

# **ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO**

## **CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

### **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA AUTOMÁTICO DIDÁCTICO PARA EL CONTROL DE CALIDAD Y TAPADO DE BOTELLAS PLÁSTICAS EN EL LABORATORIO DE AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL Y MECATRÓNICA**

#### **PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECATRÓNICO**

**EDWIN ROLANDO CAICEDO TIXE**

**CHRISTIAN OMAR SOCASI SANGOQUIZA**

**DIRECTOR: ING. MELTON TAPIA**

**CODIRECTOR: ING. XAVIER SEGOVIA**

**Sangolquí, 2013-09**

## CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO

El proyecto “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA AUTOMÁTICO DIDÁCTICO PARA EL CONTROL DE CALIDAD Y TAPADO DE BOTELLAS PLÁSTICAS EN EL LABORATORIO DE AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL Y MECATRÓNICA” fue realizado en su totalidad por EDWIN ROLANDO CAICEDO TIXE y CHRISTIAN OMAR SOCASI SANGOQUIZA, como requerimiento parcial para la obtención del título de Ingeniero Mecatrónico.

---

**Ing. Melton Tapia**

**DIRECTOR**

---

**Ing. Xavier Segovia**

**CODIRECTOR**

**Sangolquí, 2013-09-05**

## DECLARACIÓN

Nosotros, Edwin Rolando Caicedo Tixe y Christian Omar Socasi Sangoquiza, declaramos que el presente trabajo es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación personal y que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en el documento, la Escuela Politécnica del Ejército pueda hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la ley de propiedad intelectual por su reglamento y por la normativa institucional vigente.

---

**EDWIN CAICEDO**

---

**CHRISTIAN SOCASI**

**Sangolquí, 2013-09-05**

## AUTORIZACIÓN

Nosotros, Edwin Rolando Caicedo Tixe y Christian Omar Socasi Sangoquiza autorizamos a que se publique en el repositorio digital de la Biblioteca Alejandro Segovia el presente proyecto de tesis, así como también los materiales y documentos relacionados a la misma.

Sangolquí, 2013-09-05

## DEDICATORIA

*Dedico este trabajo a mi querido padre Ángel Caicedo y a mi adorada madre Laura Tixe que siempre supieron brindarme su apoyo en todo momento con gran esfuerzo y sabias palabras, y porque han sido los pilares fundamentales en mi vida.*

*EDWIN C.*

*Dedico esta tesis a mi madre que ha sabido formarme con buenos sentimientos, hábitos y valores, lo cual me ha ayudado a salir adelante en los momentos más difíciles. A mi hermano que siempre ha estado junto a mí y brindándome su apoyo, muchas veces poniéndose en el papel de padre y a toda mi familia en general, porque me han brindado su apoyo incondicional y por compartir conmigo buenos y malos momentos y a todos aquellos que participaron directa o indirectamente en la elaboración de esta tesis.*

*CHRISTIAN S.*

## AGRADECIMIENTOS

*Agradezco a Dios por cada día de vida en los que me brinda la salud y me llena de su bendición para seguir luchando, a mis padres por su amor y paciencia, a Maribel de quien también recibí su apoyo cuando lo necesitaba y a mis directores por ser partícipes de este trabajo.*

*EDWIN C.*

*El presente trabajo de tesis agradezco a Dios por darme la oportunidad para llegar hasta donde he llegado. A la Escuela Politécnica del Ejército por darme la oportunidad de estudiar y ser un profesional. A los directores de tesis, por su esfuerzo y dedicación, quien con sus conocimientos, su experiencia, su paciencia y su motivación ha logrado que pueda terminar mis estudios con éxito. También me gustaría agradecer a mis profesores durante toda mi carrera profesional porque todos han aportado con un granito de arena a mi formación.*

*CHRISTIAN S.*

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

|  |      |
|--|------|
| CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO .....                     | i    |
| DECLARACIÓN .....  | ii   |
| AUTORIZACIÓN.....  | iii  |
| DEDICATORIA .....  | iv   |
| AGRADECIMIENTOS.....   | v    |
| RESUMEN.....   | xvii |
| <b>CAPÍTULO 1</b>  |      |
| 1.1 ANTECEDENTES.....  | 3    |
| 1.2 JUSTIFICACIÓN.....   | 5    |
| 1.3 OBJETIVOS.....   | 8    |
| 1.3.1 GENERAL .....  | 8    |
| 1.3.2 ESPECÍFICOS .....  | 8    |
| 1.4 ALCANCE DEL PROYECTO .....   | 9    |
| <b>CAPÍTULO 2</b>  |      |
| 2.1 INSTRUMENTACIÓN .....  | 11   |
| 2.1.1 INTRODUCCIÓN.....  | 11   |
| 2.1.2 SENSOR .....   | 11   |
| 2.1.2.1 Acondicionamiento.....   | 12   |
| 2.1.2.2 Clasificación.....   | 13   |
| 2.1.2.2.1 Sensores Discretos.....                                      | 13   |
| 2.1.2.2.2 Sensores Analógicos .....                                    | 14   |
| 2.1.3 NORMAS PARA LA INSTRUMENTACIÓN INDUSTRIAL.....                   | 15   |
| 2.1.3.1 Instrument Society of America (ISA) .....                      | 15   |
| 2.1.3.2 American Petroleum Institute (API).....                        | 16   |
| 2.1.3.3 American Society of Mechanical Engineers (ASME) .....          | 17   |
| 2.1.3.4 Process Industry Practices (PIP) .....                         | 18   |
| 2.1.3.5 Technical Association of the Pulp and Paper Industry (TAPPI) . | 18   |
| 2.2 ACTUADORES ELÉCTRICOS .....  | 19   |
| 2.2.1 MOTORES DE DC .....  | 19   |

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| 2.2.1.1   | Características .....                        | 19 |
| 2.2.1.2   | Partes principales de un motor D.C. ....     | 20 |
| 2.3       | CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE.....          | 21 |
| 2.3.1     | DEFINICIÓN.....                              | 21 |
| 2.3.2     | ARQUITECTURA EXTERNA .....                   | 23 |
| 2.3.3     | ARQUITECTURA INTERNA.....                    | 25 |
| 2.3.4     | SECUENCIA DE OPERACIÓN .....                 | 27 |
| 2.3.5     | INTERFACES ENTRADA / SALIDA .....            | 28 |
| 2.3.6     | MÉTODOS DE PROGRAMACIÓN.....                 | 30 |
| 2.3.6.1   | Esquema de contactos.....                    | 31 |
| 2.3.6.2   | Diagrama de funciones .....                  | 32 |
| 2.3.6.3   | Lista de instrucciones .....                 | 33 |
| 2.3.7     | PLC Y SU ENTORNO DE APLICACIÓN.....          | 33 |
| 2.4       | CONTROLADOR PID .....                        | 34 |
| 2.5       | CIRCUITO NEUMÁTICO .....                     | 36 |
| 2.5.1     | ELEMENTOS O COMPONENTES.....                 | 36 |
| 2.5.1.1   | Elementos generadores de energía.....        | 36 |
| 2.5.1.2   | Elementos de mando y control.....            | 36 |
| 2.5.1.3   | Elemento de tratamiento de los fluidos ..... | 37 |
| 2.5.1.4   | Elementos actuadores .....                   | 37 |
| 2.6       | ACTUADORES MECÁNICOS.....                    | 37 |
| 2.6.1     | ACTUADORES HIDRÁULICOS .....                 | 38 |
| 2.6.2     | ACTUADORES NEUMÁTICOS.....                   | 39 |
| 2.6.2.1   | Motores neumáticos.....                      | 39 |
| 2.6.2.2   | Cilindros neumáticos.....                    | 40 |
| 2.6.2.2.1 | Tipos de cilindros neumáticos.....           | 40 |
| 2.6.2.2.2 | Normalización ISO .....                      | 42 |
| 2.7       | ELECTROVÁLVULA .....                         | 43 |
| 2.7.1     | PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO.....             | 44 |
| 2.7.2     | TIPOS DE ACCIONAMIENTO.....                  | 45 |

|                       |   |     |
|-----------------------|---|-----|
| 2.7.2.1               | De acción directa .....                         | 45  |
| 2.7.2.1.1             | De 2 vías de acción directa.....                | 45  |
| 2.7.2.1.2             | De 3 vías de acción directa.....                | 46  |
| 2.7.2.2               | De acción indirecta o pilotada .....            | 47  |
| 2.7.2.2.1             | De 2 vías pilotadas .....                       | 47  |
| 2.7.2.2.2             | De 4 vías pilotadas .....                       | 48  |
| 2.7.3                 | CONFIGURACIÓN DE LAS ELECTROVÁLVULAS.....       | 48  |
| 2.8                   | DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROCESO .....           | 49  |
| <br><b>CAPÍTULO 3</b> |   |     |
| 3.1                   | DISEÑO DE LA BANCADA.....                       | 51  |
| 3.1.1                 | DISEÑO CAD .....                                | 53  |
| 3.1.2                 | SELECCIÓN DEL MATERIAL.....                     | 54  |
| 3.1.3                 | ANÁLISIS DE CARGAS .....                        | 56  |
| 3.2                   | BANDA TRANSPORTADORA.....                       | 69  |
| 3.2.1                 | DISEÑO DE LA BANDA TRANSPORTADORA .....         | 69  |
| 3.2.1.1               | Cinta de banda.....                             | 69  |
| 3.2.1.2               | Motor de banda transportadora.....              | 72  |
| 3.2.1.3               | Rodillos para la banda transportadora .....     | 76  |
| 3.3                   | DISEÑO DEL SISTEMA DISPENSADOR DE TAPAS.....    | 90  |
| 3.4                   | NEUMÁTICA.....                                  | 102 |
| 3.4.1                 | DISEÑO DEL SISTEMA NEUMÁTICO.....               | 103 |
| 3.4.1.1               | Sistema de abastecimiento de botellas.....      | 103 |
| 3.4.1.2               | Sistema de separación de botellas .....         | 109 |
| 3.4.1.3               | Sistema del proceso de tapado de botellas ..... | 114 |
| 3.4.2                 | SELECCIÓN DE COMPONENTES ADICIONALES.....       | 128 |
| 3.4.2.1               | Electroválvulas.....                            | 128 |
| 3.4.2.2               | Racores y Silenciadores .....                   | 130 |
| 3.4.2.3               | Regulador de Caudal .....                       | 130 |
| 3.4.3                 | DIAGRAMA FASE - TIEMPO .....                    | 131 |

**CAPÍTULO 4**

|         |   |     |
|---------|---|-----|
| 4.1     | SENSORES .....  | 133 |
| 4.1.1   | CELDA DE CARGA.....   | 133 |
| 4.1.2   | SENSORES MAGNÉTICOS Y ÓPTICOS .....   | 138 |
| 4.1.3   | MICROSWITCH .....   | 144 |
| 4.2     | DIAGRAMA DEL CIRCUITO.....  | 146 |
| 4.2.1   | CIRCUITO DE ACONDICIONAMIENTO DE LOS SENSORES .....                                       | 147 |
| 4.2.2   | CIRCUITO DE AMPLIFICACIÓN DE LOS SENSORES .....   | 148 |
| 4.2.3   | CIRCUITO DE CONTROL DEL MOTOR DE LA BANDA.....  | 150 |
| 4.2.4   | CIRCUITOS DE ACONDICIONAMIENTO DE LA BALANZA. ....  | 153 |
| 4.2.4.1 | Arreglo de capacitores .....  | 153 |
| 4.2.4.2 | Arreglo de amplificadores .....   | 154 |
| 4.3     | SELECCIÓN DE LOS ELEMENTOS DE LOS CIRCUITOS .....   | 159 |
| 4.3.1   | PARA LOS CIRCUITOS DE LOS SENSORES.....   | 159 |
| 4.3.2   | PARA EL CIRCUITO DE CONTROL DE LA BANDA.....  | 162 |
| 4.3.3   | PARA LOS CIRCUITOS DE LA CELDA DE CARGA.....  | 164 |
| 4.3.3.1 | Circuito pasa bajo .....  | 164 |
| 4.3.3.2 | Arreglo de amplificadores .....   | 165 |
| 4.3.3.3 | Selección de los elementos del filtro Butterworth.....                                    | 167 |
| 4.3.3.4 | Selección de elementos del circuito de recolección de<br>señales de entrada y salida..... | 169 |
| 4.4     | CIRCUITO ELECTRÓNICO DEL CONTROLADOR .....  | 170 |
| 4.5     | DIAGRAMA DE CONEXIONES DE LOS CIRCUITOS .....   | 173 |

