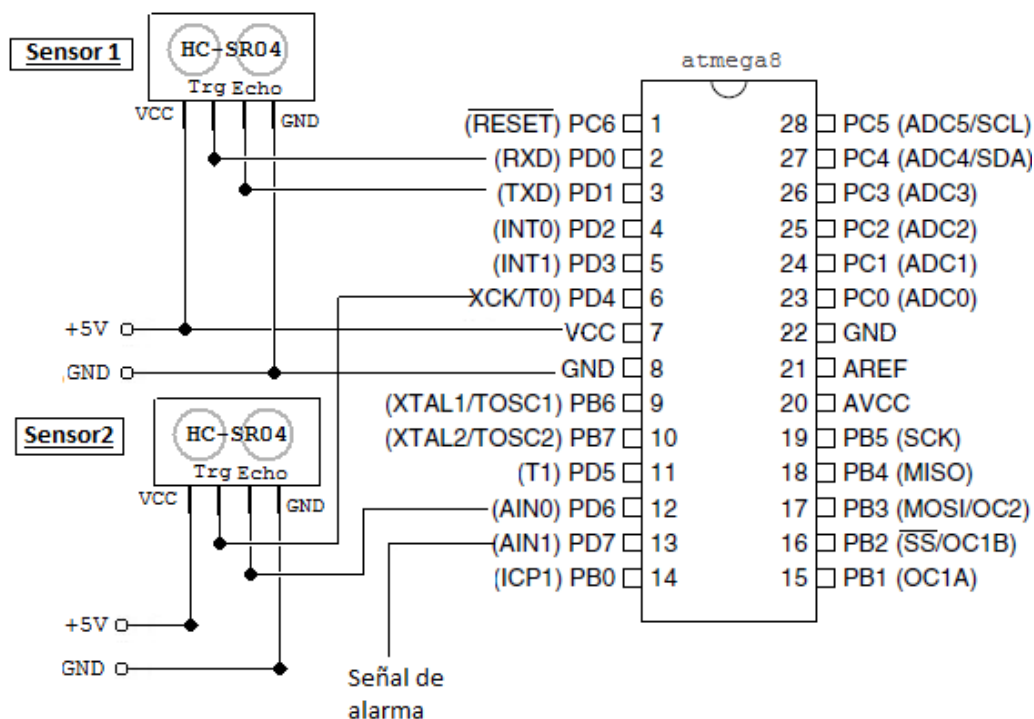


**Figura 85 Pines del AVR ATMEGA 8**

Fuente: (arduino, 2013)

El AVR ATMEGA 8 (Figura 85) viene en un encapsulado de 28 pines con 18 entradas / salidas digitales y una memoria interna de 8 Kbytes. Este micro-controlador es uno de los más simples, baratos y de mayor disponibilidad en el mercado. Por estas razones, se selecciona este elemento para la implementación de la alarma anti-choque.

El circuito esquemático de la alarma anti-choque se puede ver en la Figura 86



**Figura 86 Circuito esquemático de la alarma anti-choque**

Fuente: (Uktveris, 2012)

El sensor 1 se ubica en la parte frontal derecha y el sensor 2 en la parte frontal. Además, estos sensores no requieren ningún tipo de acondicionamiento y sus pines se conectan directamente al microcontrolador.

La señal de alarma se activa enviando una señal en alto (uno lógico) cuando uno de los dos sensores detecta un obstáculo durante el recorrido de la máquina.

La placa Sainsmart recibe la señal de alarma por medio del pin 13 del ATMEGA 8 y detiene la enfardadora hasta que el obstáculo sea retirado del camino del robot.

La Figura 87 muestra el diseño del circuito impreso para la alarma anti-choque

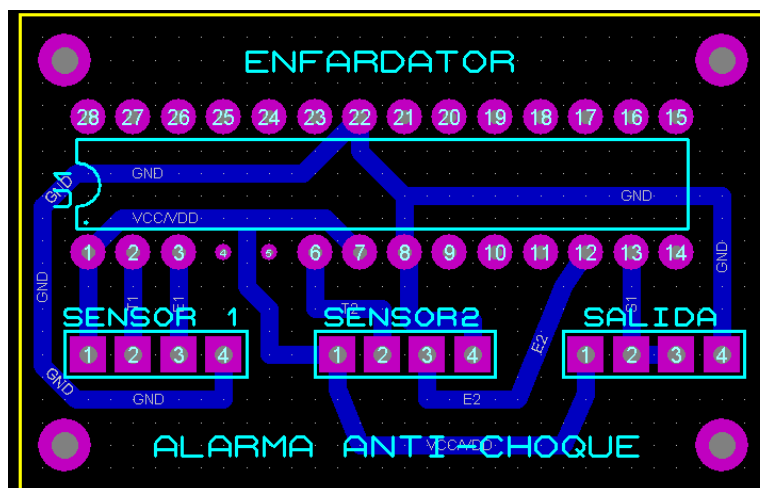


Figura 87 Ruteado de pistas de la alarma anti-choque

La visualización en 3D de la placa impresa se muestra en la Figura 88

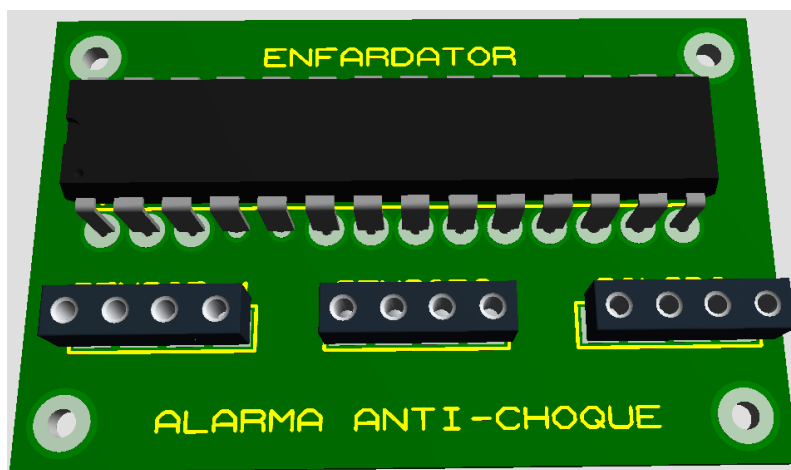


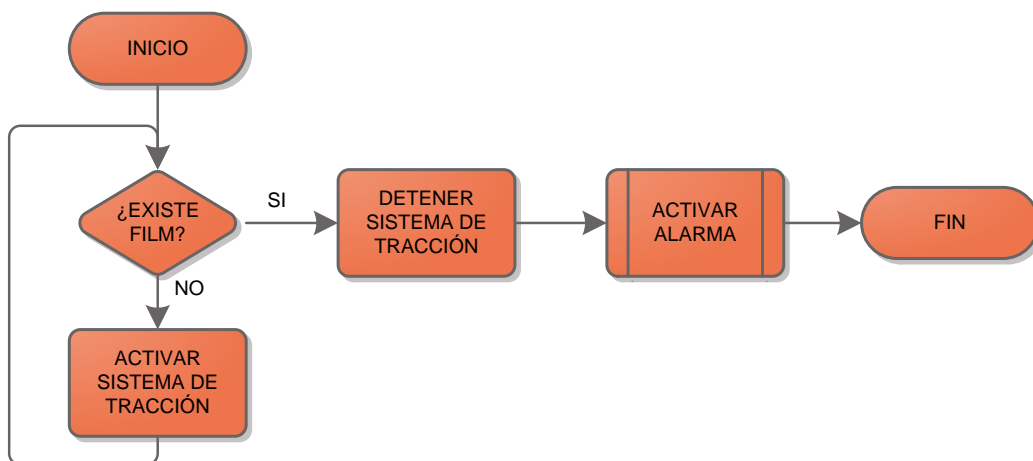
Figura 88 Visualización 3D del alarma anti-choque

### 4.5.3 ALARMA DE ROTURA DE LA PELÍCULA EXTENSIBLE

La película extensible es un plástico transparente y extremadamente delgado que por una mala calibración del sistema de pre-estiramiento o impurezas en los rodillos de goma o soportes metálicos puede romperse. Incluso si la carga sobre el palé tiene elementos filosos podría comprometer la integridad de ésta.

En estos casos la enfardadora debe detectar una rotura de la película extensible, para que la máquina se detenga y no continúe con su recorrido alrededor del palé. Para ello es necesaria la selección de un sensor de presencia, colocado a la salida del sistema de pre-estiramiento, que sea capaz de detectar objetos transparentes.

La lógica de funcionamiento se indica en Figura 89.



**Figura 89 Diagrama de flujo – Alarma rotura de film**

#### 4.5.3.1 Diseño del circuito impreso de rotura o agotamiento del film

En el afán de optimizar recursos y disminuir costos de producción, se ha decidido que el circuito impreso para la detección de rotura o agotamiento de film extensible tenga una función adicional. En este caso, esta placa también sirve para la detección de la altura de la carga.

Esta decisión se toma debido a que los sensores implicados en estas dos tareas se ubican en el sistema de pre-estiramiento, y por tanto, están a una distancia corta entre sí. El diagrama esquemático para este circuito impreso se muestra en la Figura 90

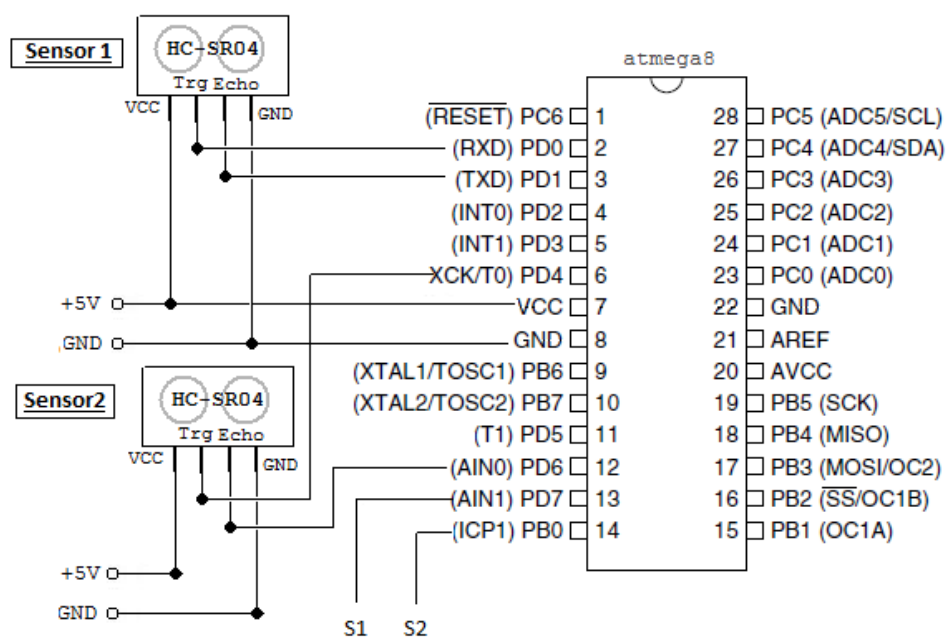


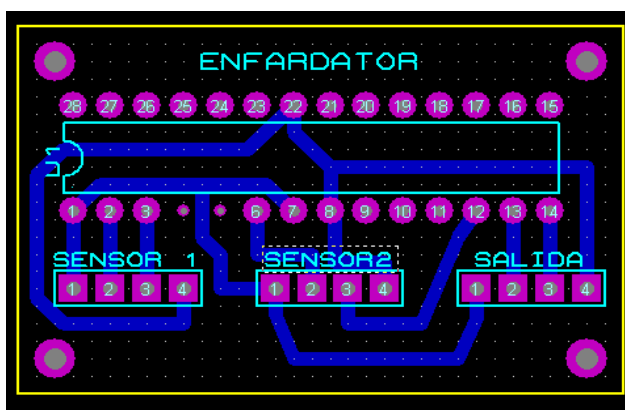
Figura 90 Circuito esquemático

Se puede observar claramente el parecido entre este circuito y el descrito en la Figura 86. La diferencia radica en que el presente esquema,

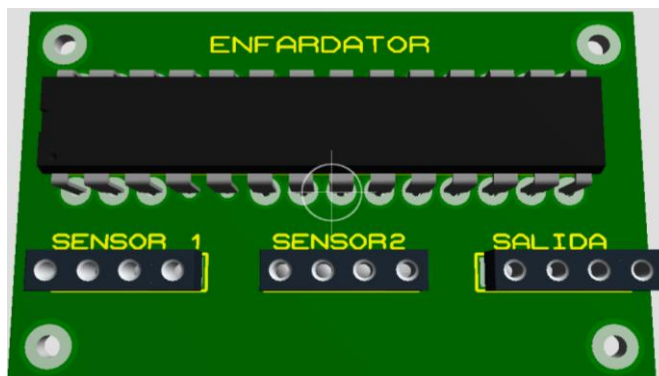
presenta dos señales de salida que van hacia la placa Sainsmart, mientras que el circuito anterior tenía solo una señal de salida (Figura 90)

El sensor 1 es el encargado de la detección de rotura o agotamiento del film extensible y la señal de salida S1 corresponde a la activación de su alarma. Mientras que el sensor 2 y la señal S2 corresponden a la detección de la altura de la carga.

La Figura 91 muestra el ruteado de las pistas del alarma de rotura de la película extensible, mientras que la Figura 92 muestra su visualización en 3D.



**Figura 91 Ruteado de pistas**



**Figura 92 Visualización 3D del circuito impreso**

## 4.6 INTERFAZ HUMANA

La configuración de parámetros de control como: velocidad del mástil, modo de envoltura, entre otros; se requiere al inicio del funcionamiento de la máquina. Para ello se dispone de una pantalla táctil, que mediante un toque directo sobre su superficie permite la entrada de datos y órdenes al dispositivo. A su vez, actúa como periférico de salida, mostrando los resultados introducidos previamente.

Las pantallas táctiles emplean íconos para facilitar el uso del dispositivo, debido a que el cerebro humano relaciona las imágenes más rápido que las palabras. Permite una interacción más satisfactoria, intuitiva, rápida entre el usuario y la aplicación. Por otra parte, la mano del usuario puede bloquear u obstaculizar algunos contenidos de la pantalla en el momento de usarla. Además en ciertos casos el tamaño de los dedos, así como la grasa acumulada en los mismos puede ser un problema al manipular la pantalla.

Un dispositivo con sistema operativo Android, ya sea Tablet o celular, se propone en este caso. Estos elementos son fáciles de manipular y programar, además poseen una buena resolución y su velocidad de procesamiento es muy alta. A pesar de que no sean elementos robustos y su uso en ambientes industriales sea mínimo, es una nueva tecnología práctica, útil y novedosa que poco a poco se está incluyendo en la industria (Figura 93).





**Figura 93 Pantalla táctil**

Fuente: (Martinez, 2011)

El lenguaje de programación escogido para el dispositivo Android es Appinventor 2. Este programa tiene un entorno visual muy intuitivo, amigable y fácil de usar. Maneja la programación por bloques, razón por la cual las personas que emplean este compilador no necesitan saber programación en Java, C o algún otro lenguaje.

La comunicación entre la interfaz gráfica y la máquina es inalámbrica. Siendo las posibles vías de comunicación por internet, wifi y bluetooth. (Tabla 25)

**Tabla 25 Opciones de comunicación inalámbrica**

|                    | <b>INTERNET</b> | <b>WIFI</b> | <b>BLUETOOTH</b> |
|--------------------|-----------------|-------------|------------------|
| <b>Costo</b>       | Alto            | Bajo        | Bajo             |
| <b>Alcance</b>     | Alto            | Medio       | Medio            |
| <b>Complejidad</b> | Alta            | Baja        | Baja             |

Se descarta en primera instancia la comunicación por internet debido a la complejidad de implementación y alto costo. La comunicación por wifi y bluetooth son igual de viables en este caso. Pero se opta por la comunicación por bluetooth, debido a la alta disponibilidad en el mercado ecuatoriano.