**CAPÍTULO 5**

|         |  |     |
|---------|--|-----|
| 5.1     | P.L.C.....   | 174 |
| 5.1.1   | SELECCIÓN DEL CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE... .. | 174 |
| 5.1.2   | CARACTERÍSTICAS.....                               | 175 |
| 5.2     | SISTEMA DE CONTROL DE CALIDAD .....                | 176 |
| 5.2.1   | CONTROL DEL PESO DE LA BOTELLA.....                | 177 |
| 5.2.1.1 | Accionamiento del control de peso .....            | 178 |
| 5.2.2   | CONTROL DE POSICIONAMIENTO DE TAPAS.....           | 179 |

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 5.3   | PROCESO DE TAPADO .....                         | 180 |
| 5.4   | CONTROL DE LA VELOCIDAD DE LA BANDA .....       | 181 |
| 5.4.1 | COMPONENTES UTILIZADOS .....                    | 182 |
| 5.4.2 | ANÁLISIS Y SIMULACIÓN .....                     | 183 |
| 5.4.3 | DESARROLLO DEL DIAGRAMA ESCALERA (LADDER) ..... | 184 |

**CAPÍTULO 6**

|         |                                       |     |
|---------|---------------------------------------|-----|
| 6.1     | SISTEMA MECÁNICO .....                | 194 |
| 6.1.1   | ESTRUCTURA GENERAL .....              | 194 |
| 6.1.2   | BANDA TRANSPORTADORA .....            | 197 |
| 6.1.3   | DISPENSADOR DE TAPAS .....            | 198 |
| 6.2     | SISTEMA NEUMÁTICO .....               | 200 |
| 6.3     | SISTEMA ELÉCTRICO-ELECTRÓNICO .....   | 202 |
| 6.3.1   | SENSORES .....                        | 202 |
| 6.3.2   | MOTORES ELÉCTRICOS .....              | 205 |
| 6.3.2.1 | Motor para banda transportadora ..... | 205 |
| 6.3.2.2 | Motor para roscado de tapas .....     | 206 |
| 6.4     | CIRCUITOS ELECTRÓNICOS .....          | 207 |
| 6.5     | PANEL DE CONTROL .....                | 209 |
| 6.6     | SISTEMA DE CONTROL .....              | 211 |
| 6.6.1   | CONTROL DE CALIDAD .....              | 211 |
| 6.6.2   | TAPADO DE BOTELLAS .....              | 212 |
| 6.6.3   | CONTROLADOR PID .....                 | 212 |
| 6.6.4   | CONTROL CON EL PANEL .....            | 213 |

**CAPÍTULO 7**

|                       |  |     |
|-----------------------|--|-----|
| CONCLUSIONES .....    |  | 214 |
| RECOMENDACIONES ..... |  | 215 |
| REFERENCIAS .....     |  | 216 |
| ANEXOS .....          |  | 218 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Fig. 2.1 Sensores digitales: encoder, manómetro digital, sensor triaxial. .... | 14 |
| Fig. 2.2 Sensores analógicos: potenciómetro, galga, RVDT, acelerómetro. ....   | 14 |
| Fig. 2.3 Partes del rotor. ....  | 20 |
| Fig. 2.4 Partes del estator. ....  | 21 |
| Fig. 2.5 Elementos básicos de un PLC. ....                                     | 22 |
| Fig. 2.6 PLC compacto. ....  | 23 |
| Fig. 2.7 PLC modular. ....   | 24 |
| Fig. 2.8 Estructura externa de un PLC. ....                                    | 24 |
| Fig. 2.9 Estructura interna de un PLC. ....                                    | 25 |
| Fig. 2.10 Ciclo “scan” de un PLC. ....   | 28 |
| Fig. 2.11 Diagrama de contactos. ....  | 31 |
| Fig. 2.12 Diagrama de funciones. ....  | 32 |
| Fig. 2.13 Ejemplo de Instrucción AWL. ....                                     | 33 |
| Fig. 2.14 Cilindros, motores y válvulas hidráulicas. ....                      | 38 |
| Fig. 2.15 Motor neumático. ....  | 39 |
| Fig. 2.16 Partes de un cilindro neumático. ....                                | 40 |
| Fig. 2.17 Cilindro de simple efecto. ....                                      | 41 |
| Fig. 2.18 Cilindro de doble efecto simple y doble vástago. ....                | 42 |
| Fig. 2.19 Diagrama de partes de una electroválvula. ....                       | 44 |
| Fig. 2.20 Diagrama de funcionamiento de una electroválvula 4/2. ....           | 45 |
| Fig. 2.21 Electroválvula 2/2 normalmente cerrada. ....                         | 46 |
| Fig. 2.22 Electroválvula 3/2 normalmente cerrada. ....                         | 46 |
| Fig. 2.23 Electroválvula 2/2 normalmente cerrada pilotada. ....                | 47 |
| Fig. 2.24 Electroválvula 4/2 pilotada. ....                                    | 48 |
| Fig. 3.1 Envase de plástico a utilizar. ....                                   | 51 |
| Fig. 3.2 Diseño CAD de la estructura de soporte. ....                          | 53 |
| Fig. 3.3 Diagrama de distribución de fuerzas en el lateral 1. ....             | 56 |
| Fig. 3.4 Análisis del momento por cortante sobre el lateral 1. ....            | 58 |
| Fig. 3.5 Diagrama de los parámetros a considerar. ....                         | 60 |
| Fig. 3.6 Diagrama de distribución de fuerzas en el lateral 2. ....             | 62 |
| Fig. 3.7 Análisis del momento por cortante sobre el lateral 2. ....            | 64 |
| Fig. 3.8 Diagrama de los parámetros a considerar del lateral 2. ....           | 65 |
| Fig. 3.9 Diagrama lateral de la banda transportadora. ....                     | 71 |
| Fig. 3.10 Diagrama de cuerpo libre sobre la banda. ....                        | 73 |
| Fig. 3.11 Motor 100:1 Metal Gearmotor. ....                                    | 76 |
| Fig. 3.12 Dimensionamiento general del rodillo. ....                           | 76 |
| Fig. 3.13 Distribución de fuerzas sobre el rodillo. ....                       | 77 |
| Fig. 3.14 Diagrama de la tensión en el rodillo. ....                           | 77 |

|  |     |
|--|-----|
| Fig. 3.15 Distribución de fuerzas plano Y-Z. ....                                    | 78  |
| Fig. 3.16 Diagrama de fuerzas del eje plano Y-Z. ....                                | 79  |
| Fig. 3.17 Diagrama de momentos del eje plano Y-Z. ....                               | 79  |
| Fig. 3.18 Distribución de fuerzas plano X-Z. ....                                    | 80  |
| Fig. 3.19 Diagrama de fuerzas del eje plano X-Z. ....                                | 80  |
| Fig. 3.20 Diagrama de momentos del eje plano X-Z. ....                               | 81  |
| Fig. 3.21 Sección del rodillo sometida a cálculo. ....                               | 81  |
| Fig. 3.22 Diagrama del rodillo para análisis de deflexión. ....                      | 89  |
| Fig. 3.23 Diagrama del sistema dispensador de tapas. ....                            | 91  |
| Fig. 3.24 Análisis experimental del ángulo de inclinación del dispensador. ....      | 93  |
| Fig. 3.25 Diagrama de cuerpo libre de la mesa inclinada. ....                        | 94  |
| Fig. 3.26 Dimensionamiento de la mesa inclinada. ....                                | 95  |
| Fig. 3.27 Distancia en mm de las fuerzas sobre la mesa inclinada. ....               | 96  |
| Fig. 3.28 Diagrama de los parámetros de la base del dispensador. ....                | 97  |
| Fig. 3.29 Modelo CAD del dispensador de tapas. ....                                  | 98  |
| Fig. 3.30 Sección transversal de la columna de soporte del dispensador. ....         | 99  |
| Fig. 3.31 Placa en U para el cilindro de separación. ....                            | 104 |
| Fig. 3.32 Placa en U para el cilindro de sujeción. ....                              | 110 |
| Fig. 3.33 Distancia desde la entrada en la banda hasta el cilindro. ....             | 112 |
| Fig. 3.34 Placa para el cilindro de separación. ....                                 | 114 |
| Fig. 3.35 Distancia desde la entrada en la banda hasta el cilindro de sujeción. .... | 117 |
| Fig. 3.36 Elementos utilizados para determinar el torque de ajuste. ....             | 119 |
| Fig. 3.37 Proceso experimental para determinar el torque. ....                       | 119 |
| Fig. 3.38 Servomotor HITEC HS-805 BB. ....   | 120 |
| Fig. 3.39 Vista lateral de la mesa de la etapa de roscado. ....                      | 125 |
| Fig. 3.40 Diagrama de análisis de la parte superior de la columna. ....              | 127 |
| Fig. 3.41 Racores y silenciador utilizados. ....                                     | 130 |
| Fig. 3.42 Regulador de caudal y símbolo. ....  | 130 |
| Fig. 3.43 Ubicación en mm de elementos respecto al rodillo 1 de la banda. ..         | 131 |
| Fig. 3.44 Diagrama fase – tiempo de los cilindros involucrados. ....                 | 131 |
| Fig. 4.1 Celda de carga “Single Point Dual-Beam”. ....                               | 134 |
| Fig. 4.2 Disposición de las galgas en la celda de carga. ....                        | 135 |
| Fig. 4.3 Galga extensiométrica. ....   | 135 |
| Fig. 4.4 Circuito de puente completo. ....   | 137 |
| Fig. 4.5 Sensor magnético. ....  | 138 |
| Fig. 4.6 Interruptor REED. ....  | 139 |
| Fig. 4.7 Sensores ópticos. ....  | 140 |
| Fig. 4.8 Sensor de reflexión directa. ....   | 140 |
| Fig. 4.9 Sensor de reflexión mediante espejo. ....                                   | 141 |