El módulo bluetooth más empleado conjuntamente con Arduino se puede apreciar en la Figura 94



Figura 94 Módulo Bluetooth

Fuente: (Wholesale , 2013)

Las características técnicas del módulo bluetooth de la Figura 94 se detallan a continuación:

- Voltaje de alimentación: 3.6 a 6 VDC
- Alcance de la señal: 10 m
- Consumo de corriente máximo: 30 mA
- Comunicación serial: 9600 bauds, 8 bits de datos, 1 bit de parada, sin paridad

La comunicación entre Tablet y enfardadora puede tardar alrededor de 45 segundos en ser inicializada, en ciertos casos este tiempo puede considerarse excesivo. Por ejemplo, si se desea detener la máquina debido a un mal funcionamiento de la misma se requiere una acción inmediata. Por este motivo, se requiere un control remoto secundario, el cual posea un botón de inicio, parada, pausa y reinicio. A continuación se muestra una tabla comparativa de las alternativas para la implementación de este sistema (Tabla 26)

**Tabla 26 Selección del tipo de comunicación del control remoto**

| <b>CARACTERÍSTICA</b>                      | <b>INFRA-ROJO</b> | <b>BLUETOOTH</b> | <b>RADIO<br/>FRECUENCIA</b> |
|--|-------------------|------------------|-----------------------------|
| <b>Detección en lugares con obstáculos</b> | 0                 | 10               | 10                          |
| <b>Alcance</b>                             | 2                 | 7                | 10                          |
| <b>Costo</b>                               | 9                 | 9                | 9                           |
| <b>Consumo</b>                             | 9                 | 9                | 9                           |
| <b>Susceptibilidad al ruido</b>            | 8                 | 8                | 8                           |
| <b>TOTAL</b>                               | 28                | 44               | 46                          |

Calificaciones:

8 - 10 (muy bueno), 7 - 5 (regular), 4 - 2 (malo), 1 - 0 (no posee)

Debido a que la enfardadora realiza un recorrido alrededor del palé, no existe una línea de vista directa entre el usuario y el robot. Por esta razón, la tecnología requerida para el control remoto en este caso debe funcionar perfectamente en lugares con obstáculos, es decir, la señal generada por el emisor debe llegar al receptor a pesar de los objetos existentes entre el operario y la máquina. Bajo esta consideración el control remoto por infrarrojo queda descartado.

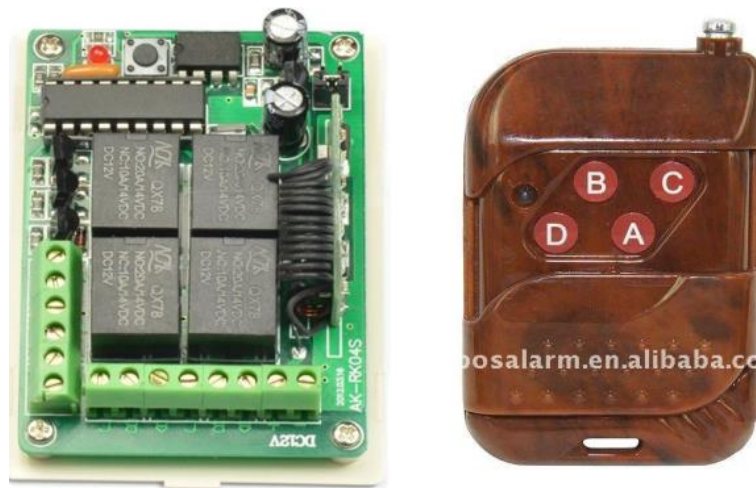
Los módulos Bluetooth y RFID cumplen con las características necesarias para ser implementados en este proyecto. Se escoge la comunicación por radio frecuencia debido a su bajo costo.

El módulo emisor XY-FST y el receptor XY-MK-5V se escogen debido a que tienen un bajo precio, gran alcance y son los de mayor disponibilidad en el mercado ecuatoriano.

El emisor trabaja a una frecuencia de 433.92 MHz con una tasa de transferencia de datos de 4kB/s. Además tiene un rango de voltaje de alimentación de 3.5 a 12VDC con una distancia de transmisión de 20 a 200 metros dependiendo del voltaje. Es decir, un mayor voltaje de entrada permite que el dato se pueda transmitir a una mayor distancia.

El receptor tiene un voltaje de trabajo de 5VDC y lógicamente un funcionamiento a 433.92 MHz al igual que el emisor.

En la Figura 95 se puede observar el circuito impreso y el mando remoto del sistema de comunicación por radiofrecuencia.



**Figura 95 Control remoto**

Fuente: (alibaba, 2013)

## 4.7 UNIDAD DE CONTROL

Dispositivos electrónicos generalmente placas micro-controladas, sistemas embebidos son usados para manipular, interpretar y transformar las señales de voltaje y corriente provenientes de los transductores para accionar un módulo de salida o actuador.

De las especificaciones obtenidas durante este capítulo, se determina el número de entradas y salidas digitales, pines PWM y de comunicación que la unidad de control debe poseer para poder controlar de una manera eficiente el proceso de enfiado. (Tabla 27)

Tabla 27 Pines requeridos para la unidad de control

|                                 | PINES         |          |              | CANTIDAD  |
|---------------------------------|---------------|----------|--------------|-----------|
|                                 | I/O Digitales | PWM      | Comunicación |           |
| Servo de dirección              | 1             |          |              | 1         |
| Servo de corte                  | 1             |          |              | 1         |
| Driver de motor DC 100W         | 1             | 2        |              | 3         |
| Driver de motor DC 25W          | 1             | 2        |              | 3         |
| Comunicación Bluetooth          |               |          | 2            | 2         |
| Sensores ultrasónicos           | 6             |          |              | 6         |
| Finales de carrera alto y bajo  | 2             |          |              | 2         |
| Alarmas                         | 3             |          |              | 3         |
| Detección de altura de la carga | 1             |          |              | 1         |
| Control Rf                      | 4             |          |              | 4         |
| Entradas de expansión (extras)  | 3             |          |              | 3         |
| <b>TOTAL</b>                    | <b>23</b>     | <b>4</b> | <b>2</b>     | <b>29</b> |

En los últimos años el uso de micro-controladores PIC ha ido decayendo drásticamente siendo los AVR's los elementos más empleados actualmente en proyectos de electrónica.

Los AVR presenta una mayor velocidad de procesamiento, mayor capacidad de memoria y su costo es menor que los PIC. Por estas razones se recomienda la utilización de un AVR para que sea el encargado de controlar el correcto funcionamiento de la enfardadora.

Existen un sin número de modelos de AVR e igual de lenguajes de programación, pero una marca que sin duda ha revolucionado el mercado y mundo de los micro-controladores es Arduino.

Arduino es un lenguaje de programación gratuito (software libre) que fácilmente puede ser descargado de Internet y no necesita ningún tipo de licencia. La cantidad de información disponible en Internet es inmensa, existen miles de proyectos, tutoriales y todo tipo de ayuda para los interesados en el tema.

Además Arduino también posee varios modelos de placas micro-controladas que permiten una fácil implementación de los proyectos. La tarjeta micro-procesada denominada Arduino Mega 2560 (Figura 96), la cual basa su funcionamiento en un AVR ATMEGA 2560 posee 54 entradas/salidas digitales (14 de estas pueden ser empleadas como salidas PWM), 16 entradas análogas, 4 puertos de comunicación serial, funcionamiento a 16MHZ, conexión USB, entre otras características. (Tabla 28)



**Figura 96 Arduino Mega 2560**

Fuente: (arduino, 2013)

**Tabla 28 Características Placa Arduino Mega 2560**

| <b>Microcontroladores Atmega2560</b> |   |
|--------------------------------------|---|
| <b>Voltaje de funcionamiento</b>     | 5V  |
| <b>Voltaje de entrada</b>            | 7-12V   |
| <b>Voltaje de entrada (límites)</b>  | 6-20V   |
| <b>Pines E / S digitales</b>         | 54 (de los cuales 15 proporcionan PWM)          |
| <b>Pin es de entrada analógica</b>   | 16  |
| <b>DC Corriente por I / O Pin</b>    | 40 mA   |
| <b>Corriente CC para Pin 3.3V</b>    | 50 mA   |
| <b>Memoria Flash</b>                 | 256 KB de los cuales 8 KB usados por bootloader |
| <b>SRAM</b>                          | 8 KB  |
| <b>EEPROM</b>                        | 4 KB  |
| <b>Velocidad del reloj</b>           | 16 MHz  |

Fuente: (arduino, 2013)

Cabe destacar que un sin número de placas micro-procesadas basadas en distintos AVR o PIC cumplen con los requerimientos de la Tabla 27, en este caso se opta por Arduino debido a que es el lenguaje de programación más empleado por los desarrolladores de este proyecto.

La Figura 97 muestra el diagrama a bloques del sistema electrónico



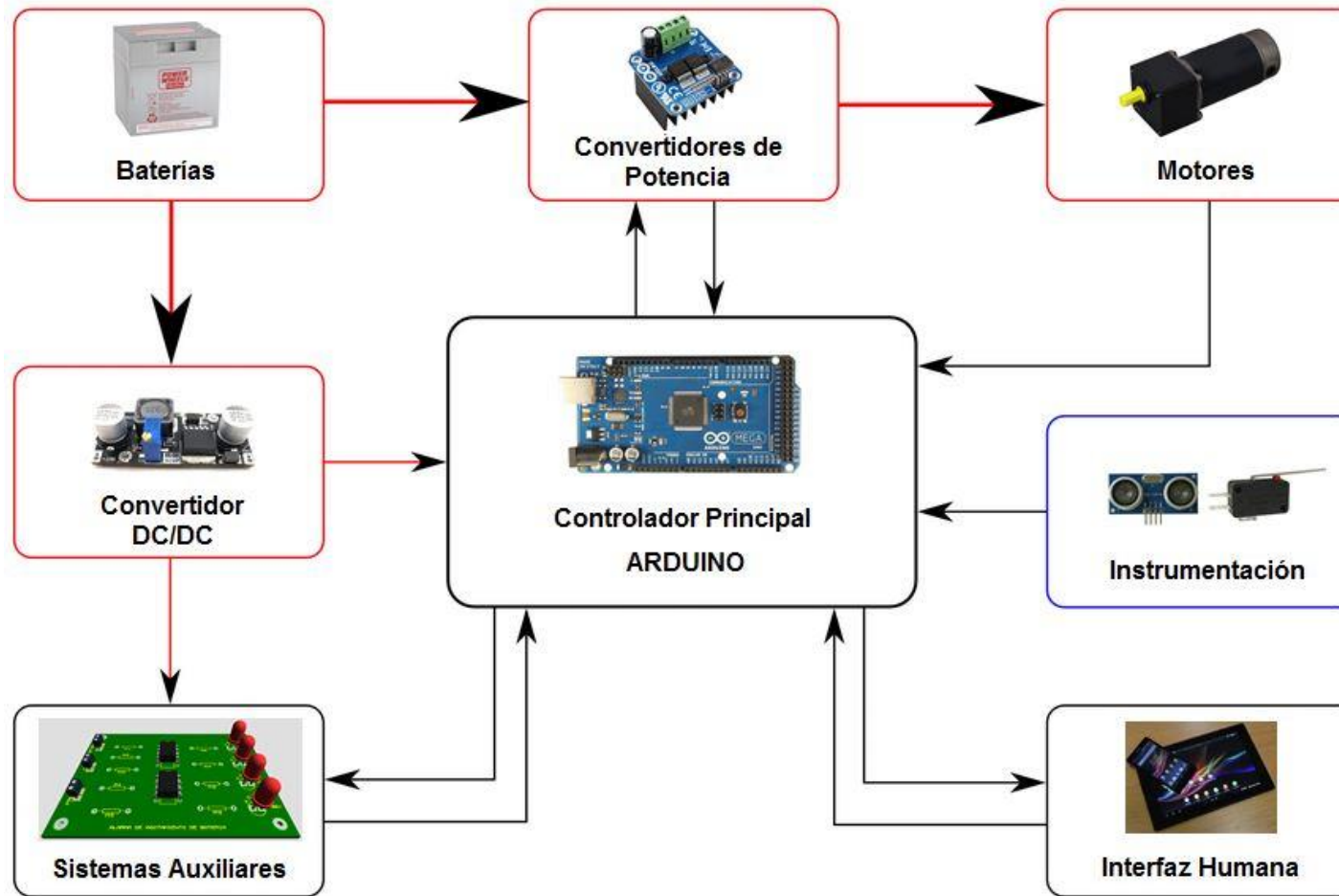


Figura 97 Diagrama de bloques del sistema electrónico

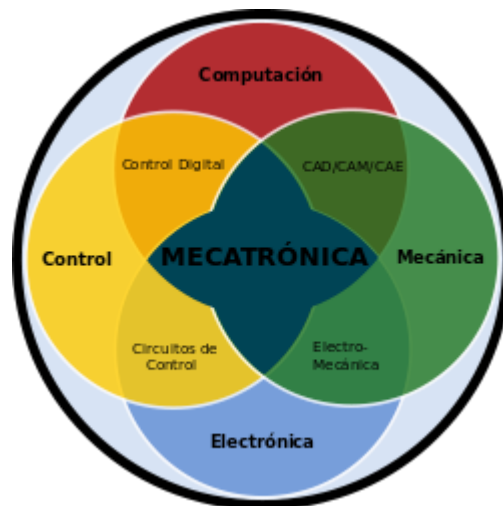
## CAPÍTULO V

### SISTEMA MECATRÓNICO

La UNESCO define a la Mecatrónica como:

"La integración sinérgica de la ingeniería mecánica con la electrónica y el control inteligente por computadora en el diseño y manufactura de productos y procesos" (Figura 98) (ESPE, 2013)

Dicha integración se la va a desarrollar durante este capítulo, donde se utilizan los sistemas descritos en capítulos anteriores como el sistema mecánico, eléctrico, electrónico y de control en la sinergia de los sistemas y subsistemas que conforman la máquina.



**Figura 98 Representación gráfica de la mecatrónica**

Fuente: (Bolton, 2005)

## **5.1 DEFINICIÓN DE SISTEMA MECATRÓNICO**

Un sistema mecatrónico es aquel sistema digital que recoge señales, las procesa y emite una respuesta por medio de actuadores, generando movimientos o acciones sobre el sistema en el que se va a actuar.

Al comenzar a trabajar con sistemas mecatrónicos es fácil confundirse con los sistemas mecánicos, eléctricos, electrónicos o de control. Cuando en realidad un sistema mecatrónico es la unión de los sistemas anteriores.

Los robots, las máquinas controladas digitalmente, los vehículos guiados automáticamente, etc. se deben considerar como sistemas mecatrónicos y en este caso la máquina enfardadora semiautomática también.

## **5.2 INTEGRACIÓN DE SISTEMAS**

Los sistemas mecatrónicos están integrados por sensores Figura 99, controladores Figura 100 y actuadores Figura 101.