|  |     |
|--|-----|
| Fig. 4.10 Sensor óptico de barrera.....  | 141 |
| Fig. 4.11 Sensor magnético para final de carrera de cilindro neumático. ....                                   | 142 |
| Fig. 4.12 Sensor óptico de reflexión TCRT 5000. ....   | 143 |
| Fig. 4.13 Sensor óptico tipo “slot” con fototransistor de salida TCST1103. ....                                | 144 |
| Fig. 4.14 Sensor de contacto mecánico (microswitch).....   | 145 |
| Fig. 4.15 Diagrama de distribución de los circuitos del módulo didáctico. ....                                 | 146 |
| Fig. 4.16 Amplificador operacional LM358.....  | 148 |
| Fig. 4.17 Configuración de amplificador no inversor. ....  | 149 |
| Fig. 4.18 Circuito de acondicionamiento de señal de los sensores ópticos<br>(de reflexión y tipo “slot”). .... | 150 |
| Fig. 4.19 Optoacoplador 4N35.....  | 151 |
| Fig. 4.20 Arreglo Darlington de transistores.....  | 152 |
| Fig. 4.21 Circuito de control de velocidad del motor con arreglo Darlington. ..                                | 152 |
| Fig. 4.22 Circuito pasa bajos. ....  | 154 |
| Fig. 4.23 Diagrama del amplificador de instrumentación AD620. ....   | 154 |
| Fig. 4.24 Configuración del amplificador de instrumentación AD620.....   | 155 |
| Fig. 4.25 Diagrama de pines del amplificador LM741. ....   | 156 |
| Fig. 4.26 Configuración de seguidor de voltaje.....  | 156 |
| Fig. 4.27 Circuito de amplificación de la señal de la celda de carga. Filtro<br>Butterworth.....               | 157 |
| Fig. 4.28 Filtro pasa bajo de segundo orden Butterworth. ....  | 158 |
| Fig. 4.29 Sensor óptico protegido con resistencia para elementos internos. ..                                  | 160 |
| Fig. 4.30 Arreglo de resistencias para transistor 2N3904. ....   | 161 |
| Fig. 4.31 Amplificador provisto con resistencias para aumento de 20 veces..                                    | 161 |
| Fig. 4.32 Optoacoplador provisto de resistencias. ....   | 162 |
| Fig. 4.33 Configuración Darlington para el control del motor. ....   | 163 |
| Fig. 4.34 Valores de los capacitores del filtro pasa bajo. ....  | 164 |
| Fig. 4.35 Configuración del amplificador de instrumentación con RG<br>variable. ....                           | 165 |
| Fig. 4.36 Configuración del amplificador de seguidor de voltaje con LM741. .                                   | 166 |
| Fig. 4.37 Configuración del amplificador no inversor de voltaje con LM741. ..                                  | 167 |
| Fig. 4.38 Filtro pasa bajo de segundo orden Butterworth. ....  | 169 |
| Fig. 4.39 Circuito de recolección de señales de entrada y salida. ....   | 170 |
| Fig. 4.40 Diagrama de pines del PIC 16F877A.....   | 171 |
| Fig. 4.41 Pantalla LCD 2x16. ....  | 172 |
| Fig. 4.42 Circuito electrónico del controlador PIC 16F877A. ....   | 172 |
| Fig. 5.1 Controlador Lógico S7-1200, CPU y algunos módulos adicionales. ..                                     | 174 |
| Fig. 5.2 Etapa de ingreso y pesaje de botellas. ....   | 177 |
| Fig. 5.3 Bloque convertidor de del dato de entero a real. ....   | 178 |
| Fig. 5.4 Bloque “In_Range” para establecer un rango del dato de peso.....                                      | 179 |

|  |     |
|--|-----|
| Fig. 5.5 Etapa de posicionamiento de tapas y separación de botellas.....   | 180 |
| Fig. 5.6 Etapa de roscado de las botellas plásticas. ....  | 181 |
| Fig. 5.7 Elementos para el control de velocidad. ....  | 182 |
| Fig. 5.8 Simulación del encoder con un PIC 16F877A.....  | 184 |
| Fig. 5.9 Contador rápido HSC del S7 1200.....  | 185 |
| Fig. 5.10 Activación de los contadores rápidos en la configuración del CPU del PLC S7 1200, en el Programa “TIA Portal” . .... | 186 |
| Fig. 5.11 “TIMER_ON” de reseteo del valor de conteo del HSC contador rápido a cada segundo. ....                               | 187 |
| Fig. 5.12 Conversión de la variable ID1000 a formato de variable tipo “Real”, para posterior tratamiento. ....                 | 187 |
| Fig. 5.13 Multiplicación de la variable de conteo tipo real por la constante. ...  | 188 |
| Fig. 5.14 Bloque de programación PID. ....   | 188 |
| Fig. 5.15 Cuadro de dialogo de programación del “Cyclic interrupt”. ....   | 189 |
| Fig. 5.16 Cuadro de dialogo para escoger el tipo de control PID.....   | 190 |
| Fig. 5.17 Cuadro de dialogo para escoger el tipo regulación y parámetros de entrada y salida del bloque PID. ....              | 190 |
| Fig. 5.18 Cuadro de dialogo para escoger la instancia en donde va a trabajar el PID. ....                                      | 191 |
| Fig. 5.19 Botón de puesta en servicio del bloque PID. ....   | 191 |
| Fig. 5.20 Ventana de puesta en servicio del bloque PID. ....   | 192 |
| Fig. 6.1 Simulación de deformación de la base general. ....  | 195 |
| Fig. 6.2 Implementación del sistema automático sobre la base general.....  | 195 |
| Fig. 6.3 Análisis de deformación sobre la estructura de bancada.....   | 196 |
| Fig. 6.4 Implementación de la estructura de bancada. ....  | 196 |
| Fig. 6.5 Tornillo tensador para la banda transportadora. ....  | 197 |
| Fig. 6.6 Salida de botellas defectuosas. ....  | 198 |
| Fig. 6.7 Opción uno para dispensador. ....   | 199 |
| Fig. 6.8 Opción dos para dispensador. ....   | 199 |
| Fig. 6.9 Guía acoplada al cilindro de sujeción. ....   | 201 |
| Fig. 6.10 Pruebas de funcionamiento dato inestable del peso.....   | 202 |
| Fig. 6.11 Dato del peso luego de los cambios propuestos.....   | 204 |
| Fig. 6.12 Sensor óptico reflexivo, magnético y foto-interruptor. ....  | 205 |
| Fig. 6.13 Motor eléctrico implementado en el sistema. ....   | 206 |
| Fig. 6.14 Motor eléctrico de roscado y sus elementos. ....   | 207 |
| Fig. 6.15 Circuito implementado para el motor de la banda.....   | 208 |
| Fig. 6.16 Tablero de control del sistema didáctico.....  | 210 |
| Fig. 6.17 Tapa colocada sobre el envase. ....  | 211 |
| Fig. 6.18 Proceso de roscado. ....   | 212 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|  |     |
|--|-----|
| Tabla 2.1 Elementos básicos que conforman un motor D.C. ....                             | 19  |
| Tabla 3.1 Características del envase plástico.....                                       | 52  |
| Tabla 3.2 Algunas propiedades de los termoplásticos involucrados.....                    | 52  |
| Tabla 3.3 Opciones de material a utilizar en la estructura de bancada.....               | 55  |
| Tabla 3.4 Pesos y distancias de los elementos involucrados. ....                         | 57  |
| Tabla 3.5 Algunas propiedades mecánicas del aluminio 6061. ....                          | 59  |
| Tabla 3.6 Factor de seguridad bajo condiciones de trabajo.....                           | 59  |
| Tabla 3.7 Pesos y distancias de otros elementos sobre el lateral 2.....                  | 63  |
| Tabla 3.8 Características técnicas de la banda de PVC.....                               | 70  |
| Tabla 3.9 Coeficiente de fricción del acero con algunos materiales. ....                 | 73  |
| Tabla 3.10 Datos técnicos del motor seleccionado.....                                    | 75  |
| Tabla 3.11 Valores de coeficientes según el tipo de acabado superficial.....             | 88  |
| Tabla 3.12 Valores para el factor de confiabilidad.....                                  | 88  |
| Tabla 3.13 Datos experimentales del ángulo de inclinación. ....                          | 93  |
| Tabla 3.14 Algunas propiedades mecánicas del acero galvanizado.....                      | 94  |
| Tabla 3.15 Características del cilindro seleccionado para el abastecimiento. ....        | 106 |
| Tabla 3.16 Características del cilindro seleccionado para la separación.....             | 111 |
| Tabla 3.17 Características del cilindro seleccionado para la sujeción. ....              | 115 |
| Tabla 3.18 Características del cilindro seleccionado para el roscado.....                | 121 |
| Tabla 3.19 Datos técnicos de la electroválvula monoestable. ....                         | 129 |
| Tabla 3.20 Datos técnicos de la electroválvula biestable.....                            | 129 |
| Tabla 4.1 Tabla de especificaciones generales de la celda de carga.....                  | 134 |
| Tabla 4.2 Código de colores de cables de celda de carga. ....                            | 134 |
| Tabla 4.3 Tabla de las principales características del sensor óptico. ....               | 143 |
| Tabla 4.4 Tabla de las principales características del sensor óptico. ....               | 144 |
| Tabla 4.5 Tabla de las principales características del amplificador<br>operacional. .... | 149 |
| Tabla 4.6 Tabla de las principales características del Optoacoplador. ....               | 151 |
| Tabla 4.7 Características del amplificador de instrumentación AD620.....                 | 155 |
| Tabla 4.8 Características del amplificador de instrumentación LM741.....                 | 156 |
| Tabla 4.9 Tabla de las principales características del transistor NPN. ....              | 160 |
| Tabla 4.10 Tabla de las principales características del transistor NPN TIP41.....        | 163 |
| Tabla 4.11 Valores máximo y mínimo de ganancias.....                                     | 165 |
| Tabla 4.12 Valores máximo y mínimo de ganancias.....                                     | 167 |
| Tabla 4.13 Características principales del PIC 16F877A.....                              | 171 |
| Tabla 5.1 Características de los modelos del CPU S7-1200. ....                           | 176 |
| Tabla 5.2 Valores de voltaje según el color. ....  | 179 |
| Tabla 6.1 Descripción general de los cilindros neumáticos. ....                          | 200 |

|   |     |
|---|-----|
| Tabla 6.2 Descripción de las borneras de la placa general. .... | 209 |
| Tabla 6.3 Descripción del panel de control. ....                | 210 |

## RESUMEN

El presente trabajo consiste en el diseño y construcción de un sistema automático para el control de calidad y tapado de botellas plásticas con la finalidad de aportar con un equipo didáctico al laboratorio de Automatización Industrial y Mecatrónica de la ESPE, y de esta manera los estudiantes y personas que lo requieran puedan utilizar este dispositivo en la realización de trabajos prácticos de capacitación y de investigación. El equipo se implementa en base al diseño de tres sistemas considerando previamente un estudio general y detallado de los ítems o temarios necesarios, también en función a la adquisición de los elementos apropiados que realicen las funciones establecidas y de igual forma con la realización de simulaciones y pruebas de funcionamiento. Para el diseño del sistema mecánico se considera principalmente el tamaño del envase plástico, es decir que en base a este factor se realiza el dimensionamiento de la estructura metálica tomando en cuenta parámetros influyentes como la deformación y la estabilidad. Así también para el sistema electrónico se toma en cuenta factores ambientales como la temperatura y luz ambiente debido a la sensibilidad de ciertos dispositivos, otro aspecto que se considera es la interferencia a causa de ruidos de alta frecuencia para que los elementos como circuitos, sensores, motores no tengan problemas en su funcionamiento. Mientras que para el sistema de control se considera como aspecto fundamental el trabajo en conjunto, mediante la programación que se realiza en el PLC se pueda conseguir que todo el sistema funcione coordinadamente para de esta manera obtener un proceso eficiente.

## DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA AUTOMÁTICO DIDÁCTICO PARA EL CONTROL DE CALIDAD Y TAPADO DE BOTELLAS PLÁSTICAS EN EL LABORATORIO DE AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL Y MECATRÓNICA

Debido a los cambios en los procesos industriales que se han venido dando en los últimos tiempos, en el cual uno de los principales factores influyentes es la automatización que está permitiendo que los procesos se realicen en forma eficiente aumentando la calidad y producción de diversos productos; los estudiantes de ingeniería se ven en la obligación de adquirir experiencia en el manejo de equipos que trabajen de forma autónoma, motivo por el cual los centros de educación superior tienen la responsabilidad de mejorar y actualizar los equipos de trabajo, de tal manera que se garantice la formación de profesionales aptos para el entorno industrial actual.