A continuación se indica los elementos usados para el desarrollo del sistema mecatrónico:

## 5.2.1 ELEMENTOS SENSORIALES

Tabla 29 Funciones a sensor

| FUNCIÓN  | VARIABLE A MEDIR |
|--|------------------|
| Proximidad del robot al palé                                 | Distancia        |
| Altura de la carga   | Distancia        |
| Anti-choque  | Distancia        |
| Rotura de film extensible                                    | Presencia        |
| Posición máxima y mínima del carro porta bobina en el mástil | Presencia        |
| Nivel de carga de la batería                                 | Voltaje          |



Figura 99 Elementos Sensoriales

## 5.2.2 ELEMENTOS DE CONTROL

Tabla 30 Funciones a controlar

| FUNCIONES                                  | VARIABLE CONTROLADA | TIPO DE CONTROL |
|--|---------------------|-----------------|
| Dirección de la máquina alrededor del palé | Posición            | Lazo Cerrado    |
| Corte automático de la película extensible | Posición            | Lazo abierto    |
| Movimiento de ruedas traseras              | Velocidad           | Lazo abierto    |
| Movimiento vertical del carro porta bobina | Velocidad           | Lazo abierto    |
| Pre-estiramiento de la película extensible | Velocidad           | Lazo abierto    |

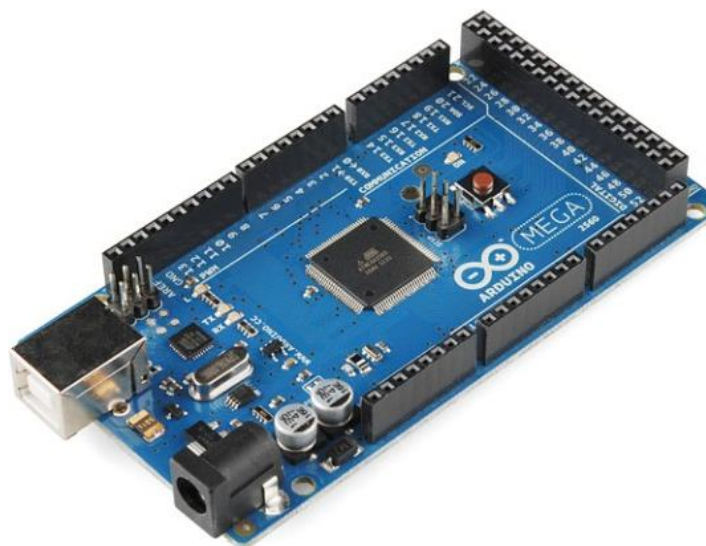


Figura 100 Elemento de control principal

Fuente: (arduino, 2013)

### 5.2.3 ELEMENTOS ACTUADORES

Tabla 31 Funciones actuadores

| FUNCIÓN                                      | ELEMENTO<br>DE CONTROL | SISTEMA          | SUBSISTEMA |
|--|------------------------|------------------|------------|
| Dirección del robot<br>alrededor del palé    | Servomotor             | Locomoción       | Dirección  |
| Desplazamiento del<br>robot                  | Motor DC               | Locomoción       | Tracción   |
| Desplazamiento del<br>carro porta bobina     | Motor DC               | Elevación        |            |
| Pre estiramiento de<br>la bobina de plástico | Motor DC               | Pre estiramiento |            |
| Corte de la bobina<br>de plástico            | Servomotor             | Pre estiramiento | Corte      |



Figura 101 Actuadores

## **5.3 SISTEMA DE CONTROL**

Los actuadores presentes en los sistemas mecánicos previamente descritos (Figura 16) requieren un control de posición o velocidad. En esta sección se detalla los elementos y técnicas a emplearse para controlar cada uno de estos sistemas; así como la creación de circuitos impresos y la implementación de un armario eléctrico y un control remoto.

### **5.3.1 SISTEMA DE LOCOMOCIÓN**

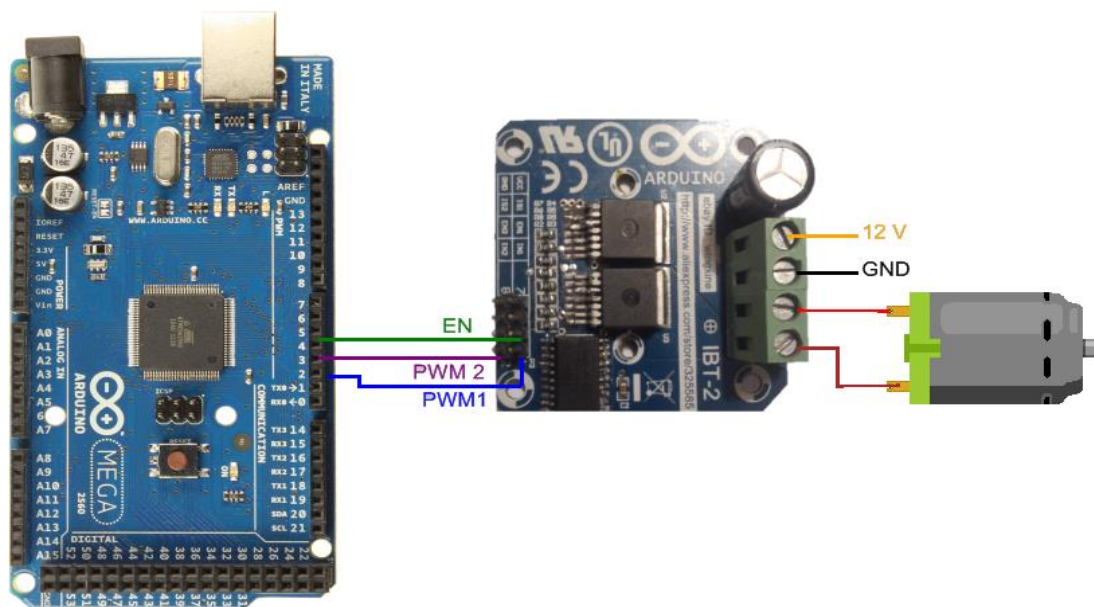
El sistema de locomoción consta de dos partes: el movimiento lineal producido por las ruedas traseras y la dirección guiada por las ruedas delanteras.

#### **5.3.1.1 Sistema de tracción**

Los motores DC acoplados en los ejes de las ruedas tendrán un control en lazo abierto (Tabla 6). Es decir, no existe una retroalimentación, razón por la cual no es necesario el uso de sensores para medir la velocidad. Se toma la decisión de implementar un control en lazo abierto debido a que la carga que los motores deben impulsar es prácticamente constante a lo largo del proceso. El desgaste del film extensible es el único valor que afecte el peso total de la máquina, pero su influencia en el sistema es mínima.

El usuario desde la interfaz gráfica es capaz de seleccionar la velocidad lineal de la máquina de las siguientes 3 opciones: alta, media y baja. La velocidad es controlada desde el micro-controlador mediante modulación de ancho de pulsos (PWM).

La conexión del driver empleado en el sistema de tracción se muestra en la Figura 102



**Figura 102 Diagrama de conexión del sistema de tracción**

Cabe recalcar que las dos señales de habilitación del driver provienen del mismo pin del micro controlador. La Tabla 32 muestra la correcta combinación entre las señales EN, PWM1 y PWM2 para producir el sentido de giro y la velocidad deseada.

**Tabla 32 Entradas del driver del sistema de tracción**

| EN | IN1  | IN2  | MOTOR    |
|----|------|------|----------|
| 1  | PWM1 | 0    | Adelante |
| 1  | 0    | PWM2 | Reversa  |
| 0  | X    | X    | Detenido |



La variación del ciclo de PWM permite obtener la velocidad requerida, empíricamente se halló que es necesario un 59% de PWM para que la máquina venza la inercia e inicie su movimiento. Además se estableció la relación entre PWM y velocidad de avance, la cual es mostrada en la Tabla 33

**Tabla 33 Velocidad de avance vs PWM**

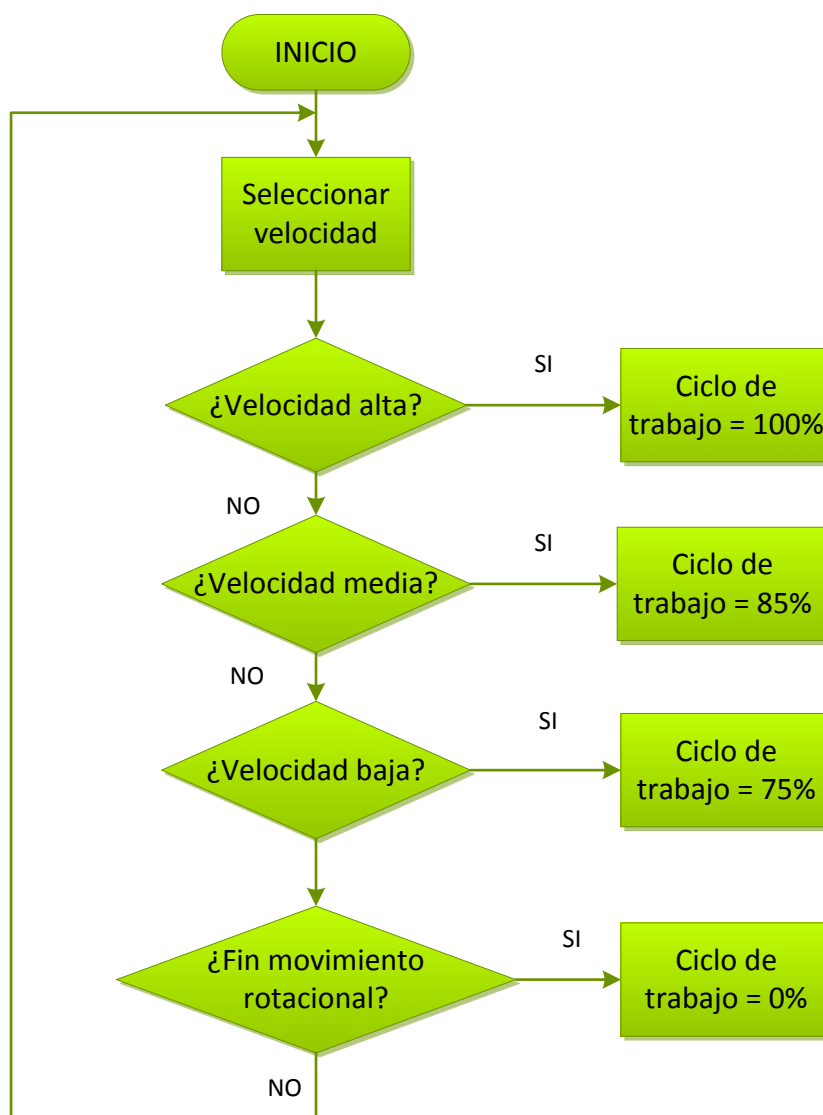
| PWM (%) | VELOCIDAD (m/min) |
|---------|-------------------|
| 100     | 48.0              |
| 85      | 46.2              |
| 65      | 30.6              |
| 59      | 28.2              |
| 58      | 0                 |

En base a los datos mostrados en la Tabla 33, se designa las tres velocidades de avance programables desde la interfaz gráfica (Tabla 34)

**Tabla 34 Velocidad de avance de la máquina**

| PWM (%) | VELOCIDAD (m/min) | VELOCIDAD PROGRAMABLE |
|---------|-------------------|-----------------------|
| 100     | 48.0              | Alta                  |
| 85      | 46.2              | Media                 |
| 65      | 30.6              | Baja                  |

La lógica de control que presenta el sistema de tracción se detalla en la Figura 103:

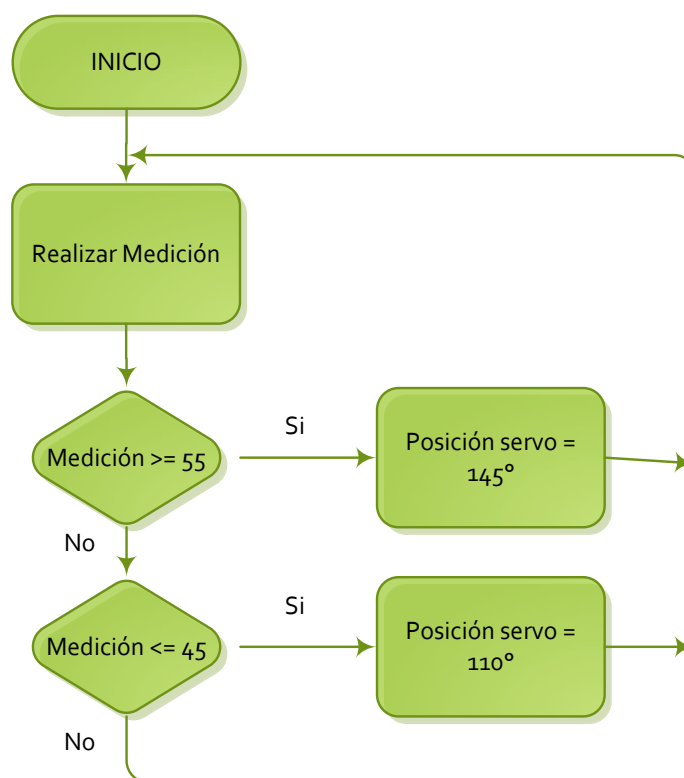


**Figura 103 Diagrama de flujo del sistema de tracción.**

### 5.3.1.2 Sistema de dirección

Se requiere la presencia de un sensor de distancia con un rango de medida de 5 a 60 cm para detectar y controlar la proximidad del robot a la máquina mediante un servomotor.

Las cargas ubicadas sobre el palé son cajas de cartón, por esta razón se necesita sensores de proximidad o distancia que sean capaces de detectar este tipo de material. En puntos previos, el sensor ultrasónico HC-SR04 ha sido designado el sensor óptimo para realizar mediciones de distancia de hasta 400cm, y en este caso también será implementado.



**Figura 104 Diagrama de flujo del control de dirección**

La lógica del sistema de control empleado para la dirección del robot alrededor del palé se representa en el siguiente diagrama de flujo ( Figura 104).

### **5.3.2 SISTEMA DE PRE-ESTIRAMIENTO**

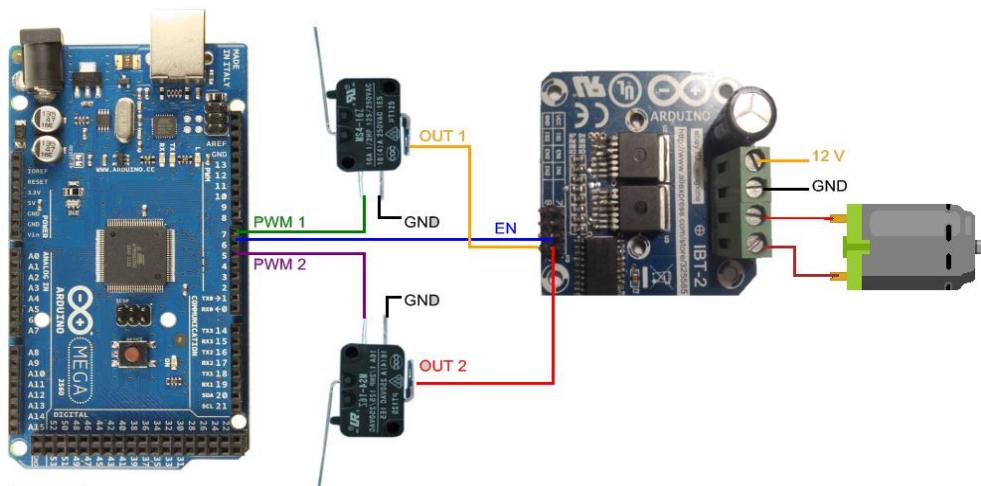
El pre-estiramiento del film extensible se realiza por medio de la variación de velocidad existente los motores acoplados a los rodillos. Este sistema tiene por objetivo aprovechar al máximo el uso del film disminuyendo el consumo del mismo en el proceso de enfardado.

Experimentalmente se halló que al momento de empezar el movimiento del robot alrededor del pallet el film en su intento por salir realizaba un trabajo, durante el cual se producía un estiramiento, provocando el movimiento de los rodillos acoplados a los motores. El torque generado por el recorrido del robot provoca que los motores giren libremente haciendo imposible la tarea de control.

### **5.3.3 SISTEMA DE ELEVACIÓN**

Un motor DC acoplado al tornillo de potencia es el actuador designado para generar el movimiento del sistema de elevación. La velocidad de subida y bajada del sistema se controla mediante PWM con un control en lazo abierto. La velocidad del mástil se configura desde el panel táctil y existen 3 posibilidades (alta, media y baja).

Los finales de carrera detectan el punto más alto y el más bajo del recorrido del sistema de pre-estiramiento en la torre. Mediante la detección de estos sensores, el motor se detiene y de esta manera no se compromete la integridad de la máquina. La Figura 105 muestra la lógica de control del sistema de elevación



**Figura 105 Diagrama de conexión del motor del sistema de elevación**

La Tabla 35 muestra la combinación de las señales PWM1, PWM2 y EN para obtener la velocidad y el sentido de giro requeridos para el motor.