Una de las necesidades existentes en el laboratorio de Automatización Industrial y Mecatrónica de la ESPE es la carencia de equipos apropiados que trabajen de forma conjunta con orientación mecatrónica. La finalidad del proyecto es aportar en parte a esta necesidad por medio de la implementación de una estación automática para el control de calidad y tapado de botellas plásticas, que para su desarrollo se abarcarán áreas de la ingeniería como la mecánica, la electrónica y el control.

Es así que mediante la programación adecuada en el controlador lógico programable el sistema desarrolla su funcionamiento de manera tal que todos los sub sistemas que lo conforman actúan de forma sincronizada generando un

proceso mecatrónico apropiado para la enseñanza y práctica de los estudiantes.

Garantizando así que los futuros profesionales del país adquieran mayor experiencia considerando que la carrera de Ingeniería Mecatrónica se está abriendo camino en el entorno industrial como una rama que permita brindar soluciones y desarrollar nuevas tecnologías.

# CAPÍTULO 1

## GENERALIDADES

### 1.1 ANTECEDENTES

Los procesos industriales tienen como su propósito principal el de transformar materias primas en un producto final. De tal manera que la intención de este proceso está basada en el aprovechamiento eficaz de los recursos naturales de forma tal que éstos se conviertan en materiales, herramientas y sustancias capaces de satisfacer más fácilmente las necesidades de los seres humanos y por consecuencia mejorar su calidad de vida.

Los procesos industriales en la economía de un país son fundamentales, por incluir valor agregado a los productos, generar empleo, entre otros factores de importancia para la sociedad.

La instrumentación provee el significado del proceso de producción para asegurar que los productos sean elaborados apropiadamente, los instrumentos son diseñados para medir, indicar, controlar o almacenar la información de las variables del proceso, además de manipular mecanismos que controlen diversos estados de un proceso. Algunos procesos son muy similares, pero eso no significa que sean exactamente iguales, por lo tanto, no todos los procesos tienen las mismas necesidades de control.

La Escuela Politécnica del Ejército de Ecuador (ESPE) tiene su origen en 1922 cuando se creó la Escuela de Oficiales Ingenieros que posteriormente se transformó en Escuela de Artillería e Ingenieros en 1936. Dada la trascendencia de la Ingeniería a nivel mundial y en particular luego de la segunda guerra, se la tiene por Escuela Técnica de Ingenieros. La carrera de Mecatrónica, fue creada el 3 de febrero del 2006, con orden de rectorado N° 2006-026-ESPE-a-3.

Es una carrera de tercer nivel (pregrado) que ofrece un proceso de formación académica, con base científica, técnica y humanística relacionada con el concebir, proyectar, adaptar, aplicar y mantener sistemas en los que intervienen elementos mecatrónicos así como también de la gestión de los mismos.

El Ingeniero Mecatrónico graduado en la ESPE es un profesional con una sólida formación científica, técnica y humanística con conciencia social, respetuoso de la legislación vigente y del medio ambiente; ejerce liderazgo en los diversos contextos de actuación profesional y personal.

La cualidad esencial del Ingeniero Mecatrónico consiste en encontrar soluciones a problemas técnicos de cualquier índole, que presenten una solución basada en un principio mecatrónico para su funcionamiento.

Actualmente la ESPE cuenta con un número reducido de laboratorios propios y adecuados para el área de Mecatrónica, los mismos que carecen de equipos e instrumentos modernos y en buen estado, que sean apropiados para la enseñanza.

En el laboratorio de CAD-CAM se localiza específicamente el área de AIM (Automatización Industrial y Mecatrónica), donde se encuentra una máquina dosificadora fuera de servicio, la cual consiste básicamente en tres depósitos o reservorios que contienen líquido para el envasado de las botellas; las cuales son colocadas bajo dichos depósitos mediante una banda transportadora.

El sistema fue utilizado para la realización de prácticas de laboratorio, sin embargo actualmente está fuera de servicio y consta con implementos deteriorados que imposibilitan su uso por parte de los estudiantes.

Debido a esto y considerando un proceso desde el punto de vista industrial se puede implementar un sistema adicional que puede ser considerado como un complemento didáctico, el cual es utilizado en la industria dosificadora de envases y que constará de dos etapas como son el control de calidad y el tapado de botellas plásticas, para de esta manera obtener un producto final completo y un sistema óptimo para la enseñanza.

## **1.2 JUSTIFICACIÓN**

La automatización se ha convertido en una necesidad, especialmente en el ámbito industrial ya que aporta con grandes beneficios a dicho sector, entre los que se puede mencionar el incremento en la producción, reducción de costes y tiempos de procesos, seguridad, generación de plazas de empleo para expertos y personal capacitado, entre otros.

Motivos por los cuales el país se ve en la obligación y necesidad de generar profesionales altamente capacitados en las distintas áreas relacionadas con la automatización; por lo que se requiere docentes especializados, espacios apropiados y laboratorios provistos con materiales y equipos modernos que permitan involucrar al estudiante con procesos de aplicación industrial reales garantizando la calidad de enseñanza y aprendizaje.

La realización de prácticas de laboratorio en el área de automatización es esencial para la formación de los profesionales en las distintas ramas afines de la ingeniería, ya que les permite desarrollar habilidades, destrezas, innovación y creatividad. También motiva a investigar y proponer proyectos que den solución a los problemas del sector comercial, industrial y manufacturero en general.

En la actualidad la importancia que tiene los distintos equipos de laboratorio tanto en el área de aprendizaje, así como para generar investigación o en la industria es prácticamente un requisito incuestionable.

La Escuela Politécnica del Ejército con la finalidad de mantenerse como gestora del conocimiento y de la tecnología, así como de formar profesionales de gran creatividad y excelencia que contribuyan con el desarrollo de la sociedad; se ha encaminado hacia la innovación y fortalecimiento de los laboratorios ayudando al progreso cualitativo y cuantitativo de los servicios ofrecidos en los programas educativos.

El Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica de la ESPE ha propuesto para el laboratorio de Automatización Industrial y Mecatrónica la

implementación de un sistema didáctico de aplicación industrial con la finalidad de solventar a dicho laboratorio con un nuevo equipo para la realización de prácticas, optimizar e incrementar los implementos de trabajo de dicha área, y además mejorar la calidad de enseñanza y aprendizaje práctico por parte de docentes y estudiantes.

Por los motivos mencionados anteriormente, el propósito de la realización de este proyecto es básicamente aportar con el mejoramiento del laboratorio ya que el sistema a implementar constará con equipos y tecnología actual; que realizará durante su funcionamiento procesos secuenciales muy empleados en el ámbito industrial, por lo que el mismo tendría gran acogida y alta aplicabilidad en dicha área y también permitirá desarrollar en el estudiante mayor interés de investigación y su capacidad de ingenio.

Además el sistema podrá ser considerado a futuro como complemento modular de la máquina dosificadora que actualmente está fuera de servicio, ya que con el acondicionamiento técnico apropiado la misma sería la encargada de abastecerla de botellas, logrando tener así un módulo complementario en el laboratorio.

El sistema es considerado como didáctico ya que consta de etapas o subprocesos que permiten visualizar el trabajo automático y coordinado de los dispositivos que lo conforman, abarcando diferentes áreas de la ingeniería como la neumática, la electrónica, la instrumentación, el control, entre otros, para impartirlas en el proceso de enseñanza; y que además podrá ser utilizado

especialmente por los estudiantes tanto de la carrera de Ingeniería Mecatrónica como de Mecánica y por todos quienes así lo requieran.

## **1.3 OBJETIVOS**

### **1.3.1 GENERAL**

Diseñar y construir un sistema automático didáctico para el control de calidad y tapado de botellas plásticas utilizando métodos mecánicos, electrónicos y de control; que contribuya con un nuevo equipo al laboratorio de Automatización Industrial y Mecatrónica de la ESPE.

### **1.3.2 ESPECÍFICOS**

- Determinar los parámetros físicos y mecánicos involucrados durante el funcionamiento del sistema automático para de esta manera diseñar una estructura de bancada que posea resistencia y estabilidad acorde a las necesidades de trabajo.
- Analizar las condiciones necesarias de trabajo bajo las cuales el sistema de control de calidad determina el peso apropiado del producto y el tapado del envase para llevar un registro de producción, el cual se visualizará en un LCD acoplado a la máquina.
- Diseñar y validar un mecanismo de control apropiado que permita mantener constante la velocidad de la banda transportadora, de acuerdo al número de botellas que se encuentren colocadas sobre la misma.

- Diseñar y construir un sistema que cumpla con todos los requerimientos de accionamientos neumáticos que la planta necesite, de una manera eficiente y con el número apropiado de elementos para su funcionamiento.

## 1.4 ALCANCE DEL PROYECTO

El presente proyecto está destinado a la construcción de un sistema didáctico automático para el control de calidad y tapado de botellas plásticas en el Laboratorio de Automatización Industrial y Mecatrónica de la ESPE; debido a que el mismo posee un número reducido de equipos apropiados para la capacitación en procesos automáticos que trabajen en conjunto; por tal motivo se dotará con una estación de trabajo, con el propósito de familiarizar a quienes lo requieran con dichos procesos que involucran áreas como la mecánica, la neumática, el control eléctrico, microcontroladores y controladores lógicos programables.

Para la ejecución del proyecto se inicia con el análisis de las características principales que permitan definir al sistema didáctico de tal manera que queden establecidas las distintas actividades y tareas a realizar.

El proceso del equipo consiste en el control de calidad y tapado de botellas plásticas, para lo cual se las llenará previamente y se las colocarán en el área de ingreso; en donde se pesará cada envase lleno, previo a su ubicación en la banda transportadora, y así determinar que dicha variable sea la correcta, y de esta forma llevar un registro del primer sub-proceso del control de calidad.

Posteriormente la botella será colocada en la banda, sobre la cual se ubicará un mecanismo dispensador de tapas, que permitirá la colocación de una tapa sobre el envase cuando éste pase por debajo de dicho mecanismo.

A continuación en el segundo sub-proceso se verifica la presencia o no de la tapa basándose en el color de la misma mediante un sensor óptico; una vez que el envase ha pasado por la etapa de control se determina la calidad de la botella; es decir si cumple con las condiciones de los dos sub-procesos pasará hacia la siguiente etapa, de lo contrario la botella será retirada de la banda transportadora.

Finalmente al cumplir con la etapa de control de calidad el envase se dirigirá hacia la etapa de sujeción y roscado, en donde mediante un sistema neumático y eléctrico se enroscará la tapa sobre la botella, obteniendo de esta manera un proceso industrial implementado en el laboratorio de AIM.

## **CAPÍTULO 2**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1 INSTRUMENTACIÓN**

##### **2.1.1 INTRODUCCIÓN**

Actualmente los diversos procesos de carácter industrial requieren el control en la elaboración de un determinado producto, por tal motivo es un requisito incuestionable controlar ciertos parámetros tales como temperatura, presión, nivel, peso, etc. Los instrumentos existentes de medición y control, facilitan la realización del mantenimiento y regulación de estas constantes obteniendo condiciones de operación más eficientes.

##### **2.1.2 SENSOR**

Se define al sensor como un dispositivo electrónico el cual permite transformar una variable física en una forma de energía medible es decir voltaje, corriente, variación de carga o de impedancia, y que se utiliza para dar una indicación visual de forma directa o indirecta; como una señal de control a un actuador o a un controlador. Por tanto el sensor entrega una magnitud la cual es el resultado de los cambios que en él se generan a causa del fenómeno físico sensado.