**Tabla 35 Entradas del driver del sistema de elevación**

| EN | IN1  | IN2  | MOTOR    |
|----|------|------|----------|
| 1  | PWM1 | 0    | Subida   |
| 1  | 0    | PWM2 | Bajada   |
| 0  | X    | X    | Detenido |

La velocidad de subida y bajada en función de la variación de PWM del actuador de este sistema se muestra en la Tabla 36

**Tabla 36 Velocidad de la torre vs PWM**

| VELOCIDAD (m/min) |        | % PWM |
|-------------------|--------|-------|
| SUBIDA            | BAJADA |       |
| 1.15              | 1.43   | 100   |
| 0.98              | 1.15   | 85    |
| 0.77              | 0.85   | 75    |
| 0.63              | 0.69   | 65    |
| 0                 | 0.40   | 64    |

En base a los datos de la tabla anterior se ha escogido las 3 velocidades programables desde la interfaz gráfica (Tabla 37)

**Tabla 37 Velocidad de subida y bajada del sistema de elevación**

| PWM (%) | VELOCIDAD (m/min) |        | VELOCIDAD PROGRAMABLE |
|---------|-------------------|--------|-----------------------|
|         | SUBIDA            | BAJADA |                       |
| 100     | 1.15              | 1.43   | Alta                  |
| 85      | 0.98              | 1.15   | Media                 |
| 65      | 0.63              | 0.69   | Baja                  |

La lógica del sistema de control empleado para el control y habilitación del sistema de elevación se muestra en la Figura 106

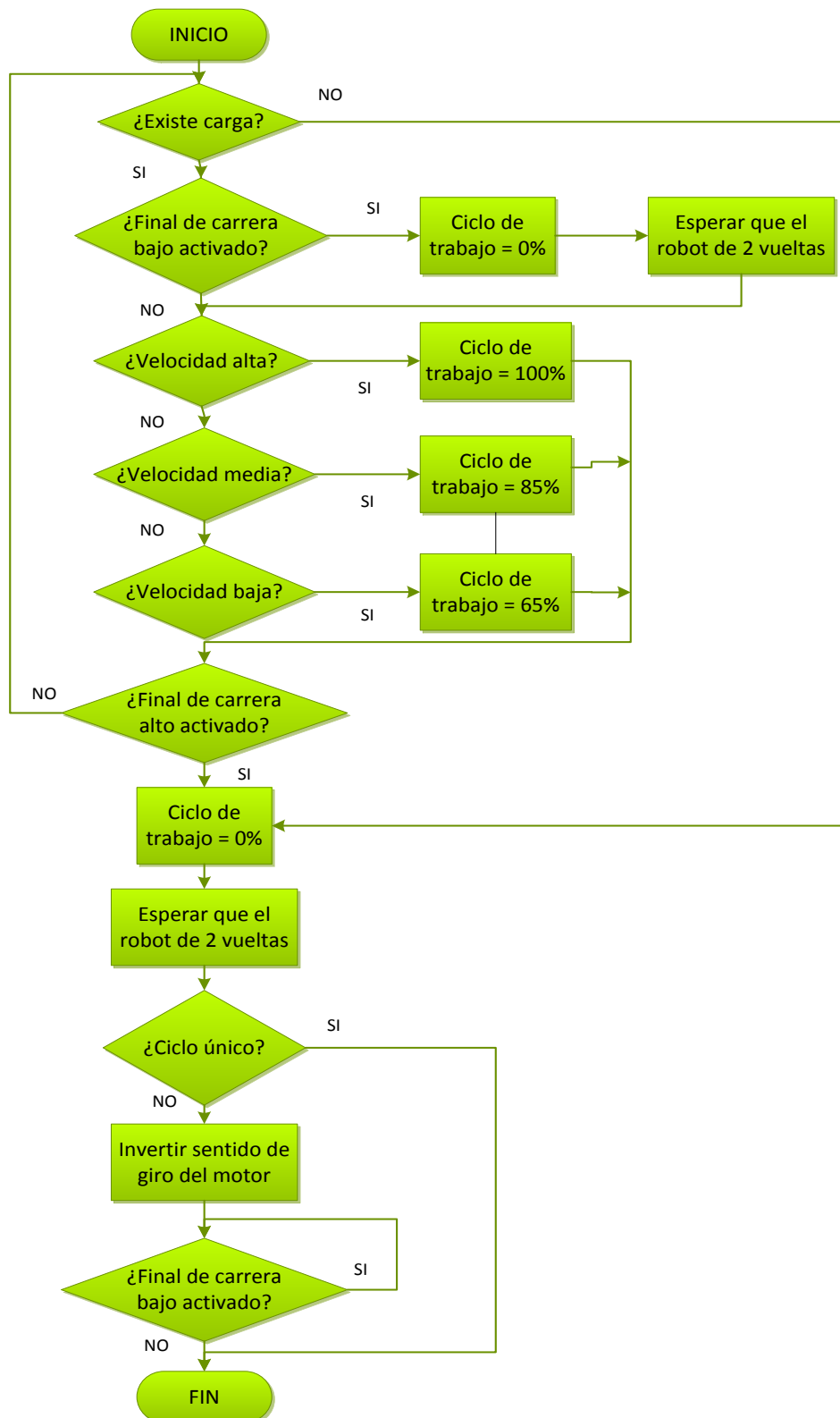
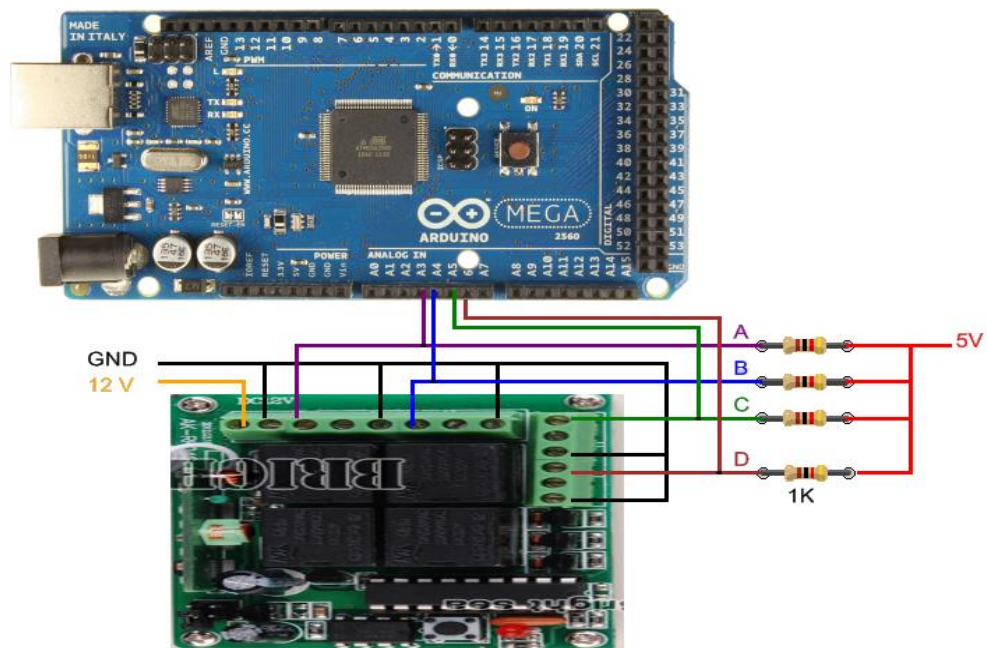


Figura 106 Diagrama de flujo del sistema de elevación.

### 5.3.4 CONTROL REMOTO

La Figura 107 muestra el diagrama de conexión del control remoto.



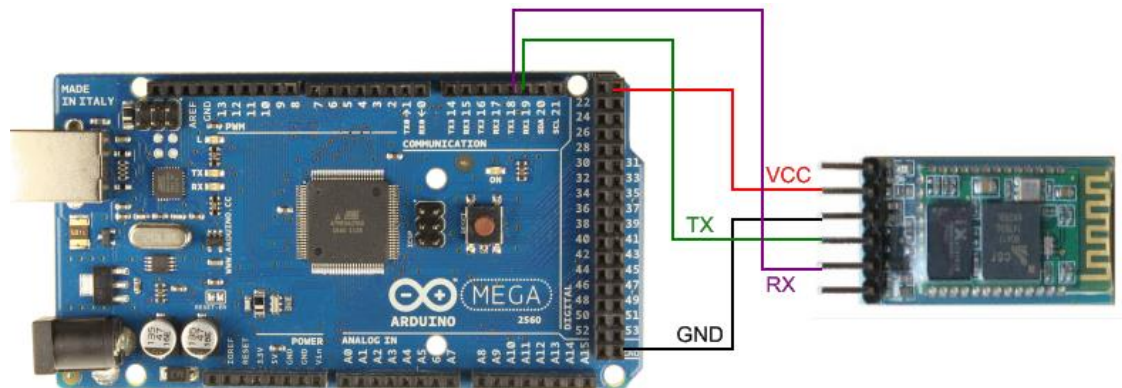
**Figura 107 Diagrama de conexión del control remoto**

Este módulo funciona con una alimentación a 12 VDC y tiene salidas a relé. La lógica está implementada de tal manera que cuando un botón del mando sea presionado, la señal de salida posea un valor de 0 lógico.

### 5.3.5 COMUNICACIÓN ENTRE HMI Y UNIDAD DE CONTROL

El diagrama de conexión del módulo bluetooth se muestra en la Figura





**Figura 108 Diagrama de conexión del módulo bluetooth**

## 5.4 ENSAMBLAJE

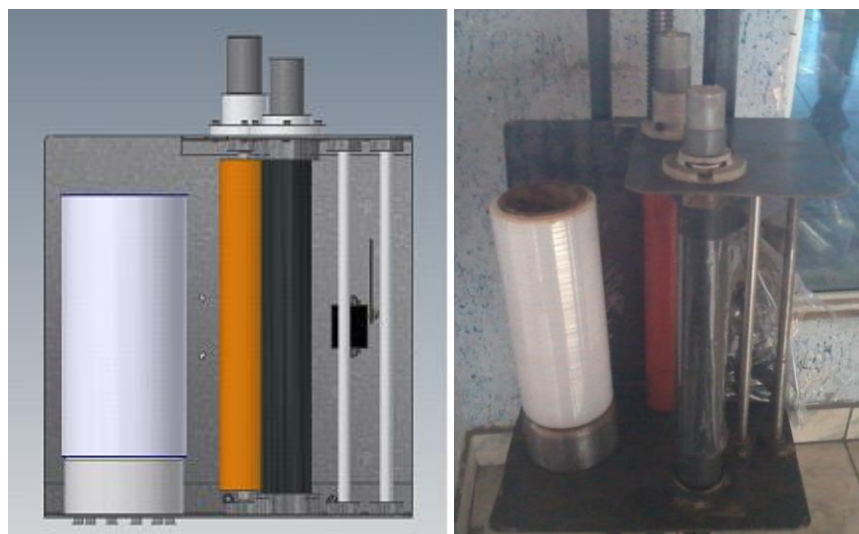
Al finalizar el diseño y construcción de los diferentes sistemas que conforman la máquina enfardadora, es necesaria su integración dentro del sistema, dentro del cual se debe buscar la distribución más adecuada para su correcto funcionamiento.

### 5.4.1 ENSAMBLAJE POR SISTEMAS

En esta sección se indica la distribución de los subsistemas mecánicos que conforman la máquina, así como la distribución de la instrumentación dentro del sistema y su armario eléctrico.

#### 5.4.1.1 Ensamblaje del sistema de pre-estiramiento del film extensible

La Figura 109 presenta una visualización del modelo CAD y el modelo construido.

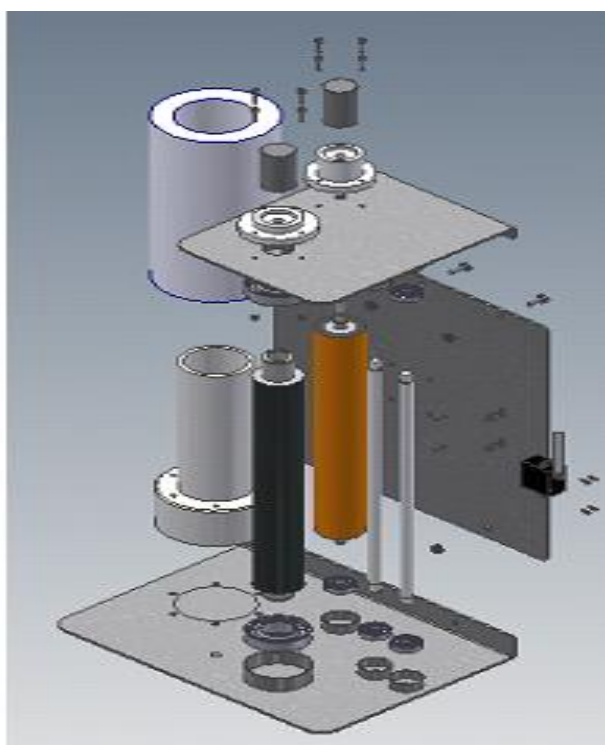


a) Visualización CAD

b) Visualización Real

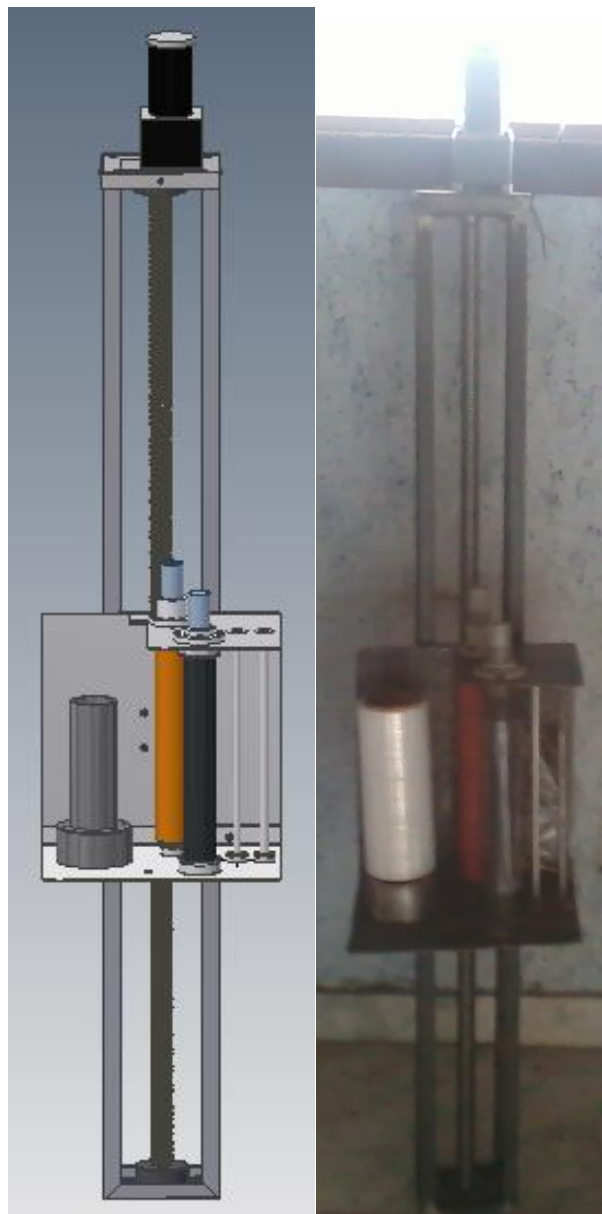
**Figura 109 Sistema de pre-estiramiento**