### 2.1.2.1 Acondicionamiento

El acondicionamiento de señal se refiere a modificaciones o cambios necesarios para corregir las variaciones en la entrada/salida de un sensor, de modo que su salida tiene una relación lineal con la variable de proceso que se está midiendo, y la señal es entonces adecuado para su uso por otros elementos en el bucle de control de proceso. Existen tres maneras de realizar este proceso:

- Aislamiento

Generalmente es aplicado en situaciones en donde el sistema monitoreado adquiere transitorios de altos voltajes que pueden ocasionar deterioros en el mismo. Además es utilizado para eliminar los denominados *ground loops*, es decir cuando el sensor está en un plano diferente de referencia de tierra.

Por esta razón es preciso tener el aislamiento y la atenuación para prevenir al sistema y al usuario de posibles voltajes de alta tensión o picos.

- Amplificación

Cuando los niveles de voltaje que se va a medir son muy pequeños, la señal será amplificada de tal forma que el voltaje máximo alcanzable y el valor máximo del rango de entrada deben ser iguales, obteniendo una resolución máxima.

- **Linealización**

Mediante la utilización de circuitos eléctricos o con programas informáticos de cálculo numérico se realiza un proceso de linealización. En circuitos analógicos la linealización es difícil a menos que exista una ecuación relativamente simple para describir las características del sensor.

Mientras que la linealización en los circuitos digitales se puede realizar para los dispositivos no lineales mediante el uso de ecuaciones o de tablas de consulta. Si la relación entre los valores de una variable medida y la salida de un sensor puede ser expresada por una ecuación, el procesador puede ser programado sobre la base de la ecuación para linealizar los datos recibidos desde el sensor.

### **2.1.2.2 Clasificación**

De acuerdo al tipo de señal de trabajo tanto a la entrada como a la salida, los sensores pueden clasificarse en:

#### **2.1.2.2.1 Sensores Discretos**

También conocidos como sensores digitales, son aquellos que generan a su salida dos valores de señal, uno de estado alto (1) y uno de estado bajo (0), y la conmutación entre estados se origina en un punto determinado de la variable física sensada.

Tienen transmisión de salida más fácil, además de poseer mayor fidelidad y fiabilidad. Uno de los problemas más grandes con la que se enfrenta este tipo

de sensores es la falta de modelos digitales para todas las magnitudes físicas mayormente presentes en procesos industriales.

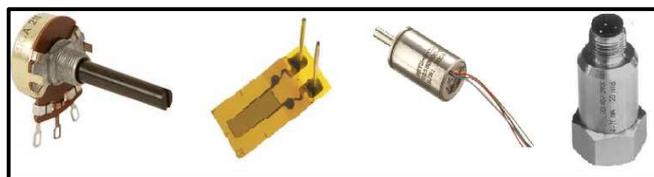


Fuente: [http://www.sensores-de-medida.es/sensing\\_sl/SENSORES-Y-TRANSDUCTORES\\_35/Aceler%C3%B3metros---Sensores-de-aceleraci%C3%B3n\\_49/](http://www.sensores-de-medida.es/sensing_sl/SENSORES-Y-TRANSDUCTORES_35/Aceler%C3%B3metros---Sensores-de-aceleraci%C3%B3n_49/), Acelerómetros triaxiales, Español.

**Fig. 2.1** Sensores digitales: encoder, manómetro digital, sensor triaxial.

#### 2.1.2.2.2 Sensores Analógicos

Son aquellos que proporcionan a su salida un valor variable y de forma continua ya sea de voltaje o corriente. Este tipo de sensores deben poseer propiedades importantes como la sensibilidad, linealidad, confiabilidad, velocidad de respuesta, entre otros; esto con el objetivo de que el control de la variable sea en el menor tiempo de respuesta y de la mejor manera posible. Generalmente poseen una etapa de salida para proporcionar señales estándar en el rango de 4 a 20 mA o de 0 a 10 V.



Fuente: [http://www.sensores-de-medida.es/sensing\\_sl/SENSORES-Y-TRANSDUCTORES\\_35/Aceler%C3%B3metros---Sensores-de-aceleraci%C3%B3n\\_49/](http://www.sensores-de-medida.es/sensing_sl/SENSORES-Y-TRANSDUCTORES_35/Aceler%C3%B3metros---Sensores-de-aceleraci%C3%B3n_49/), Acelerómetros piezoeléctricos, Español.

**Fig. 2.2** Sensores analógicos: potenciómetro, galga, RVDT, acelerómetro.

### **2.1.3 NORMAS PARA LA INSTRUMENTACIÓN INDUSTRIAL**

El propósito de las normas es la de representar y designar a los instrumentos empleados para medir y controlar procesos; las cuales pueden variar dependiendo de la necesidad industrial; es así que varias organizaciones han encaminado sus esfuerzos a la generación de normas estandarizadas, entre las que se tiene:

#### **2.1.3.1 Instrument Society of America (ISA)**

El ISA fue fundado en 1945 como una organización educativa sin fines de lucro, interesados en el campo industrial enfocándose especialmente así en la instrumentación. ISA publicó su primer estándar en 1948. Desde entonces, ISA ha desarrollado más de 150 normas sobre automatización, instrumentación, sistemas de control, métodos recomendados y los informes técnicos.

La serie ISA – 5 es empleada en instrumentación e incluye lo siguiente:

ISA-5.1-1984-(R1992), símbolos de instrumentación e Identificación, presenta un amplio conjunto de símbolos y los métodos de identificación, se utiliza para designar los dispositivos de instrumentación y control en los documentos de diseño. ISA-5.1 es el estándar más utilizado en todo el mundo para la identificación de dispositivos de instrumentación y control y sistemas de PID.

ISA-5.2-1976-(R1992), diagramas de lógica binaria para operaciones de proceso, proporciona los símbolos adicionales utilizados en los diagramas

lógicos y describe un método de lógica de diagramas de encendido y apagado o sistemas de control binarias.

ISA-5.3-1983, símbolos gráficos para el Control Distribuido / Instrumentación pantalla compartida, Lógica y Sistemas Informáticos, desarrollado para complementar ISA-5.1 para la identificación de los instrumentos y dispositivos de control, cuando se utiliza sistemas de visualización y se comparte el control. Sin embargo, los elementos clave de ISA-5.3 se incluyen ahora en ISA-5.1, e ISA-5.3 será retirada.

ISA-5.4-1991, diagramas de bucle de instrumentos, incluye algunos símbolos adicionales y seis diagramas típicos bucle de instrumentos - dos para cada neumático, electrónico y pantalla compartida y lazos de control. Uno de cada tipo incluye los requisitos mínimos y que el segundo incluye los elementos mínimos es opcional.

ISA-5.5-1985, Símbolos gráficos para imágenes del proceso, establece un conjunto de símbolos que se utilizan en las pantallas de proceso para representar procesos y equipos.

### **2.1.3.2 American Petroleum Institute (API)**

API es la principal asociación comercial de petróleo y el gas con una membresía de alrededor de 400 organizaciones de todos los sectores de la industria. API tiene como objetivo proporcionar información y ayuda a la industria de petróleo y gas para mejorar la eficiencia y efectividad de costos,

cumplir con las reglas y regulaciones gubernamentales, proteger la salud, mejorar la seguridad y proteger el medio ambiente. API desarrolla y distribuye las normas técnicas y otras publicaciones sobre temas de la industria petrolera, tales como:

- Exploración y Producción
- Medición del Petróleo
- Tanques de Almacenamiento
- Transporte Marítimo
- Válvulas
- Instrumento de instalación

### **2.1.3.3 American Society of Mechanical Engineers (ASME)**

Hay varias normas ASME que pueden ser útiles en el desarrollo de instrumentos y documentos de control. Por ejemplo la norma Y32.11 se basa en símbolos gráficos para el Diagrama de Flujo de Procesos, incluye una serie de símbolos que representan:

- Líneas
- Recipientes a presión
- Válvulas
- Secadores
- Equipo de manejo de material
- Equipo de procesamiento
- Drivers

- Separadores

#### **2.1.3.4 Process Industry Practices (PIP)**

PIP es una coalición de propietarios de procesos industriales y contratistas de ingeniería / construcción que se ha desarrollado y continúa desarrollando prácticas recomendadas para todas las áreas del proceso de ingeniería y construcción.

ISA y PIP han firmado un convenio de colaboración que permite a ISA para utilizar el contenido de PICO01 PIP, tuberías y documentación de diagramas.

PIP está disponible actualmente como un proyecto de norma ISA para uso experimental, ISA-DSTU-2002-5.7.01, tuberías, criterios Instrumentación, Diagrama de Documentación.

Prácticas PIP Control de procesos incluyen los siguientes temas:

- Los reguladores de control
- Flujo
- Válvulas de control
- Presión

#### **2.1.3.5 Technical Association of the Pulp and Paper Industry (TAPPI)**

TAPPI es una asociación técnica fundada en 1915. Más de 20.000 miembros individuales están involucrados en la pulpa, el papel y la industria de transformación. TAPPI ha desarrollado y revisado los métodos de prueba y métodos estándar para el uso en la industria.

## 2.2 ACTUADORES ELÉCTRICOS

Los actuadores eléctricos convierten la energía eléctrica en energía mecánica rotacional. Entre las características más relevantes que poseen se pueden mencionar; fáciles de controlar, son sencillos pero de implementación delicada, tienen precisión y alta repetitividad, y en igualdad de potencia estos llegan a ser más pesados que los otros tipos de actuadores.

### 2.2.1 MOTORES DE DC

Un motor de corriente continua es un dispositivo capaz de que convertir la energía eléctrica en energía mecánica. Genera un alto par de arranque y permite la regulación de su velocidad de manera continua.

**Tabla 2.1** Elementos básicos que conforman un motor D.C.

| ELEMENTOS BÁSICOS DEL MOTOR D.C |                               |
|---------------------------------|-------------------------------|
| ROTOR                           | ESTATOR                       |
| Eje                             | Armazón                       |
| Núcleo y devanado               | Imán permanente               |
| Colector                        | Escobillas y porta escobillas |
|                                 | Tapas                         |

Fuente: Los Autores

#### 2.2.1.1 Características

Los motores de corriente continua tienen una amplia variedad de aplicaciones, debido a sus características importantes, entre las cuales están:

- Su amplio rango de velocidades, ajustables de modo continuo y controlable con alta precisión.
- Poseen característica de torque y velocidad variable,
- Tienen rápida aceleración, desaceleración y cambio de sentido de giro.
- Permiten realizar un frenado regenerativo.

### 2.2.1.2 Partes principales de un motor D.C.

El funcionamiento del motor D.C está basado en dos partes fundamentales:

- Rotor (Inducido): Es la parte móvil del motor, abastece con el torque necesarios para mover una carga, generalmente es un cilindro donde se enrollan bobinas de cobre, que hace girar a una cierta velocidad cortando el flujo inductor.

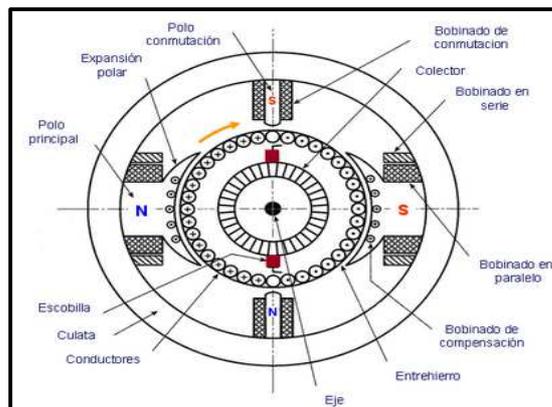


Fuente: Muniz A., Máquinas de C.C.

**Fig. 2.3** Partes del rotor.

- Estator (inductor): Constituye la parte fija de la máquina. Tiene como función suministrar el flujo magnético que será usado por el bobinado del rotor para realizar su movimiento giratorio.