Un despiece del sistema de pre-estiramiento se muestra en la Figura 110

**Figura 110 Despiece sistema de pre-estiramiento**

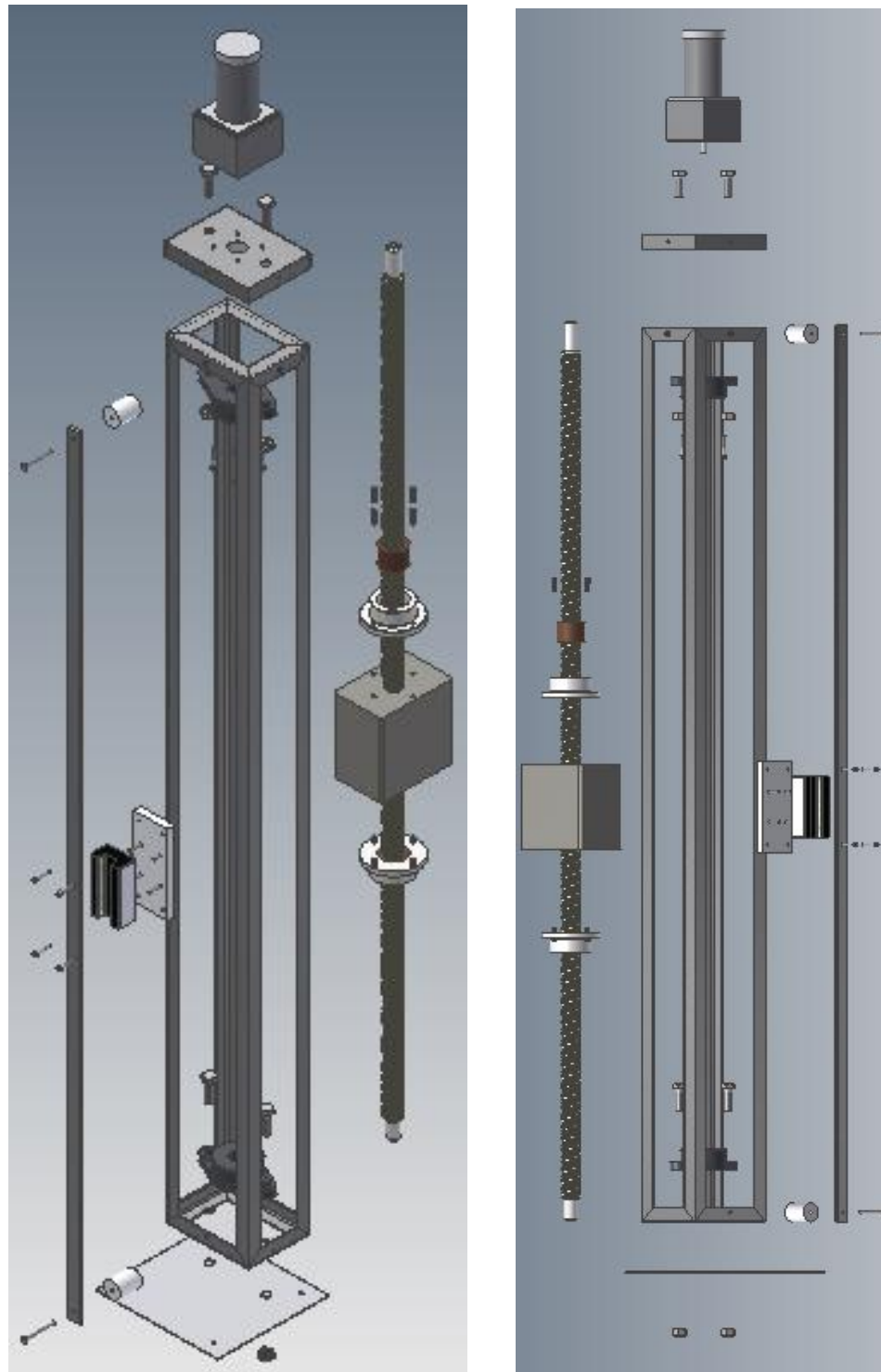
#### 5.4.1.2 Ensamblaje del sistema de elevación

El sistema de pre-estiramiento debe ensamblarse con la torre de elevación. La Figura 111 muestra una comparación del modelo simulado con la vista real del sistema. Mientras que en la Figura 112 se muestra un despiece de este sistema.



a) Visualización CAD b) Visualización Real

Figura 111 Sistema de elevación



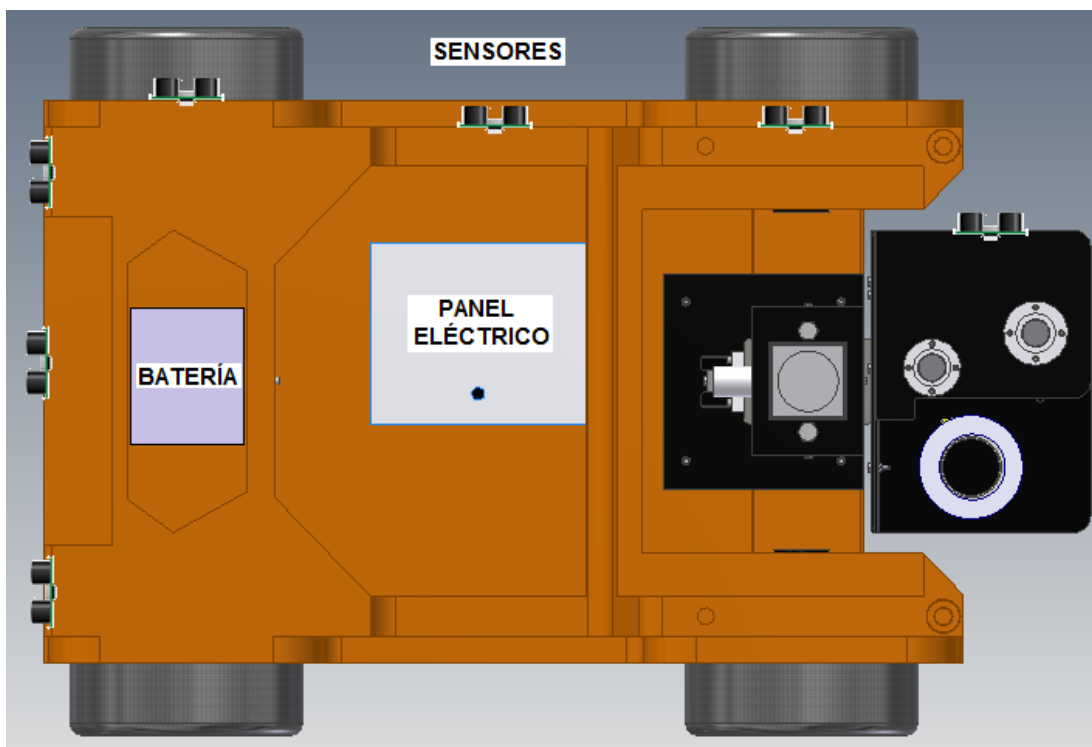
a) Vista en perspectiva

b) Vista lateral

Figura 112 Despiece sistema de elevación

### 5.4.1.3 Distribución de la instrumentación

La distribución de sensores, batería y panel eléctrico sobre el sistema de locomoción se muestran en la Figura 113

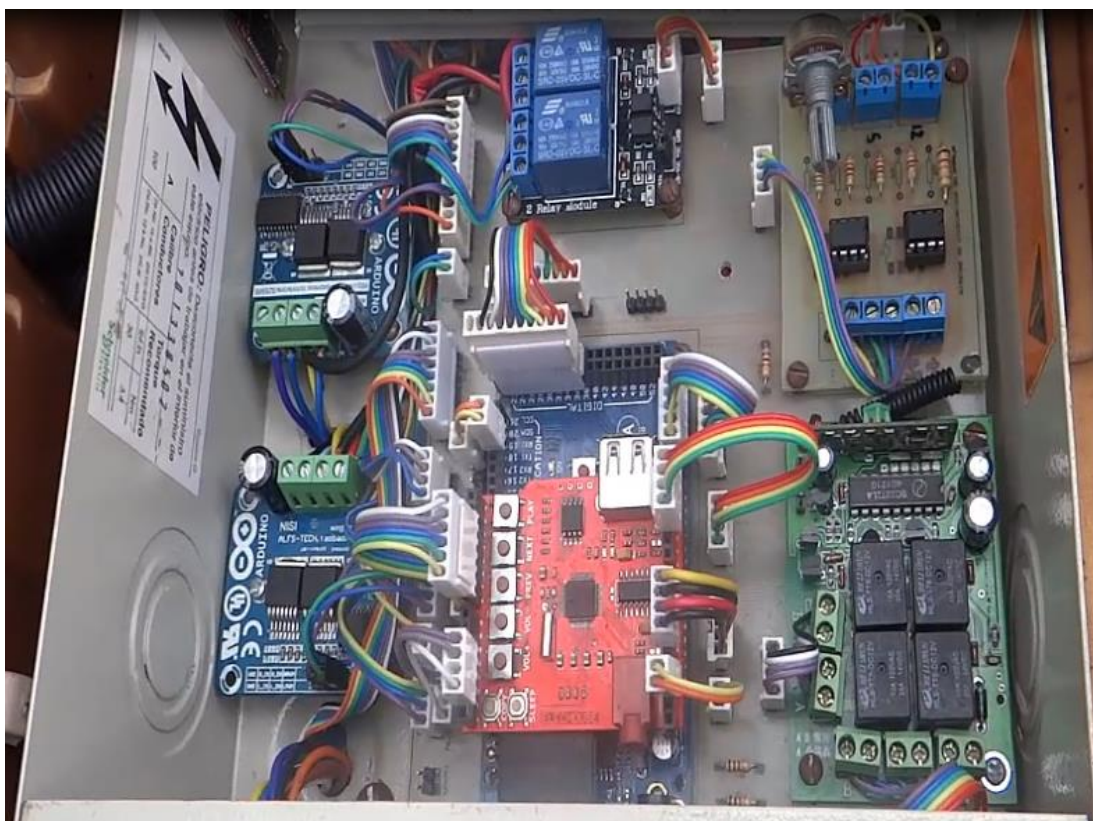


**Figura 113 Distribución de sensores sobre el sistema de locomoción**

Se dispone tres sensores en la parte frontal del sistema para la detección de obstáculos y así evitar colisiones. Además se colocan tres sensores en la parte derecha de la máquina para detectar la proximidad al palé. También se tiene un sensor ultrasónico ubicado sobre el sistema de pre estiramiento para determinar la altura de la carga a enfardar.

## Panel eléctrico

El panel eléctrico contiene los circuitos de control necesarios para otorgar completa autonomía al funcionamiento del robot.



**Figura 114 Distribución del panel eléctrico**

Para delimitar la altura máxima a la que puede ascender el carro portabobinas se utiliza un fin de carrera en la parte superior de la torre de elevación y un fin de carrera en la parte inferior para saber que el sistema se encuentra en su posición inicial. (Figura 115)



**Figura 115 Localización de finales de carrera**

#### **5.4.1.4 Calibración de sensores**

##### ***Alarma de agotamiento de batería***

Una vez armado el circuito se debe calibrarlo, el ajuste se realiza con el potenciómetro RV1 (Figura 116) según el procedimiento descrito a continuación:



**Figura 116 Alarma de agotamiento de batería**

- 1) Girar el potenciómetro totalmente hasta un extremo para que su valor sea cero.
- 2) Asegurarse de que la batería está completamente cargada. Conectarla el circuito respetando la polaridad.
- 3) Girar el potenciómetro hasta que se encienden todos los leds y fijarlo en esa posición.

#### 5.4.2 ENSAMBLAJE FINAL

En la Figura 117 se muestra una comparación entre el diseño CAD y el sistema terminado.



a) Modelo simulado

b) Máquina construida

Figura 117 Comparación entre el modelo simulado y construido



## CAPÍTULO VI

### CALIBRACIÓN, PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se pone a prueba el diseño realizado en los capítulos anteriores. Para lo cual, primero se elabora un protocolo de pruebas, el cual permite determinar si los elementos, sub-sistemas o sistemas funcionan adecuadamente.

#### 6.1 PROTOCOLO DE PRUEBAS

Con la finalidad de verificar el montaje y el correcto funcionamiento de todos los sistemas y subsistemas se detalla a continuación los parámetros de verificación de cada uno de ellos

##### 6.1.1 SISTEMA DE PRE-ESTIRAMIENTO

**Tabla 38 Control del sistema de pre estiramiento**

| TAREA   | CUMPLE |    | OBSERVACIONES  |
|---|--------|----|--|
|   | SI     | NO |  |
| Estiramiento uniforme, continuo y sin arrugas del film extensible | X      |    |  |
| Porcentaje de estiramiento requerido                              |        | X  | La capacidad de elongación no es aprovechada al máximo |

## 6.1.2 SISTEMA DE ELEVACIÓN

Tabla 39 Control del sistema de elevación

| TAREA   | PRUEBA | CUMPLE |    | OBSERVACIONES                                       |
|---|--------|--------|----|---|
|   |        | SI     | NO |   |
| Elevación del sistema de pre-estiramiento a lo largo del mástil         | 1      |        | X  | Ajustar los pernos de la guía del rodamiento lineal |
|   | 2      |        | X  | Ajustar los pernos de las chumaceras                |
|   | 3      |        | X  | Tensar el cable de acero                            |
|   | 4      | X      |    |   |
| Detección del punto más alto del recorrido mediante el final de carrera | 1      | X      |    |   |
| Detección del punto más bajo del recorrido mediante el final de carrera | 1      | X      |    |   |
| Inversión del sentido de giro del motor                                 | 1      | X      |    |   |
| Auto bloqueo de la carga ubicada sobre el tornillo                      | 1      | X      |    |   |
| Detección de la altura de la carga                                      | 1      |        | X  | Calibrar la medición del sensor                     |
|   | 2      |        | X  | Modificar la posición del sensor                    |
|   | 3      | X      |    |   |

**Tabla 39 Control del sistema de elevación (Continuación)**

| TAREA  | PRUEBA | CUMPLE |    |  |
|--|--------|--------|----|--|
|  |        | SI     | NO |  |
| Embalamiento de la parte inferior de la carga con el número de vueltas deseado | 1      |        | X  | Reprogramar el tiempo de embalamiento de la parte inferior |
|  | 2      |        | X  | Reprogramar el tiempo de embalamiento de la parte inferior |
|  | 3      | X      |    |  |
| Embalamiento de la parte superior de la carga con el número de vueltas deseado | 1      | X      |    |  |

### 6.1.3 SISTEMA DE CORTE

**Tabla 40 Control del subsistema de corte**

| TAREA                            | PRUEBA | CUMPLE |    | OBSERVACIONES  |
|----------------------------------|--------|--------|----|--|
|                                  |        | SI     | NO |  |
| Corte rápido del film extensible | 1      |        | X  | Mejorar el acople entre cuchilla y servomotor                |
|                                  | 2      |        | X  | Cambiar la posición de la cuchilla respecto al film plástico |
|                                  | 3      |        | X  | Modificar el ángulo de giro del servomotor                   |
|                                  | 4      | X      |    |  |

### 6.1.4 SISTEMA DE LOCOMOCIÓN

Tabla 41 Control del sistema de locomoción

| TAREA   | PRUEBA | CUMPLE |    | OBSERVACIONES  |
|---|--------|--------|----|--|
|   |        | SI     | NO |  |
| Avance de la máquina a velocidad constante        | 1      | X      |    |  |
| Movimiento alrededor del palé sin colisiones      | 1      |        | X  | Modificar la distancia de detección  |
|   | 2      |        | X  | Modificar la posición del sensor   |
|   | 3      |        | X  | Modificar el ángulo de giro del servomotor   |
|   | 4      |        | X  | Cambiar el tiempo de respuesta del sistema   |
|   | 5      | X      |    |  |
| Distancia constante entre el palé y la máquina    | 1      |        | X  | Debido a las restricciones físicas del carro es imposible una distancia constante entre el palé y la máquina |
| Estabilidad durante el recorrido                  | 1      | X      |    |  |
| Desplazamiento del robot a la velocidad requerida | 1      | X      |    |  |

### 6.1.5 ALARMAS

Tabla 42 Control de alarmas

| TAREA   | PRUEBA | CUMPLE |    | OBSERVACIONES   |
|---|--------|--------|----|---|
|   |        | SI     | NO |   |
| Detección de rotura o agotamiento del film extensible | 1      |        | X  | El sensor ultrasónico no es el indicado para este sistema debido a que en muchos casos la película extensible se ha roto pero una porción del film es detectada por el sensor |
| Alerta de agotamiento de batería                      | 1      | X      |    |   |
| Detección de obstáculos ubicados en la parte frontal  | 1      |        | X  | Modificar la posición de los sensores   |
|   | 2      |        | X  | Reprogramar la distancia de detección   |
|   | 3      |        | X  | Aumentar un sensor más en la parte frontal  |
|   |        | X      |    |   |

### 6.1.6 INDICADORES LUMINOSOS

Tabla 43 Funcionamiento de los indicadores luminosos

| TAREA  | CUMPLE |    |
|--|--------|----|
|  | SI     | NO |
| Correcto funcionamiento de indicadores luminosos | X      |    |

### 6.1.7 CONTROL REMOTO POR RADIOFRECUENCIA

Tabla 44 Control remoto

| TAREA   | CUMPLE |    |
|---|--------|----|
|   | SI     | NO |
| Activación de la máquina por medio del botón INICIO     | X      |    |
| Detención de la máquina por medio del botón PARADA      | X      |    |
| Pausa del robot por medio del botón PAUSA               | X      |    |
| Reinicio del ciclo de enfardado mediante el botón RESET | X      |    |

### 6.1.8 INTERFAZ GRÁFICA

Tabla 45 Funcionamiento de la interfaz gráfica

| TAREA  | PRUEBA | CUMPLE |    | OBSERVACIONES  |
|--|--------|--------|----|--|
|  |        | SI     | NO |  |
| Fácil configuración de los parámetros de control                           | 1      | X      |    |  |
| Comunicación entre HMI y placa micro-procesada sin pérdidas de información | 1      |        | X  | Revisar la conexión del módulo bluetooth y dispositivo Android |
|  | 2      | X      |    |  |

## **6.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS**

### **6.2.1 SISTEMA DE PRE-ESTIRAMIENTO**

El sistema de pre-estiramiento permite que la película plástica se adhiera a la carga de manera continua, uniforme y sin arrugas permitiendo un buen acabado. Pero sin embargo la capacidad de elongación del film extensible no ha sido aprovechada al máximo en este caso. Las empresas dedicadas al enfardado invierten grandes sumas de dinero en la optimización del diseño de este sistema. Por tal motivo la información disponible del tema es escasa y el diseño presentado en este proyecto ha sido en gran parte intuitivo y empírico. Teniendo en cuenta estos atenuante se considera que los resultados de la implementación del sistema de pre-estiramiento han sido medianamente satisfactorios.