Está formado por una corona de material ferromagnético en cuyo interior van colocados unos salientes radiales con una expansión en su extremo, llamados polos rodeados por unas bobinas de hilo, o pletina de cobre aislado, cuya misión es; al ser alimentadas por corriente continua, crear el campo magnético inductor de la máquina.



Fuente: <http://dc343.4shared.com/doc/tYg4EGTd/preview.html>, Características constructivas, Español.

**Fig. 2.4** Partes del estator.

## 2.3 CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE

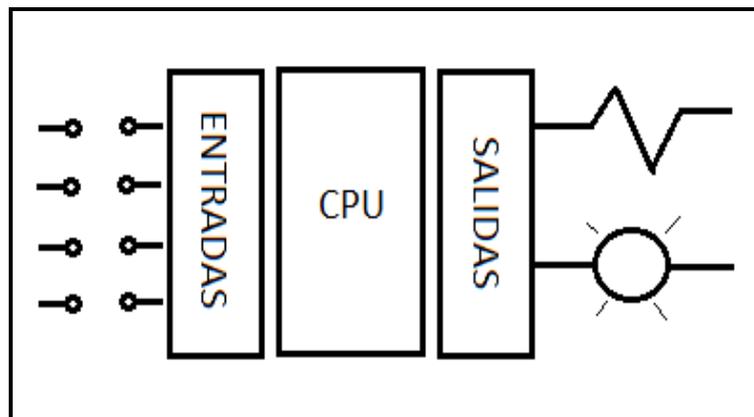
### 2.3.1 DEFINICIÓN

Un autómata programable o controlador lógico programable (PLC), es un controlador electrónico, el cual fue diseñado para el control en tiempo real de procesos secuenciales.

El PLC alberga un programa el cual se ejecuta de forma secuencial e iterativa utilizando diversos lenguajes de programación, generalmente lenguajes de contactos, lenguaje gráfico basado en representar conexiones físicas y

eléctricas. La presencia de PLCs es muy alta en el ámbito industrial, debido a su robustez y fiabilidad.

Un PLC monitoriza las señales de entrada provenientes de diversos eventos externos, con ello toma decisiones en base al programa de control y activa las salidas necesarias para automatizar un proceso.



Fuente: Los autores

**Fig. 2.5** Elementos básicos de un PLC.

- Espacio reducido, ya que reemplazan a los complejos automatismos cableados.
- Procesos que requieran de cambios continuos, por ser elementos programables las modificaciones son sencillas de realizar.
- Procesos complejos en los cuales es necesario una gran capacidad de procesamiento de datos y de toma de decisiones.
- Procesos secuenciales que se realizan de forma cíclica.

### 2.3.2 ARQUITECTURA EXTERNA

Una clasificación que se le da a los PLCs es tomar en cuenta la estructura externa de los elementos que lo conforman, existen dos estructuras básicas de los PLCs, que incluso son usadas en su comercialización, son:

- Estructura compacta: En este tipo de PLC, en un solo modulo están integrados todos los elementos que lo conforman, además existen opciones de módulos adicionales de ampliación los cuales aumentan la capacidad de entradas y salidas del PLC.



Fuente: <http://www.izaro.com/contenidos/ver.php?id=es&se=5&su=52&co=1339071608>, Productos y servicios, Español.

**Fig. 2.6** PLC compacto.

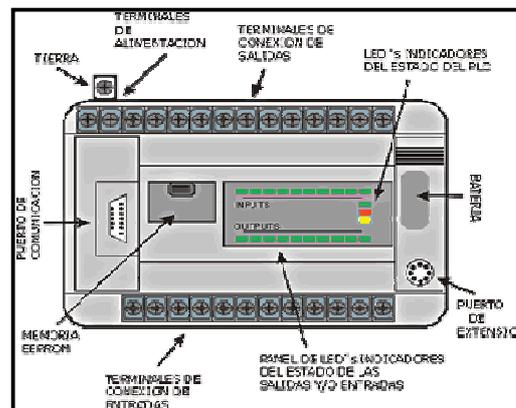
- Estructura modular: Este tipo de PLC, está conformado por varios módulos que realizan una función específica, para su correcto funcionamiento este está formado por módulos básicos que son la fuente de alimentación, el CPU, los módulos de entradas y los módulos de salida. Todos los módulos que forman el PLC se fijan en rieles normalizados de forma compacta.



Fuente: <http://www.my-siemens-plc.com/>, Simatic S7-1200, Inglés.

**Fig. 2.7** PLC modular.

A continuación se muestra los diferentes terminales que se pueden encontrar en un PLC, esta forma de distribución de los terminales está dada de forma general, ya que estos pueden variar de acuerdo al modelo del PLC.



Fuente: [http://prjtc221.blogspot.com/2013\\_03\\_01\\_archive.html](http://prjtc221.blogspot.com/2013_03_01_archive.html), Memorias, Español.

**Fig. 2.8** Estructura externa de un PLC.

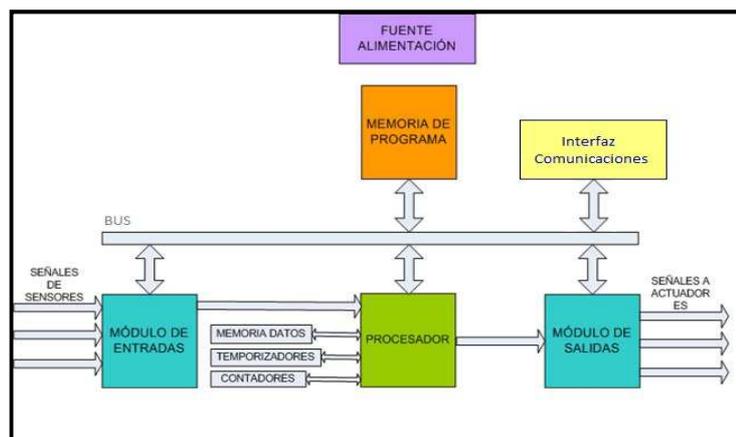
La alimentación de corriente eléctrica al PLC generalmente puede ser tomada directamente de la red, pero existen otros casos en los que se requerirá de una fuente de alimentación externa.

El propio PLC cuenta con una fuente interna para la alimentación de los elementos eléctricos que se utilizan en el proceso. En cuanto a las entradas y salidas estas están definidas por el fabricante de acuerdo a las tensiones que se van a manejar.

### 2.3.3 ARQUITECTURA INTERNA

Un PLC en su parte interna está formado por diferentes elementos que le permiten realizar todas las funciones para las cuales ha sido diseñado y son:

- CPU
- Memoria
- Sistemas de Entrada/Salida
- Interfaz de comunicación
- Bus de datos, dirección y control
- Fuente de alimentación



Fuente: <http://www.adrformacion.com/cursos/automatas1/leccion1/tutorial1.html>, Arquitectura interna de los autómatas programables, Español.

**Fig. 2.9** Estructura interna de un PLC.

- CPU: La unidad central de proceso o CPU, es el elemento del PLC que tiene la capacidad de tomar decisiones, esto por medio de la monitorización de las entradas y en función del programa almacenado en la memoria y ejecuta, además gestiona los demás componentes.
- Memoria: Existen varias áreas de memoria en un PLC, las mismas están clasificadas en zonas de trabajo específico dependiendo del procesador que utilice. Las memorias principales de un PLC son:
  - Memoria de programa: Almacena el programa de usuario.
  - Memoria de datos: Almacena los datos temporales de la ejecución del programa.
  - Memoria de sistema: Almacena el programa que monitoriza todo el sistema.
- Sistema de entrada y salida: Es la vía con la que el PLC se comunica con el proceso, el sistema de entrada recoge la información del exterior y el sistema de salida modifica el proceso por medio de actuadores, las entradas y salidas son analógicas, digitales, especiales (Contadores de alta velocidad, entradas de comparación, etc.) y realizan las siguientes funciones:
  - Separa de forma eléctrica los circuitos de alta potencia de los circuitos lógicos.
  - Adapta la tensión de los dispositivos externos a la tensión interna del PLC.
  - Permite la conexión física de los elementos externos.

- Interfaz de comunicación: Esto permite la comunicación del PLC con el exterior, realizando dos funciones:
  - Permite la comunicación con las unidades de programación para que la programación del PLC se pueda realizar fácilmente.
  - Permite la comunicación con otros PLCs, para la formación de redes de comunicación.
- Bus: Realiza la comunicación entre los elementos del sistema, de acuerdo a la información que transmite se clasifica en:
  - Bus de datos: Intercambia datos entre el área de memoria y el CPU.
  - Bus de direcciones: Ubica la posición del dato que el CPU requiere en la memoria.
  - Bus de control: De acuerdo a la información que transmite el CPU puede gestionar y controlar el sistema.

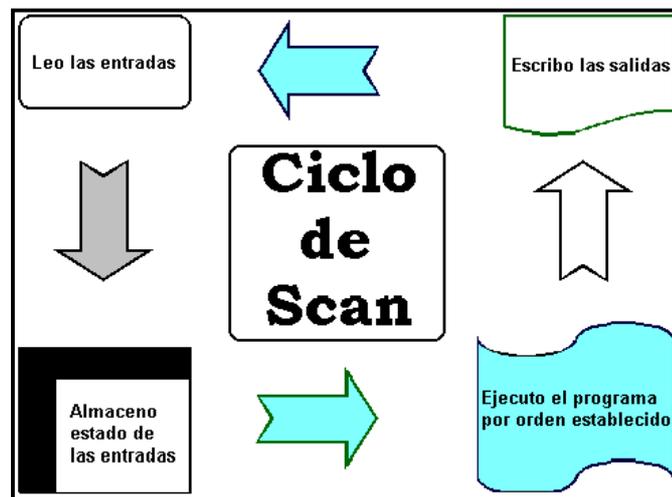
#### **2.3.4 SECUENCIA DE OPERACIÓN**

La secuencia básica de operación de un PLC se puede dividir en las siguientes fases:

- Al momento del encendido, el procesador realiza un “auto-chequeo de encendido”, y al mismo tiempo desactiva las salidas.
- El PLC entra en modo de operación, procede a la lectura del estado de las entradas, y almacena esta información en una imagen de entrada.
- De acuerdo al programa de control cargado en el PLC, este modifica la imagen de salida.

- La actualización del estado de las salidas, las realiza el procesador, transfiriendo la información de la imagen de salida hacia los módulos de salida (tipo relé, transistor, etc.).
- Finalmente retorna a la lectura del estado de las entradas.

Las instrucciones que forman el programa se ejecutan de manera cíclica desde la primera hasta la última y vuelve a repetir, lo que se denomina ciclo (“scan”) del PLC.



Fuente: [http://www.unicrom.com/tut\\_PLC8.asp](http://www.unicrom.com/tut_PLC8.asp), Funcionamiento de un PLC, Español.

**Fig. 2.10** Ciclo “scan” de un PLC.

### 2.3.5 INTERFACES ENTRADA / SALIDA

De acuerdo al tipo de las señales a tratar la interface de entrada y salida de los PLCs se clasifican en:

- Entradas/Salidas genéricas que pueden ser digitales o analógicas.
- Unidades de Entradas/Salidas especiales.

- Unidades de comunicación.

Entradas y salidas digitales: Este tipo de dispositivos trata con información de todo o nada, es decir que maneja bits. En un PLC se puede encontrar entradas de corriente alternas con valores de 0-230 V AC y entradas de corriente directa con valores 0-24 V DC, además este tipo de entradas permite la conexión de contactos de entrada libres de tensión como pulsadores e interruptores.

Las salidas digitales para un PLC que se puede encontrar son:

- Salida de Relé: El último elemento de la etapa de salida es un relé, por lo que su salida puede ser en CC como en CA, baja capacidad de conmutación.
- Salida de TRIAC: El último elemento de la etapa de salida es un triac, lo que le permite interactuar con elementos alimentados con corriente alterna.
- Salida de Transistor: El último elemento de la salida es un transistor en configuración de colector abierto, solo actúa con elementos alimentados con corriente continua, alta capacidad de conmutación.