En afán de obtener optimizar el uso de la película extensible se ha sustituido el sistema existente por un sistema de freno mecánico ubicado en el rodillo de goma. Este nuevo sistema permite una regulación del porcentaje de estiramiento mediante un prisionero ubicado en la parte superior del carro porta bobinas.

### **6.2.2 SISTEMA DE ELEVACIÓN**

El sistema de elevación cumple satisfactoriamente con todas sus funciones. La elevación del sistema de pre-estiramiento a través del mástil es una de las tareas fundamentales, razón por la cual los pernos de la guía

del rodamiento lineal y de las chumaceras deberán ser ajustados regularmente.

La detección de altura de la carga permite que la máquina determine hasta que momento debe realizar el movimiento vertical hacia arriba del sistema de pre-estiramiento. Esta medición tiene una tolerancia de 3 centímetros hacia arriba.

La técnica de enfardado sugiere que en la parte inferior y superior de la carga se realice un mayor número de vueltas con el film extensible que en la parte intermedia para que exista una mayor sujeción. La máquina no es capaz de detectar cuantas vueltas ha dado alrededor del palé, razón por la cual en la programación de la enfardadora se ha determinado que durante cierto tiempo el motor de elevación detenga su movimiento para lograr que la película refuerce la base y el tope de la carga.

### **6.2.3 SISTEMA DE LOCOMOCIÓN**

El movimiento del robot alrededor del palé sin colisiones es parte fundamental del proceso. La correcta calibración y posición del sensor permiten que esto suceda. Si los sensores ultrasónicos empleados para esta medición es removido o colocado en otra posición, la máquina no realizará su recorrido adecuadamente y en caso de una colisión los componentes de la máquina pueden resultar gravemente averiados.



Debido a las restricciones físicas del carro de Power Wheels empleado en el desarrollo de este proyecto, siendo el tamaño del vehículo y ángulo de giro de las ruedas los mayores inconvenientes, es imposible mantener una distancia constante entre el robot y la máquina. La distancia máxima entre la enfardadora y el palé será de 1.05 metros.

#### **6.2.4 SISTEMA DE CORTE**

El acople entre el servomotor y la cuchilla de corte es la parte principal en este punto, la cuchilla debe estar bien ajustada o caso contrario la película extensible no será cortado exitosamente.

#### **6.2.5 ALARMAS**

La correcta activación de alarmas permite que la máquina detenga su funcionamiento en caso de que algún imprevisto, falla o accidente suceda durante el proceso.

La alarma anti-choque permite que la máquina realice su recorrido alrededor del palé sin colisiones, deteniendo el avance de la máquina en caso de que exista algún obstáculo en frente de la misma. La correcta posición y calibración de los sensores permite realizar esta actividad exitosamente, estos están dispuestos de tal manera que no existan puntos ciegos, razón por la cual estos sensores no deberán ser removidos o cambiados de posición.

En un inicio, la alarma anti-choque tenía varios puntos ciegos, motivo por el cual se decidió colocar un tercer sensor en la parte frontal del carro. De esta manera, esta alarma detecta de mejor manera los obstáculos que pudieran existir en el recorrido de la máquina.

En cambio, la alarma de agotamiento de batería funciona perfectamente, alertando al operario sobre el nivel de carga de la misma, para que éste tome las acciones pertinentes.

Por otra parte, la implementación del sensor ultrasónico para la detección de rotura o agotamiento de película extensible no generó resultados satisfactorios. En ciertas ocasiones cuando ésta se rompía, un fragmento o porción del mismo era detectado por el sensor y de esta manera no se generaba el aviso de alarma, razón por la cual la máquina continuaba con su recorrido alrededor del palé.

Para corregir este mal funcionamiento se optó por sustituir el sensor ultrasónico por un final de carrera mecánico, de esta manera cuando la película extensible se encuentra correctamente colocada el palé, ésta se tensa y activa el final de carrera. En cambio, cuando el film se acaba o se rompe el final de carrera regresa a su posición original enviando la señal de alarma a la tarjeta Sainsmart.

#### **6.2.6 INDICADORES LUMINOSOS**

Los indicadores luminosos son claramente visibles y el operario puede adquirir la información del funcionamiento, alarmas y estado de la máquina a cualquier momento.

### **6.2.7 CONTROL REMOTO POR RADIOFRECUENCIA**

La comunicación entre la máquina y el control remoto por radiofrecuencia no presenta ningún problema. La única indicación pertinente es la revisión de la carga de las pilas que alimentan dicho control.

### **6.2.8 INTERFAZ GRÁFICA**

La configuración de los parámetros de la enfardadora vía bluetooth tampoco presenta mayores inconvenientes, Cabe recordar que el operario debe emplear el dispositivo Android a una distancia prudente de la máquina, es decir, no exceder el alcance del bluetooth, el cual es de 10 metros. Además debe asegurarse de activar la función de bluetooth en el dispositivo Android.

## **6.3 TIEMPOS DE CICLO**

El tiempo que la máquina se demora en enfardar una carga depende de los siguientes parámetros:

- Tipo de ciclo (único o completo)
- Velocidad de la torre
- Altura de la carga

La obtención de los tiempos de ciclo se realizó con una programación de ciclo completo con dos vueltas en la parte inferior y dos en la superior, para envolver una carga de 73 cm de altura. Se realizó 3 pruebas distintas con cargas ubicadas sobre palés de distintas dimensiones. La Tabla 46 muestra los tiempos de ciclo de esta prueba.

Tabla 46 Tiempos de ciclo

| TIPO DE CICLO | VELOCIDAD | TIEMPO       |             |             |
|---------------|-----------|--------------|-------------|-------------|
|               |           | (1200x800mm) | (800x800mm) | (720x720mm) |
| Único         | Baja      | 1 min 57 s   | 1 min 35 s  | 1 min 28 s  |
| Único         | Media     | 1 min 40 s   | 1 min 23 s  | 1 min 19 s  |
| Único         | Alta      | 1 min 32 s   | 1 min 14 s  | 1 min 7s    |
| Completo      | Baja      | 3 min 03 s   | 2 min 31 s  | 2 min 23 s  |
| Completo      | Media     | 2 min 36 s   | 2 min 9 s   | 1 min 58 s  |
| Completo      | Alta      | 2 min 28 s   | 1 min 57 s  | 1 min 44 s  |

Uno de los objetivos de la máquina, es la reducción del tiempo de ciclo y optimización de la película plástica en comparación con el modo manual. Para ello, se requiere determinar cuánto se demora una persona en realizar este proceso.

Tabla 47 Resultados con operación en modo manual

| No.             | Tiempo     | Peso (gr) |
|-----------------|------------|-----------|
| 1               | 2 min 37 s | 175       |
| 2               | 2 min 53 s | 170       |
| 3               | 3 min 5 s  | 172       |
| 4               | 3 min 20 s | 175       |
| 5               | 3 min 30 s | 173       |
| 6               | 3 min 34 s | 176       |
| 7               | 3 min 41 s | 180       |
| 8               | 3 min 52 s | 183       |
| 9               | 3 min 50 s | 181       |
| 10              | 3 min 53 s | 185       |
| <b>Promedio</b> | 3 min 25 s | 177       |

La Tabla 47 muestra el tiempo de ciclo y el peso de la película estirable empleado durante el proceso manual. En este caso, se empleó los mismos parámetros de la prueba anterior, pero solamente se ocupó un euro-palé como base para la carga.

La Tabla 48 muestra los resultados obtenidos en operación en modo manual, y su comparación con el modo semi-automático.

**Tabla 48 Comparación entre modo manual y semi-automático**

|                       | <b>Manual</b> | <b>Semi-automático</b> |
|-----------------------|---------------|------------------------|
| <b>Tiempo</b>         | 3 min 25 s    | 3 min 3 s.             |
| <b>Peso</b>           | 177gr         | 136 gr                 |
| <b>% Estiramiento</b> | 11.5%         | 28%                    |

La máquina posee el mismo rendimiento durante las pruebas realizadas. En cambio, a medida que la persona se agita, su rendimiento también decae. Por tal razón, la máquina es más confiable que el operario.

## **6.4 PORCENTAJE DE ESTIRAMIENTO**

La Tabla 48 muestra una comparación del consumo de película estirable y el porcentaje de estiramiento entre el modo manual y el semi-automático.

El porcentaje de estiramiento se halló bajo las siguientes consideraciones:

- Para una vuelta se requiere 20 gramos de película extensible sin estirar
- En ciclo completo se necesitan 10 vueltas para envolver correctamente la carga de 73 cm

Entonces, se puede afirmar que se necesita 200 gramos de película extensible sin estirar, cuando la máquina opere en ciclo completo.

La ecuación 36 permite el cálculo del porcentaje de estiramiento de la película plástica.

$$\% \text{ estiramiento} = \frac{\text{Peso de la película empleado}}{\text{Peso de la película sin estirar}} * 100 \quad \text{Ecuación 36}$$

$$\% \text{ estiramiento manual} = \frac{177}{200} * 100 = 11.5\%$$

$$\% \text{ estiramiento semi - automático} = \frac{136}{200} * 100 = 32\%$$

Entonces se demuestra que la máquina enfardadora semi-automática proporciona un 20.5% más de ahorro en el consumo de película estirable en comparación con el modo manual.

## 6.5 CALIDAD DEL ENFARDADO

No se dispone de una norma para determinar la calidad del enfardado, razón por la cual a continuación se detalla una serie de parámetros, en base a los cuales se establece la calidad del proceso.

En este caso la presencia de arrugas, la disminución del ancho de la película extensible y el traslape entre capas son los parámetros que se toman en cuenta (Tabla 49)

**Tabla 49 Calidad del enfiado**

| <b>Parámetros</b>                                      | <b>Ponderación</b> | <b>Calificación</b> | <b>Observaciones</b>   |
|--|--------------------|---------------------|--|
| <b>Arrugas en el enfiado</b>                           | 0.25               | 0.8<br>0.2          | No se encuentran   |
| <b>Falta de tensión de la película extensible</b>      | 0.25               | 0.95<br>0.24        | La película estirable se adhiere correctamente a la carga.   |
| <b>Disminución del ancho de la película extensible</b> | 0.25               | 0.9<br>0.22         | La película plástica disminuye su ancho a medida que se estira longitudinalmente. En este caso, el porcentaje de estiramiento longitudinal es del 32% y la reducción del ancho es del 1.01%. |
| <b>Traslape entre capas</b>                            | 0.25               | 0.95<br>0.24        | Se recomienda que el traslape entre capas sea de una tercera parte o de la mitad de la película extensible. En este caso, se tiene un 33.6% de traslape                                      |
| <b>TOTAL</b>   | <b>1</b>           | <b>0.9</b>          |  |

La reducción del ancho de la película estirable se calcula mediante la ecuación 37

$$\% \text{ reducción} = \frac{\text{ancho nominal de la película}}{(\text{ancho después del proceso})} * 100 \quad \text{Ecuación 37}$$

$$\% \text{ reducción} = \frac{25 \text{ cm}}{24.6 \text{ cm}} * 100$$

$$\% \text{ reducción} = 1.01\%$$

El porcentaje de traslape está dado por la ecuación 38

$$\% \text{ traslape} = \frac{d}{\text{ancho nominal de la película}} * 100 \quad \text{Ecuación 38}$$

Dónde:

d: Es la distancia que existe entre el fin de una capa y el inicio de la siguiente capa.

$$\% \text{ traslape} = \frac{8.4 \text{ cm}}{25 \text{ cm}} * 100$$

$$\% \text{ traslape} = 33.6\%$$

En base a los parámetros de la **Tabla 49** se establece que el proceso de enfardado tiene una calidad del 90%.

La Figura 118 muestra una comparativa visual entre la calidad del enfardado del modo manual y del modo-semiautomático.





a) Modo Manual



b) Modo semi-automático

**Figura 118 Calidad del enfiado**

## 6.6 ÍNDICES DE MANTENIMIENTO

Los índices de mantenimiento son parámetros numéricos que ofrecen una oportunidad de mejora continua en el desarrollo y aplicación de las técnicas de mantenimiento.

La confiabilidad y disponibilidad son las medidas técnicas fundamentadas en cálculos matemáticos y estadísticos empleadas para el análisis del mantenimiento. (Rodríguez, 2008)

### 6.6.1 CONFIABILIDAD

La confiabilidad o fiabilidad es la probabilidad de que un equipo desempeñe satisfactoriamente las funciones para las que fue diseñado, durante el periodo de tiempo especificado y bajo las condiciones de operación dadas. (Rodríguez, 2008)

La tasa de falla de un sistema caracteriza la fiabilidad del mismo, ésta depende de la relación entre número de horas de operación y número de fallas (Ecuación 39)

$$\lambda = n/HROP \quad \text{Ecuación 39}$$

Dónde:

$\lambda$ : Tasa de fallo

n: Número de fallas

HROP: Número de horas de operación

Las fallas más comunes de la máquina enfardadora semi-automática se resumen en la Tabla 50. Siendo 9 el número estimado de fallas diarias, con este dato se puede calcular la tasa de falla mediante la ecuación 39

$$\lambda = 9/8$$

$$\lambda = 1.12$$

Esto implica que ocurre aproximadamente una falla cada hora.

### 6.6.2 DISPONIBILIDAD

La disponibilidad D es el parámetro principal asociado al mantenimiento, debido a que limita la capacidad de producción y se calcula mediante la ecuación 40. (Rodriguez, 2008)

Tabla 50 Fallas en el funcionamiento de la máquina

| Dispositivo, Sistema o Función    | No. De fallas diarias (n) | Tiempo de reparación por falla (min) | Tiempo total de reparación en minutos (min) | Observaciones   |
|-----------------------------------|---------------------------|--------------------------------------|---|---|
| Recorrido alrededor del palé      | 3                         | 2                                    | 6   | En ocasiones la máquina se aleja demasiado de la carga y se detiene prematuramente. O caso contrario se acerca demasiado a la misma e igual se detiene. |
| Alarma anti choque                | 1                         | 3                                    | 3   | El rango de detección del sensor izquierdo es muy bajo, razón por la cual la máquina a veces no detecta el obstáculo                                    |
| Pérdida de comunicación bluetooth | 1                         | 15                                   | 15  | La comunicación bluetooth se pierde, motivo por el cual ésta debe ser reiniciada  |
| Alarma de rotura                  | 3                         | 2                                    | 6   | El plástico extensible no se tensa lo suficiente para activar el final de carrera   |
| Detección de altura de carga      | 1                         | 10                                   | 10  | El sensor no detecta correctamente el altura de la carga  |
| <b>TOTAL</b>                      | <b>9</b>                  |                                      | <b>40</b>                                   |   |

$$D = TPEF / (TPEF + TPPR) \quad \text{Ecuación 40}$$

Dónde:

TPEF: Tiempo promedio entre fallas

TPPR: Tiempo promedio de reparación.

El tiempo promedio entre falla se calcula mediante la ecuación 41

$$TPEF = HROP / n \quad \text{Ecuación 41}$$

Dónde:

n: Número de fallas

HROP: Número de horas de operación

$$TPEF = 8/9$$

$$TPEF = 0.89 \text{ horas}$$

El tiempo promedio de reparación se calcula mediante la ecuación 42

$$TPPR = TTF / n \quad \text{Ecuación 42}$$

Dónde:

TTF: Tiempo total de fallas

$$TPPR = \frac{0.67}{9}$$

$$TPPR = 0.074 \text{ horas}$$

Reemplazamos este dato en la ecuación 40

$$D = 0.89 / (0.89 + 0.074)$$

$$D = 0.92$$

Esto implica que el 92% del tiempo de trabajo, la máquina estará disponible para envolver.

## **6.7 MEJORAS**

### **6.7.1 MAYOR PORCENTAJE DE ESTIRAMIENTO**

El sistema de pre-estiramiento cumple una tarea primordial en el funcionamiento de las máquinas enfardadoras, el cual es la optimización del uso de la película extensible permitiendo una mayor calidad en el acabado del enfardado.

En este caso, se ha obtenido una excelente calidad en el acabado y se ha reducido considerablemente el uso del film extensible, pero no se ha aprovechado al máximo la elongación del mismo. Por tal motivo un nuevo estudio de este tema puede ser realizado si el usuario así lo requiere. Cabe recalcar que los sistemas de pre-estiramiento de las máquinas comerciales llegan a superar fácilmente los 4000 dólares debido a la exhaustiva investigación y a la gran asignación de recursos económicos para el desarrollo de la misma.

### **6.7.2 HISTORIAL DE FUNCIONAMIENTO Y ALARMAS**

Los tiempos de ciclo, alarmas y cualquier dato que al operario le parezca relevante puede ser almacenado en una base de datos en el dispositivo Android o en una tarjeta SD. Esta información permitiría obtener el rendimiento general de la máquina así como documentar las averías, problemas y el mantenimiento de la misma.

### **6.7.3 MEJORAR TIEMPOS DE CICLO**

La optimización de los tiempos de ciclo puede realizarse mediante el mejoramiento del sistema de tracción o dirección.

En este caso nos encontramos limitados por las restricciones físicas del vehículo de Power Wheels empleado en el proyecto. El recorrido del robot alrededor del palé no mantiene una distancia constante debido a que las ruedas delanteras de dirección tienen un radio de giro elevado, por esta razón la distancia entre la máquina y el palé llega a ser de 1,15 metros en un determinado momento.

El aumento de la velocidad de avance permitiría una disminución en el tiempo de ciclo, pero también se elevaría el daño causado a la carga o a las personas en caso de existir algún choque.

El aumento de la velocidad del sistema de elevación permitirá una disminución del tiempo de ciclo. Para ello es necesaria la instalación de una segunda batería o un convertidor DC-DC de 12 a 24VDC de 100 vatios para

que el motor DC encargado de realizar este movimiento adquiriera una mayor velocidad.

Cabe destacar que la velocidad de avance con la velocidad de subida y bajada del sistema de pre estiramiento tiene una estrecha relación. Debido a que si la velocidad de avance es muy baja y la velocidad de subida es muy alta existirán espacios en la carga que no serán recubiertos por el film extensible.

#### **6.7.4 TIMÓN PARA DIRECCIÓN MANUAL**

Un control remoto en el dispositivo Android ha sido implementado para desplazar el robot manualmente desde el lugar de almacenaje hacia el área de trabajo o viceversa. Para brindar otra alternativa para ejecutar esta actividad un elemento motriz o timón puede ser implementado.

## CAPÍTULO VII

### ANÁLISIS ECONÓMICO

En este capítulo se considera el análisis económico del proyecto. Se analiza los diferentes costes y beneficios potenciales asociados con la instalación de la enfardadora mediante la descripción de algunos métodos de análisis

Para efectuar el análisis económico se requiere cierta información básica respecto al proyecto, la cual incluye el coste de instalación, el tiempo de ciclo de producción, los ahorros y beneficios resultantes del proyecto. Los datos de coste requeridos para efectuar el análisis económico se dividen en dos tipos: costes de inversión y costes de explotación.

#### 7.1 COSTES DE INVERSIÓN

Los costes de inversión incluyen el costo de compra o producción de la máquina y los costes de ingeniería asociados a su instalación en el lugar de trabajo. Estos costes se detallan a continuación por sistemas.

##### 7.1.1 SISTEMA MECÁNICO

**Tabla 51 Costes del sistema mecánico**

| DESCRIPCIÓN             | CANTIDAD | PRECIO<br>UNIT. | PRECIO<br>TOTAL |
|-------------------------|----------|-----------------|-----------------|
| <b>SISTEMA DE CORTE</b> |          |                 |                 |
| Cuchilla                | 1        | 0,50            | 0,50            |
| Soportes                | 2        | 0.5             | 1,00            |



Tabla 51(Continuación) Costes del sistema mecánico

| DESCRIPCIÓN                          | CANTIDAD | PRECIO<br>UNIT. | PRECIO<br>TOTAL |
|--------------------------------------|----------|-----------------|-----------------|
| <b>SISTEMA DE LOCOMOCIÓN</b>         |          |                 |                 |
| Vehículo Power Wheels                | 1        | 300,0           | 300,0           |
| Acople de servomotor de<br>Dirección | 1        | 40,00           | 40,00           |
| <b>SISTEMA DE ELEVACIÓN</b>          |          |                 |                 |
| Tornillo de potencia                 | 1        | 120,00          | 120,00          |
| Chumaceras de pared                  | 2        | 10,00           | 20,00           |
| Tuerca de bronce                     | 2        | 20,00           | 40,00           |
| Brida de acero                       | 2        | 5,00            | 10,00           |
| Torre de soporte                     | 1        | 40,00           | 40,00           |
| Cable de acero con grillete          | 1        | 6,00            | 6,00            |
| Rodamiento lineal con guía           | 1        | 200,00          | 200,00          |
| <b>SISTEMA DE ESTIRAMIENTO</b>       |          |                 |                 |
| Rodillo galvanizado                  | 1        | 40,00           | 40,00           |
| Rodillo de fusión                    | 1        | 70,00           | 70,00           |
| Tubos guía                           | 2        | 2,00            | 4,00            |
| Base para el film extensible         | 1        | 5,00            | 5,00            |
| Acople de motores                    | 2        | 20,00           | 40,00           |
| Rodamientos                          | 6        | 2,00            | 12,00           |
| Estructura de soporte                | 1        | 20,00           | 20,00           |
| <b>OTROS</b>                         |          |                 |                 |
| Pernos Allen                         | 50       | 0,50            | 25,00           |
| Llave hexagonal                      | 5        | 1,25            | 6,25            |
| Domo de policarbonato                | 1        | 300,00          | 300,00          |
| <b>TOTAL</b>                         |          |                 | <b>1350,8</b>   |

## 7.1.2 SISTEMA ELÉCTRICO Y ELECTRÓNICO

Tabla 52 Costes del sistema eléctrico y electrónico

| DESCRIPCIÓN                | CANTIDAD | PRECIO UNIT. | PRECIO TOTAL |
|----------------------------|----------|--------------|--------------|
| <b>SENSORES</b>            |          |              |              |
| Ultrasónico HC-SR04        | 7        | 3,25         | 22,75        |
| Finales de carrera         | 2        | 0,60         | 1,20         |
| <b>MOTORES</b>             |          |              |              |
| Servomotor MG995           | 1        | 17,76        | 17,76        |
| Servomotor 49 Kg.cm        | 1        | 80,00        | 80,00        |
| Motor DC 120W              | 1        | 180,00       | 180,00       |
| <b>PLACAS ELECTRÓNICAS</b> |          |              |              |
| Driver inversión de giro   | 2        | 25,26        | 50,52        |
| Modulo bluetooth           | 1        | 20,50        | 20,50        |
| Control RF                 | 1        | 40,00        | 40,00        |
| Reguladores de voltaje     | 2        | 6,59         | 13,18        |
| Agotamiento de batería     | 1        | 20,00        | 20,00        |
| Arduino Mega 2560          | 1        | 55,00        | 55,00        |
| <b>CABLES</b>              |          |              |              |
| Metro de cable AWG 26      | 8        | 0,50         | 4,00         |
| Metro de cable AWG 18      | 8        | 0,40         | 3,20         |
| Metro de cable AWG 24      | 10       | 1,10         | 11,00        |
| <b>CONECTORES</b>          |          |              |              |
| Conector molex 4p          | 8        | 0,30         | 2,40         |
| Conectores hembra 1p       | 10       | 0,08         | 0,80         |
| Conectores hembra 2p       | 10       | 0,10         | 1,00         |

**Tabla 52 Costes del sistema eléctrico y electrónico (Continuación)**

| DESCRIPCIÓN          | CANTIDAD | PRECIO<br>UNIT. | PRECIO<br>TOTAL |
|----------------------|----------|-----------------|-----------------|
| <b>OTROS</b>         |          |                 |                 |
| Batería 12V 40Ah     | 1        | 80,00           | 80,00           |
| Canaletas            | 2        | 1,25            | 2,50            |
| Borneras             | 2        | 1,50            | 3,00            |
| Panel eléctrico      | 1        | 21,00           | 21,00           |
| Tablet Xtratech 9plg | 1        | 120,00          | 120,00          |
|                      |          | <b>TOTAL</b>    | <b>749,81</b>   |

### 7.1.3 COSTE TOTAL

**Tabla 53 Coste total del proyecto**

| DESCRIPCIÓN                     | COSTO          |
|---------------------------------|----------------|
| Sistema mecánico                | 1350,80        |
| Sistema eléctrico y electrónico | 749,81         |
| <b>TOTAL</b>                    | <b>2100,61</b> |

### 7.1.4 GASTOS DE PERSONAL

Los gastos de personal corresponden al pago de sueldos, horas extras, vacaciones y beneficios de ley del personal de la nómina de empleados contratados para el desarrollo del proyecto. En este caso, no se ha contratado personal, pero se ha impuesto un sueldo de \$340 mensuales para las dos personas responsables del proyecto. El gasto de personal asciende a \$6800 por los 10 meses trabajados.

### 7.1.5 GASTOS DE GESTIÓN

Los gastos de gestión corresponden a los servicios empleados para el desarrollo del proyecto. (Tabla 54)

**Tabla 54 Gastos de gestión**

| DESCRIPCIÓN  | MONTO (\$) |
|--------------|------------|
| Luz          | 50         |
| Agua         | 40         |
| Teléfono     | 40         |
| Internet     | 50         |
| Transporte   | 80         |
| <b>TOTAL</b> | <b>260</b> |

### 7.1.6 GASTO TOTAL

**Tabla 55 Gasto total del proyecto**

| DESCRIPCIÓN       | MONTO (\$)  |
|-------------------|-------------|
| Gasto de gestión  | 260         |
| Gasto de personal | 6800        |
| <b>TOTAL</b>      | <b>7060</b> |

### 7.1.7 RENTABILIDAD

La rentabilidad es el porcentaje de ganancia que se tendrá por concepto de la venta de la máquina (Ecuación 43). Este valor normalmente oscila

entre 15% y 30%. Para seleccionar un valor de rentabilidad adecuado hay que tomar en cuenta la oferta de productos similares en el mercado, la calidad del producto, el precio de la competencia, entre otros. En este caso se ha optado por un 20% de rentabilidad.

$$\text{Rentabilidad} = 0.2 * (\text{Costos} + \text{Gastos}) \quad \text{Ecuación 43}$$

$$\text{Rentabilidad} = 0.20 * (2100 + 7060)$$

$$\text{Rentabilidad} = 1832 \$$$

### 7.1.8 PRECIO DE VENTA AL PÚBLICO

El precio de venta al público se obtiene de la suma entre rentabilidad, costos y gastos (Ecuación 44).

$$\text{PVP} = (\text{Rentabilidad} + \text{Costos} + \text{Gastos}) * \text{IVA} \quad \text{Ecuación 44}$$

$$\text{PVP} = (1832 + 2100 + 7060) * 1.12$$

$$\text{PVP} = 12312 \$$$

## 7.2 COSTES DE EXPLOTACIÓN

Los costes de explotación incluyen el coste de cualquier trabajo necesitado para operar el sistema. Estos pueden ser costes de mano de obra directa e indirecta, mantenimiento, uso de servicios básicos, entre otros.

Los costes de mano de obra directa se asocian a los salarios de los operadores de la máquina. Mientras los costes de mano de obra indirecta se refieren a la supervisión, preparación, programación, entre otros.

Un valor razonable aproximado del coste de mantenimiento se establece como el 10% del precio de compra.

Cuando la instalación se completa, el flujo de caja debe exceder a los costes de explotación para que el proyecto sea rentable. Si el proyecto es una buena inversión, la compañía recupera los costes de inversión en un período de tiempo relativamente corto.

Existen varios métodos para determinar la rentabilidad del proyecto. En este capítulo se analizan los siguientes:

- Método de recuperación simple
- Método de rendimiento sobre la inversión
- Tasa interna de retorno
- Valor absoluto neto

### **7.3 MÉTODO DE RECUPERACIÓN SIMPLE**

Este es el método más sencillo para estudiar la viabilidad de un proyecto en términos financieros. También es conocido como método de período de recuperación.

El período de recuperación es el intervalo de tiempo necesitado para que el flujo de carga neto acumulado iguale a la inversión inicial del proyecto.

Bajo la suposición de que los flujos de caja son iguales año, este método se expresa en la ecuación 45

$$n = \frac{CI}{FCNA} \quad \text{Ecuación 45}$$

Dónde:

n: Período de recuperación en años

CI: Coste de la inversión

FCNA: Flujo de carga neto anual

El flujo de carga neto se define como la diferencia entre el ahorro anual producido por la máquina y los gastos anuales de mantenimiento de la misma. (Ecuación 46)

$$FCNA = L - E \quad \text{Ecuación 46}$$

Dónde:

L: Ahorro anual producido por la máquina

E: Gastos anuales por mantenimiento

El ahorro resultante del uso de la enfardadora comprende el coste anual de la mano de obra sustituida por la máquina y la cantidad de película estirable optimizada. (Ecuación 47)

$$L = MO + PE \quad \text{Ecuación 47}$$

Dónde:

MO: Coste anual de mano de obra sustituida

PE: Cantidad de película extensible optimizada.

En Enkador S.A. existen tres horarios rotativos de producción y se estima que la máquina se emplee durante 8 horas diarias consumiendo 10 rollos de película extensible. La máquina sustituye a un operario que gana un sueldo básico y tiene un calendario de 250 días laborables al año. Los gastos anuales por mantenimiento se estiman en un 10% del coste de inversión.

El ahorro de película estirable obtenido por la enfardadora en relación al modo manual es de un 20.5%. El costo del rollo de película extensible es de \$6.50. La variable PE se calcula con la ecuación 48

$$PE = A * Costo * F * días \quad \text{Ecuación 48}$$

Dónde:

A: Ahorro de película estirable

Costo: Costo de la película estirable

F: Número de rollos empleados al día

Días: Número de días laborables por año

Reemplazando los términos de las ecuaciones 46, 47 y 48 en la ecuación 45, se obtiene la siguiente ecuación (Ecuación 49)



$$FCNA = MO + (A * costo * F * días) - E \quad \text{Ecuación 49}$$

$$FCNA = 340 * 12 + (0.205 * 6.5 * 10 * 250) - 0.1 * 12312$$

$$FCNA = 6180$$

Reemplazando los datos en la ecuación 45 se obtiene el tiempo de recuperación

$$n = \frac{12312}{6180}$$

$$n = 1.99 \text{ años}$$

## 7.4 MÉTODO DE RENDIMIENTO SOBRE LA INVERSIÓN

Este método brinda un análisis económico más acertado cuando se utilizan escalas de tiempo cortas. La inflación ni los diversos tipos de interés aplicables a la financiación de proyectos se toman en cuenta cuando el tiempo de recuperación es de uno o dos años.