Entradas y salidas analógicas: Este tipo de entradas permite la conexión con sensores externos que entregan una señal de salida de tipo analógico, se encargan de realizar la conversión analógica a digital de las magnitudes físicas externas.

Ya que la información analógica puede adquirir diferentes valores que el PLC (un sistema digital) no puede tratar, esta información digital convertida puede tener una longitud con valores de 8, 16 ó 32 bits.

Las salidas de este tipo proporcionan señales continuas que permiten controlar actuadores analógicos estas señales surgen a partir del convertidor digital/análogo en forma de corriente o tensión, si la conversión es en tensión los valores típicos son de 0-10 V, 0-5 V y si la conversión es en corriente de 4-20 mA.

Entradas y salidas especiales y de comunicación: Los PLCs están provistos de otras unidades de entrada y salida que realizan funciones principales, como las siguientes:

- Contadores rápidos y de alta velocidad.
- Entradas de comparación.
- Salidas de pulsos.

El PLC también cuenta con entradas y salidas de comunicación, la interfaz RS232/RS422 son las principales interfaces de comunicación utilizada por la mayoría de los PLCs.

### **2.3.6 MÉTODOS DE PROGRAMACIÓN**

La programación de los PLCs, está formada por instrucciones que están ordenadas de forma coherente de tal manera que este puede realizar las tareas de control requeridas.

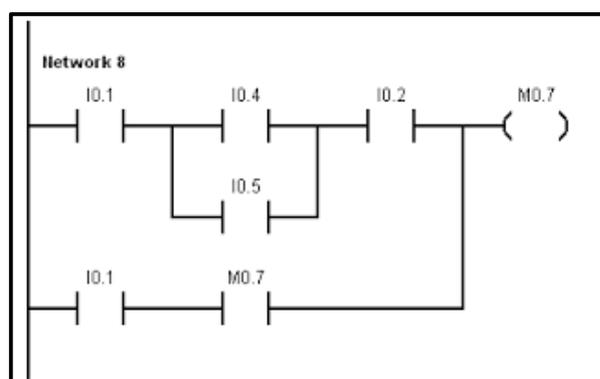
Ya que el microprocesador es la base del funcionamiento de un PLC, y este solo puede interpretar las instrucciones en lenguaje de maquina (combinaciones de "0" y "1"), pero este tipo de lenguaje es difícil de entender para el programador, se utilizan lenguajes simbólicos que el software de programación de cada PLC se encarga de transformar a código de máquina.

Los principales lenguajes de programación de los PLC son:

- Diagramas o esquemas de contactos.
- Diagramas de funciones.
- Lista de instrucciones.
- Grafcet

### 2.3.6.1 Esquema de contactos

Programación "LADDER" es un lenguaje de programación grafico parecido a los esquemas de relés utilizados en los diagramas de instalaciones cableadas.



Fuente: [http://proyectplc-implementaciondeplc.blogspot.com/2008\\_08\\_01\\_archive.html](http://proyectplc-implementaciondeplc.blogspot.com/2008_08_01_archive.html), Implementación de PLC, Español

**Fig. 2.11** Diagrama de contactos.

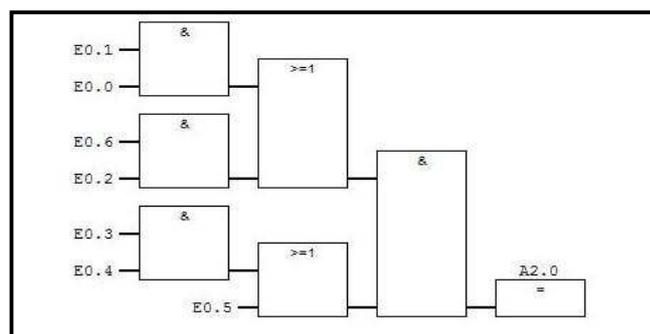
Los elementos de programación básicos son:

- Contactos: Son representaciones de interruptores que permiten activar a las funciones que se necesiten.
- Bobinas: Son representaciones de relés que se activan cuando sus contactos se cierran.
- Funciones: Realizan operaciones específicas cuando son activados, se los representa por un cuadrado.

Esta programación se basa en la combinación lógica de los contactos de entrada que activarán una bobina o función de acuerdo a la necesidad del proceso a controlar.

### 2.3.6.2 Diagrama de funciones

Programa el PLC que utiliza las funciones lógicas básicas AND, OR, NOT y otras. En la figura 2.12 se muestra una programación con funciones lógicas simples.



Fuente: [http://138.100.80.137/wikifab/index.php/Tarea\\_1:\\_Puertas\\_l%C3%B3gicas\\_y\\_memoria](http://138.100.80.137/wikifab/index.php/Tarea_1:_Puertas_l%C3%B3gicas_y_memoria), Puertas lógicas y memoria, Español.

**Fig. 2.12** Diagrama de funciones.

### 2.3.6.3 Lista de instrucciones

En este tipo de lenguaje de programación las instrucciones y operaciones de código máquina son asociadas a palabras fácilmente recordables que identifica la función de la instrucción.

La instrucción está formada por dos partes, la operación y el operando, la primera es un comando que es la acción que se va a realizar, la segunda indica la variable sobre la cual se va realizar la acción.

|     |   |     |
|-----|---|-----|
| A   | I | 0.0 |
| ANI | I | 0.1 |
| =   | Q | 4.5 |

Fuente: <http://programacionsiemens.com/step-7-awl-fup-kop>, Programación Siemens, Español.

**Fig. 2.13** Ejemplo de Instrucción AWL.

### 2.3.7 PLC Y SU ENTORNO DE APLICACIÓN

Las aplicaciones del PLC son muy extensas, son utilizados mayormente en procesos donde es necesario el control y la maniobrabilidad, por lo que su aplicación abarca un gran espectro de los procesos industriales, control de instalaciones, etc.

La facilidad para su manejo, su pequeño tamaño, su capacidad de ser programado y además de modificar dicho programa rápidamente, lo hacen indispensable en procesos con las siguientes características:

- Procesos amplios y complejos.

- Procesos con poco espacio libre.
- Procesos variables.
- Programación centralizada de los procesos.

Los PLC se aplican en áreas como:

- La automotriz.
- Control de máquinas.
- Metalurgia.
- Plantas químicas y petroquímicas.
- Alimentación.
- Tráfico.
- Domótica.

Y en muchas más aplicaciones que los procesos industriales puedan necesitar.

## 2.4 CONTROLADOR PID

También conocido como controlador de tres modos, es una combinación de los controles proporcional, integral y derivativo; el cual es realimentado y con la función de minimizar los errores en estado estacionario entre el valor de salida y el valor deseado asintóticamente en el tiempo; es decir tiene como característica general reducir al máximo las oscilaciones durante el proceso de estabilización.

Dentro del controlador la realimentación posee características importantes que brindan beneficios, como por ejemplo; ayuda al fortalecimiento del sistema

frente a los cambios del proceso, implanta armonización de trabajo entre las variables en un sistema, realiza reducción de los efectos producidos por las perturbaciones.

La ecuación que define el comportamiento del controlador PID es:

$$I_{sal} = K_P * e + K_I * \int e dt + K_D \frac{de}{dt} + I_0 \quad \text{Ecuación [2-1]}$$

En donde:

$I_{sal}$  = Salida del controlador cuando existe un error.

$e$  = Error en función del tiempo.

$K_P$  = Constante proporcional.

$K_I$  = Constante integral.

$K_D$  = Constante derivativa.

$I_0$  = Salida del valor de referencia cuando no hay error.

Aplicando la transformada de Laplace se tiene la siguiente función de transferencia:

$$F.T. = K_P * e + \frac{1}{s} * K_I + s * K_D \quad \text{Ecuación [2-2]}$$

$$\text{ó } F.T. = K_P \left( 1 + \frac{1}{T_I s} + T_D * s \right) \quad \text{Ecuación [2-3]}$$

Se lo puede considerar como un controlador proporcional que a su vez tiene un controlador integral para eliminar la desviación de error, así como un control derivativo para reducir los retrasos (Bolton, 2001, p. 293).

## **2.5 CIRCUITO NEUMÁTICO**

El circuito neumático es un conjunto de elementos interconectados a través de tuberías y conexiones, destinado a cumplir un trabajo específico. Este a su vez puede estar embebido en otros sistemas para realizar procesos más desarrollados y complejos como los del área industrial.

### **2.5.1 ELEMENTOS O COMPONENTES**

Existen varios tipos de elementos que son utilizados en el área de la neumática para la implementación de circuitos, entre los que se puede mencionar:

#### **2.5.1.1 Elementos generadores de energía**

Debido a que se requiere de aire a elevadas presiones para el funcionamiento de un sistema neumático, es necesario utilizar elementos como el compresor, que es un dispositivo que incrementa dicha presión a través de un motor eléctrico.

#### **2.5.1.2 Elementos de mando y control**

Estos elementos se encargan de conducir de manera apropiada la fuerza del aire comprimido a los dispositivos actuadores. Un ejemplo de este tipo de

elementos son las válvulas cuya función es de controlar el paso o no del caudal del fluido enviado por el compresor, por medio de accionamientos manuales, mecánicos o eléctricos.

### **2.5.1.3 Elemento de tratamiento de los fluidos**

Son dispositivos comúnmente utilizados en los circuitos neumáticos como elementos de prevención, ya que debido a la humedad e impurezas presentes en la atmósfera se pueden producir daños o pérdidas en los equipos complementarios. Existen elementos para este tipo de trabajos como los filtros, lubricadores o los secadores de aire.

### **2.5.1.4 Elementos actuadores**

Son los dispositivos finales de los circuitos, cuya función es la de transformar la energía provista por el aire comprimido en trabajo útil, generalmente en movimiento lineal con los cilindros o en rotario con motores.

## **2.6 ACTUADORES MECÁNICOS**

De manera general los actuadores son dispositivos que ejecutan una acción mecánica como resultado a un estímulo o señal de entrada recibida de un controlador, y en base a esta se genera la orden para la activación de un dispositivo final. Los actuadores están conformados por los siguientes elementos.

- Sistema de accionamiento: Se encarga de generar el movimiento.

- Sistema de transmisión: Realiza la transmisión del movimiento del actuador hacia otro dispositivo.
- Sistema reductor: Adapta tanto la velocidad como el torque del actuador a los requerimientos de datos.
- Sistema de control: Es el responsable de enviar las órdenes al actuador para que realice una acción específica.

Los actuadores mecánicos son elementos que tienen como característica general convertir un movimiento rotatorio en uno lineal. En base a su funcionamiento pueden clasificarse en hidráulicos o neumáticos.

### 2.6.1 ACTUADORES HIDRÁULICOS

Este tipo de actuadores basan su accionamiento por medio de un fluido a presión, siendo el más utilizado el aceite mineral. Básicamente existen tres tipos; cilindros hidráulicos, motores hidráulicos y válvulas hidráulicas.

La característica más importante de este tipo de actuadores es su relación potencia/peso.



Fuente: <http://www.hydraulicmotor.es/1-1-9-spool-valve-motor.html>, Motor hidráulica con válvula de carrete, Español

**Fig. 2.14** Cilindros, motores y válvulas hidráulicas.

## 2.6.2 ACTUADORES NEUMÁTICOS

Tienen como función convertir la energía almacenada por aire comprimido en trabajo mecánico, generándose movimiento rectilíneo o circular. Además existen dos tipos: motores neumáticos y cilindros neumáticos.