La amortización anual es un parámetro a considerar en este método, y se define como la inversión de la maquinaria sobre los años de funcionamiento estimados (Ecuación 50)

$$Am = CI/años \quad \text{Ecuación 50}$$

Dónde:

Am: Amortización anual lineal

CI: Coste de inversión

años: Años de funcionamiento de la maquinaria

Se estima que la enfardadora tenga un tiempo de vida útil de 5 años.

$$Am = \frac{12312}{5}$$

$$Am = \$2462$$

El rendimiento sobre la inversión (RSI) se calcula con la ecuación 51

$$RSI = (FCNA - Am) * 100 / CI \quad \text{Ecuación 51}$$

Dónde:

CI: Coste de la inversión

MO: Coste anual de mano de obra sustituida

A: Ahorro de película estirable

Costo: Costo de la película estirable

F: Número de rollos empleados al día

Días: Número de días laborables por año

E: Gastos anuales por mantenimiento

Reemplazando los datos en la ecuación 52 se obtiene:

$$RSI = \frac{6180 - 2462}{12312} * 100$$

$$RSI = 30.19\%$$

Para determinar la viabilidad del proyecto se debe comparar el RSI con el TMAR requerido por la empresa. El TMAR o tasa mínima aceptable de rendimiento es un parámetro expresado en porcentaje que depende exclusivamente de cada empresa. Cada compañía selecciona un valor de TMAR para decidir si se debería financiar un proyecto. Para proyectos de adquisición de maquinaria se suele tomar valores entre 20 y 50%. En este caso el TMAR requerido es 30%.

$$RSI \geq TMAR \quad \text{Ecuación 52}$$

$$30.19\% \geq 30\%$$

Debido a que se cumple la condición de la ecuación 52 se puede afirmar que el proyecto es viable.

## 7.5 VALOR ABSOLUTO NETO

El valor absoluto neto o VAN es otro parámetro a ser considerado en la para determinar la viabilidad de un proyecto.

La fórmula de cálculo del VAN se detalla en la ecuación 53

$$VAN = -CI + \sum_{n=1}^N FCNA / (1 + r)^n \quad \text{Ecuación 53}$$

Dónde:

VAN: Valor neto anual

CI: Coste total de inversión

FCNA: Flujo de carga neto anual

r: Tasa de interés

N: número de años

$$VAN = -12312 + \sum_{n=1}^5 6180/(1 + 0.15)^n$$

Considerando un flujo de carga neto anual constante durante 5 años y una tasa de interés del 15%, se obtiene un valor del VAN de \$ 8404. Para determinar si el proyecto es rentable, se debe cumplir la condición de la ecuación 54

$$VAN > 0 \qquad \text{Ecuación 54}$$

El valor del VAN (\$8404) es mayor que cero, por esta razón se puede confirmar que el proyecto es rentable.

## 7.6 TASA INTERNA DE RETORNO

La tasa interna de retorno o TIR es otro indicador económico empleado para determinar si una inversión es rentable o no. El TIR es la tasa de interés con la cual el VAN se hace cero y su fórmula está dada por la ecuación 55

$$0 = -CI + \sum_{n=1}^N FCNA/(1 + TIR)^n$$

**Ecuación 55**

Dónde:

CI: Coste total de inversión

FCNA: Flujo de carga neto anual

N: número de años

$$0 = -12312 + \sum_{n=1}^N 6180/(1 + TIR)^n$$

En base a los mismos datos del cálculo del VAN, se obtuvo que el valor del TIR es 32.83%. Para determinar si el proyecto es rentable el valor del TIR debe ser comparado con el TMAR.

$$TIR \geq TMAR$$

**Ecuación 56**

$$41.28\% \geq 30\%$$

La condición de la ecuación 56 se cumple, por tal razón se afirma que el proyecto es rentable.

## CAPÍTULO VIII

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 8.1 CONCLUSIONES

- El proyecto denominado “Máquina enfardadora semi-automática controlada por microprocesador para cargas ubicadas sobre palets” ha cumplido satisfactoriamente con los objetivos planteados al iniciarse el proyecto, es decir, se ha conseguido solucionar el problema de enfardado manual a través de la construcción de una máquina enfardadora tipo robot, la cual permite embalar palés de modo semi-automático reduciendo el consumo de película estirable un 20.5% en comparación con el modo manual.
- El correcto traslape entre capas de película extensible (33.6%), la ausencia de arrugas en el acabado, la correcta adhesión del film sobre la carga, el alto porcentaje de estiramiento longitudinal (32%) y la mínima disminución del ancho de película estirable (1.01%) permiten afirmar que el proceso de enfardado semi-automático realizado en este proyecto es de alta calidad.
- Las pruebas realizadas demuestran la flexibilidad, robustez y efectividad de la máquina enfardadora para diferentes tipos de cargas

y palés de diferentes dimensiones, controlando el recorrido de la máquina manteniendo una velocidad entre 30.6 y 48 m/min.

- La implementación sinérgica entre el sistema de estiramiento, elevación y locomoción con los sensores y actuadores presentes en la máquina enfardadora, permiten obtener un resultado satisfactorio, el cual se aprecia en las pruebas de funcionamiento.
- Cabe recalcar la importancia de la Ingeniería Mecatrónica dentro de la industria nacional, ya que la habilidad para incorporar el control micro-controlado en diseños mecánicos permite el mejoramiento, simplificación e innovación, para el ahorro de energía y de recursos en sistemas de alta inteligencia.
- Mediante un análisis económico se ha establecido que la inversión por parte de una empresa nacional en este tipo máquina enfardadora es rentable, en este caso la inversión se recuperará en 1.99 años.

## 8.2 RECOMENDACIONES

- Es indispensable seguir todas las instrucciones previstas en el Manual de uso y mantenimiento, ya que a través de este se podrá conocer todos los elementos que constituyen la máquina, así como las soluciones a posibles problemas presentados.
- Para un mejor desempeño del sistema de elevación, es recomendable realizar una permanente lubricación de acuerdo al registro de lubricación indicado en el Manual de uso y mantenimiento.
- Con el fin de evitar posibles averías en el sistema de control, especialmente en drivers y tarjeta de control, se recomienda no retirarlos del panel eléctrico, ya que frente a superficies estáticamente cargadas podrían quemarse.
- Se debe tener especial atención a la disposición de elementos y conexiones electrónicas, para que estas no interfieran el funcionamiento normal de la máquina, es decir se debe garantizar que cables y sensores no interrumpan el movimiento de los actuadores.
- Debido a la escasa información para el desarrollo de sistemas de pre estiramiento de la película extensible se recomienda un mayor



estudio, el cual permita identificar una manera más eficiente para realizar un estiramiento para aprovechar toda la elongación del film.

- Debido a que este es un prototipo se puede realizar varias mejoras tanto en el diseño mecánico, como en el sistema electrónico de control:
  - Diseñar un sistema de locomoción que permita mayor controlabilidad alrededor del palé (configuración diferencial).
  - Usar materiales más livianos como perfiles de aluminio para el diseño de la torre de elevación.
  - Rediseñar el sistema de estiramiento para que pueda utilizar rollos de diferentes tamaños y permita un mayor porcentaje de estiramiento.

## BIBLIOGRAFÍA

- abc-pack. (02 de febrero de 2013). *www.abc-pack.com*. Obtenido de <http://www.abc-pack.com/categorias-productos/enfardadoras-envolvedoras/>
- alibaba. (22 de agosto de 2013). [http://www.alibaba.com/product-gs/495846801/Remote\\_control\\_rf\\_remote\\_control\\_4/showimage.html](http://www.alibaba.com/product-gs/495846801/Remote_control_rf_remote_control_4/showimage.html). Obtenido de alibaba: alibaba
- aliexpress. (11 de mayo de 2013). <http://www.aliexpress.com/>. Obtenido de <http://www.aliexpress.com/item/CYS-S8218-Digital-6V-7-2V-0-18sec-60-164g-Metal-Gear-40KG-High-Torque-Servo/936177037.html>
- aliexpress. (10 de agosto de 2013). <http://www.aliexpress.com/item/Ultra-small-LM2596-power-supply-module-DC-DC-BUCK-3A-adjustable-buck-module-regulator-ultra-LM2596S/739489407.html>. Obtenido de <http://www.aliexpress.com/item/Ultra-small-LM2596-power-supply-module-DC-DC-BUCK-3A-adjustable-buck-module-regulator-ultra-LM2596S/739489407.html>
- aliexpress. (11 de septiembre de 2013). <http://www.aliexpress.com/price/motor-double-driver-price.html>. Obtenido de <http://www.aliexpress.com/price/motor-double-driver-price.html>
- arduino. (28 de enero de 2013). <http://arduino.cc/es/>. Obtenido de <http://arduino.cc/es/>: <http://arduino.cc/es/>
- asterion. (31 de mayo de 2010). <http://asterion.almadark.com/>. Obtenido de <http://asterion.almadark.com/2010/05/31/calibre-de-conductores-y-su-amperaje-maximo/>

BAIZ, S.L. (14 de mayo de 2013). *www.baiz.net*. Obtenido de *www.baiz.net*:  
<http://www.baiz.net/es/brida.html>

Bolton, W. (2005). *Mecatrónica*. Mexico: Alfaomega.

Center for innovation in product development. (13 de junio de 2007).  
<http://lancet.mit.edu/motors/index.html>. Obtenido de  
<http://lancet.mit.edu/motors/motors3.html>

CONTROLPACK. (11 de mayo de 2013). <http://www.controlpack.com>.  
Obtenido de [http://www.controlpack.com/index.php/cPath/28\\_29](http://www.controlpack.com/index.php/cPath/28_29)

electronicaembajadores. (23 de junio de 2010).  
[http://www.electronicaembajadores.com/Subfamilias/Productos/20/IT4  
1/finales-de-carrera](http://www.electronicaembajadores.com/Subfamilias/Productos/20/IT41/finales-de-carrera). Obtenido de  
[http://www.electronicaembajadores.com/Subfamilias/Productos/20/IT4  
1/finales-de-carrera](http://www.electronicaembajadores.com/Subfamilias/Productos/20/IT41/finales-de-carrera)

ESPE. (10 de agosto de 2013).  
<http://www.espe.edu.ec/portal/portal/main.do?sectionCode=1257>.  
Obtenido de  
<http://www.espe.edu.ec/portal/portal/main.do?sectionCode=1257>

<http://www.cncroutersource.com/stepper-vs-servo.html>. (31 de enero de  
2011). <http://www.cncroutersource.com>. Obtenido de  
<http://www.cncroutersource.com>

<http://www.thomsonlinear.com/website/com/eng/index.php>. (11 de abril de  
2014). <http://www.thomsonlinear.com/website/com/eng/index.php>.  
Obtenido de  
[http://www.thomsonlinear.com/website/com/eng/products/linear\\_guide  
s/profilerail/500\\_series\\_ball\\_guide.php](http://www.thomsonlinear.com/website/com/eng/products/linear_guides/profilerail/500_series_ball_guide.php)

inmotion. (28 de julio de 2012). [http://www.inmotion.pt/store/ultrasound-  
sensor-hc-sr04](http://www.inmotion.pt/store/ultrasound-sensor-hc-sr04). Obtenido de <http://www.inmotion.pt/store/ultrasound->

sensor-hc-sr04: <http://www.inmotion.pt/store/ultrasound-sensor-hc-sr04>

J. RUIZ DEL SOLAR y R. SALAZAR . (27 de septiembre de 2010).

<http://robotica.li2.uchile.cl/>. Obtenido de  
<http://robotica.li2.uchile.cl/EL63G/capitulo4.pdf>

J., M. (2011). *Gestión de Mantenimiento orientado a la Terotecología*.

Mexico: Atmega.

Joseph E Shigley. (2008). *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley*. Mexico : Mc Graw Hill.

leisonmotor. (11 de mayo de 2013). <http://leisonmotor.en.made-in-china.com/product/qoymRxbgKUL/China-120W-90mm-24-Volt-DC-Gearbox-Motor-Z5D120-.html>. Obtenido de  
<http://leisonmotor.en.made-in-china.com/product/qoymRxbgKUL/China-120W-90mm-24-Volt-DC-Gearbox-Motor-Z5D120-.html>

MAGZA. (10 de enero de 2010). ACTUADORES LINEALES ELECTROMECHANICOS Y SOPORTES HUSILLO. Mexico, Mexico, Mexico.

Martinez, J. A. (09 de octubre de 2011). <http://es.slideshare.net/>. Obtenido de <http://es.slideshare.net/>: <http://es.slideshare.net/jaam2r/la-pantalla-tctil>

METANCOR. (11 de noviembre de 2010). <http://metancor.all.biz/es/angulos-de-acero-de-laminado-en-caliente-de-hoja-g18439>. Obtenido de <http://metancor.all.biz/es/angulos-de-acero-de-laminado-en-caliente-de-hoja-g18439>

MOTION AND CONTROL NSK. (21 de Ocrbre de 2013).

<http://www.directindustry.com>. Obtenido de <http://www.directindustry.com/prod/nsk-europe-ltd/high-precision-linear-guides-233-953479.html>

Mott, R. L. (2006). Diseño de elementos de máquinas. En R. L. Mott, *Diseño de elementos de máquinas* (págs. 984-710 ). Mexico D.F.: Pearson.

Olimpiadas Nacionales de Contenidos Educativos en Internet. (20 de diciembre de 2001). <http://www.oni.escuelas.edu.ar/>. Obtenido de <http://www.oni.escuelas.edu.ar/2001/bs-as/hombre-vs-maquina/segunorm.htm>

PACKSYS ACADEMY. (16 de enero de 2012). [www.packsys.com](http://www.packsys.com). Obtenido de [www.packsys.com](http://www.packsys.com): <http://www.packsys.com/blog/envase-empaque-embalaje/>

Plasticbages Industrial, S.L. (24 de junio de 2012). CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL PVC. Barcelona, Cataluña, España.

Plásticos Enres. (2012). Película estirable para un embalaje seguro. *Wordpress*, 1-7.

pololu. (11 de mayo de 2013). <http://www.pololu.com/product/1102/>. Obtenido de <http://www.pololu.com/product/1102/>

Power Wheels by Fisher Price. (21 de octubre de 2004). Manual del usuario con instrucciones de montaje. Mexico, Mexico, Mexico.

ROBOPAC. (10 de mayo de 2013). [www.robopac.com](http://www.robopac.com). Obtenido de [www.robopac.com](http://www.robopac.com): [http://www.robopac.com/viewdoc.asp?co\\_id=1487](http://www.robopac.com/viewdoc.asp?co_id=1487)

Rodriguez. (2008). *Gestion de Mantenimiento*. Valencia: Granada.

Todo Productividad. (25 de Mayo de 2012). <http://todoproductividad.blogspot.com>. Obtenido de <http://todoproductividad.blogspot.com/2011/02/como-calcular-la-capacidad-de-las.html>

Uktveris, T. (22 de diciembre de 2012). <http://www.wzona.info/2012/09/echolokacija-naudojant-hc-sr04.html>.

Obtenido de <http://www.wzona.info/2012/09/echolokacija-naudojant-hc-sr04.html>

unimec. (23 de abril de 2012). *www.unimec.eu*. Obtenido de *www.unimec.eu*:  
[http://www.unimec.eu/CATALOGHI\\_PRONTI/2-MARTINETTI\\_ASTA\\_TRAPEZIA/ESP/SPEZZATI/30-31-martinetes\\_husillo\\_trapecial-SPA-3.pdf](http://www.unimec.eu/CATALOGHI_PRONTI/2-MARTINETTI_ASTA_TRAPEZIA/ESP/SPEZZATI/30-31-martinetes_husillo_trapecial-SPA-3.pdf)

University Teknikal Malaysia Melaka. (22 de Junio de 2013).  
*http://www.slideshare.net/*. Obtenido de  
<http://www.slideshare.net/fikakhamis/advantages-and-disadvantages-of-acdc-motor>

USECHE, L. V. (2013). Conceptos Básicos sobre Diseño de Máquinas. En L. V. USECHE, *Conceptos Básicos sobre Diseño de Máquinas* (págs. 34 - 63 Cap8). Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.

valvias. (17 de junio de 2013). *www.valvias.com*. Obtenido de *www.valvias.com*: <http://www.valvias.com/prontuario-momento-de-inercia.php>

Wholesale . (04 de octubre de 2013).  
*http://www.dhgate.com/store/product/wholesale-ttl-bluetooth-module-adapter-board/143579541.html*. Obtenido de  
<http://www.dhgate.com/store/product/wholesale-ttl-bluetooth-module-adapter-board/143579541.html>