### 2.6.2.1 Motores neumáticos

Este tipo de motores tienen la característica de ser compactos y ligeros, tienen un peso equivalente a la cuarta parte de un motor eléctrico, así como también utiliza una sexta parte del espacio.

Los motores neumáticos pueden arrancar y parar de manera ilimitada, así como tienen la capacidad de responder instantáneamente al arranque, paro y al cambio de sentido de giro, he inclusive cuando el motor esté trabajando a plena carga. Además pueden desarrollar mayor potencia en relación a otros tipos de motor.



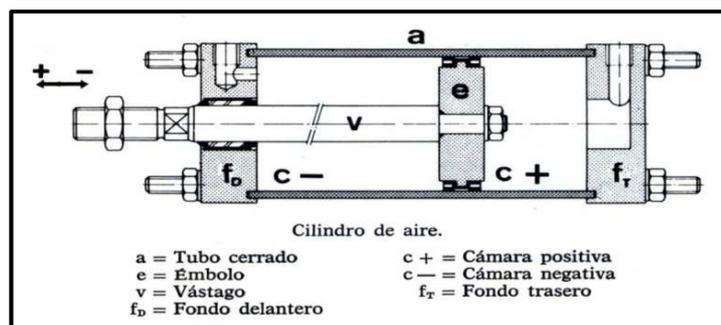
Fuente: <http://pbombas.com.mx/?cat=83>, Motor hidráulico, Español

**Fig. 2.15** Motor neumático.

### 2.6.2.2 Cilindros neumáticos

Son dispositivos que trabajan mediante aire comprimido, obteniendo como resultado un movimiento rectilíneo de avance y retroceso; es decir que convierte la energía neumática en un trabajo mecánico.

Un cilindro generalmente posee un tubo circular sellado en sus extremos por dos tapas, donde se desplaza un émbolo que separa dos cámaras, el cual se encuentra unido a un vástago que permite utilizar la fuerza desarrollada debido a la presión del fluido.



Fuente: [http://ingenieriaelectricaexplicada.blogspot.com/2010\\_07\\_01\\_archive.html](http://ingenieriaelectricaexplicada.blogspot.com/2010_07_01_archive.html), Ingeniería Eléctrica explicada, Español.

**Fig. 2.16** Partes de un cilindro neumático.

#### 2.6.2.2.1 Tipos de cilindros neumáticos

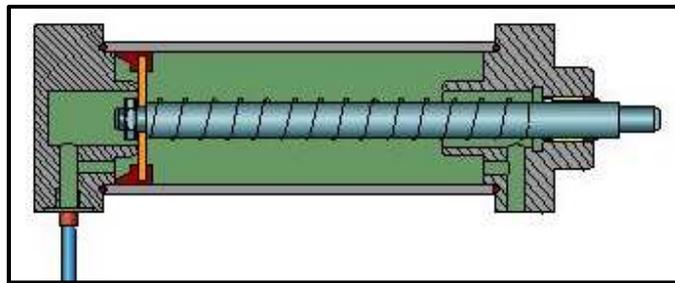
En función al retroceso del vástago, los cilindros neumáticos se dividen en:

- Cilindros de simple efecto

Estos elementos realizan el trabajo en un solo sentido, es decir que el recorrido del émbolo debido al aire comprimido se genera en una dirección, ya

que su retorno generalmente se realiza por un muelle recuperador incorporado dentro del cilindro.

En base a la disposición del muelle es utilizado para trabajos tanto a compresión como a tracción; su diámetro es de sección reducida por situaciones prácticas y su principal ventaja es que tiene un consumo reducido de aire.



Fuente: [http://recursos.educarex.es/escuela2.0/Ciencias/Tecnología/proyect\\_eso/neumatica/menu\\_3.html](http://recursos.educarex.es/escuela2.0/Ciencias/Tecnología/proyect_eso/neumatica/menu_3.html), Neumática, Español.

**Fig. 2.17** Cilindro de simple efecto.

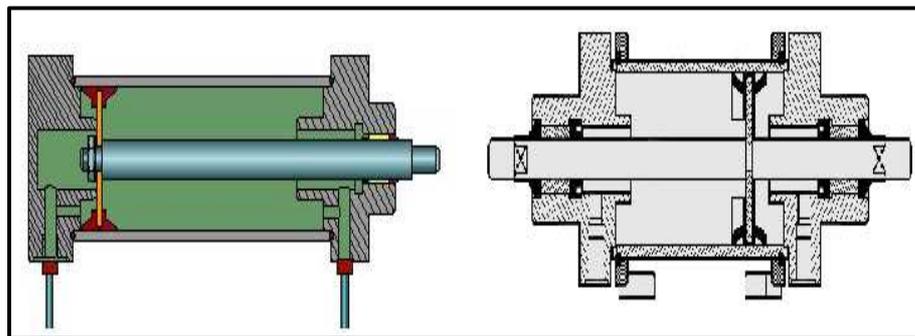
- Cilindros de doble efecto

En estos elementos su movimiento tanto a la entrada como a la salida es a causa de la presión por el aire comprimido en las dos cámaras del cilindro. La implementación se realiza a base de cilindro de émbolo y posee dos tomas de aire para cada cámara.

Al trabajar con una presión establecida el regreso del vástago será con menor fuerza en comparación con el movimiento de avance, esto debido a que el área del émbolo es menor por la sección transversal del vástago.

Pueden ser con amortiguación o sin amortiguación, y la selección de cualquiera de estos depende de factores de funcionamiento como la velocidad de desplazamiento o la carga y si ésta es detenida por acoples externos entonces puede utilizarse cilindros sin amortiguación. Poseen varias ventajas con relación a los cilindros de simple efecto, entre las que se tienen:

- Realización de trabajo eficiente en dos sentidos de su movimiento.
- No existe reducción de fuerza para la compresión del muelle.
- Aprovecha toda la longitud del vástago como carrera útil.



Fuente: [http://recursos.educarex.es/escuela2.0/Ciencias/Tecnologia/proyect\\_eso/neumatica/menu\\_4.html](http://recursos.educarex.es/escuela2.0/Ciencias/Tecnologia/proyect_eso/neumatica/menu_4.html), Cilindro de doble efecto, Español.

**Fig. 2.18** Cilindro de doble efecto simple y doble vástago.

#### 2.6.2.2.2 Normalización ISO

Existen varias normas para la implementación y estandarización de los cilindros, como por ejemplo la norma ISO 6009 se encuentra estandarizada la nomenclatura necesaria que se utiliza para el dimensionamiento en hojas técnicas.

En la construcción de cilindros se utiliza la norma CNOMO 06.0.7.02 ya que abarca las cotas exteriores de un que debe poseer un cilindro. Una de las ventajas que presenta esta normativa es la factibilidad de intercambio entre cilindros de diferentes fabricantes basándose en:

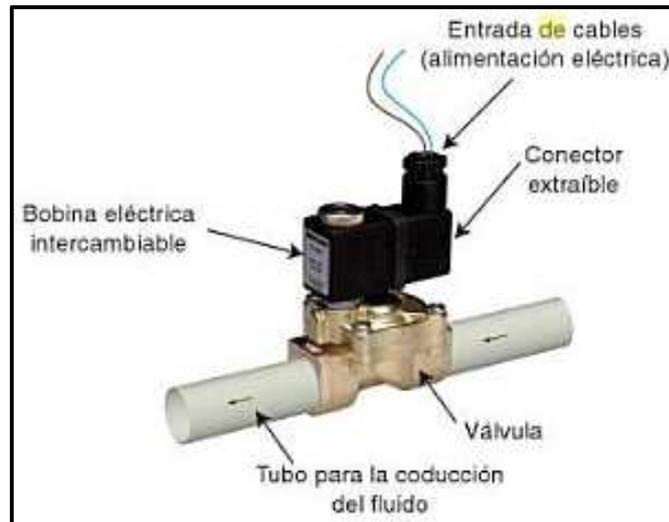
- El tipo y características del cilindro
- La forma de fijación y aplicación
- Situación del conjunto montado

Otras normas existentes son la ISO 6431 y 6432 que describe al conjunto del cilindro montado con las respectivas fijaciones. La compatibilidad para el intercambio entre distintos fabricantes se podrá realizar manteniendo las prestaciones, es decir se hará dicho intercambio de todo el conjunto y no solamente del cilindro en sí.

Y la norma alemana VDMA 24562, una de las más modernas que describe dentro de su contexto las cotas exteriores tanto para el cilindro así como para las fijaciones, en su totalidad.

## **2.7 ELECTROVÁLVULA**

Es un dispositivo cuyo funcionamiento en base a una señal eléctrica de mando; permite, mantiene, o desvía el paso de un fluido neumático o hidráulico. Son elementos formados por una parte mecánica para la apertura y cierre de la válvula y por un solenoide (electroimán).



Fuente: Martín J., Instalaciones domóticas, p. 55

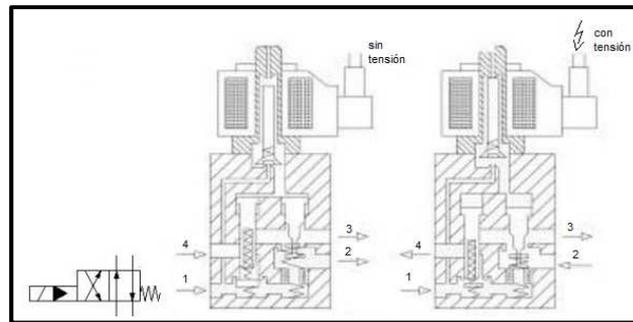
**Fig. 2.19** Diagrama de partes de una electroválvula.

### 2.7.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

Cuando la bobina está bajo tensión, el núcleo es atraído venciendo el esfuerzo del muelle.

En este momento el conducto de alimentación 1 puede alimentar la utilización 2 porque los pequeños émbolos distribuidores, pilotados a través del conducto derivación de 1, cierran la utilización 4 y abren las 2, respectivamente.

Al cesar la tensión, el muelle devuelve al núcleo a su posición de reposo, se purgan los émbolos por la salida superior y el orificio 2 es puesto a escape mientras 4 es alimentado (Cembranos, 2007, p.133).



Fuente: Cembranos F., Automatismos eléctricos neumáticos e hidráulicos, p.133.

**Fig. 2.20** Diagrama de funcionamiento de una electroválvula 4/2.

## 2.7.2 TIPOS DE ACCIONAMIENTO

Las electroválvulas pueden ser de acción directa o indirecta:

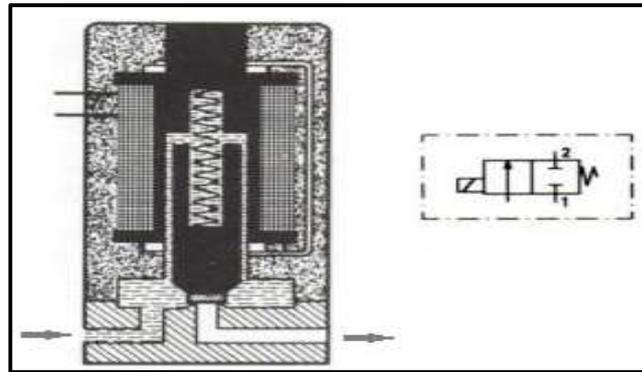
### 2.7.2.1 De acción directa

Poseen un mecanismo el cual consiste en una junta de asiento que se encuentra empalmada al núcleo magnético de manera directa. Debido al diseño de construcción se las denomina válvulas de asiento.

#### 2.7.2.1.1 De 2 vías de acción directa

Está constituida por una entrada y una salida siendo denominada válvula de paso. En estado de reposo el muelle realiza una presión a la junta sobre el asiento por medio de la presión del flujo, logrando el cierre del paso.

Al momento de suministrarle un voltaje de alimentación la junta es atraída dentro de la bobina generando la apertura de la válvula.

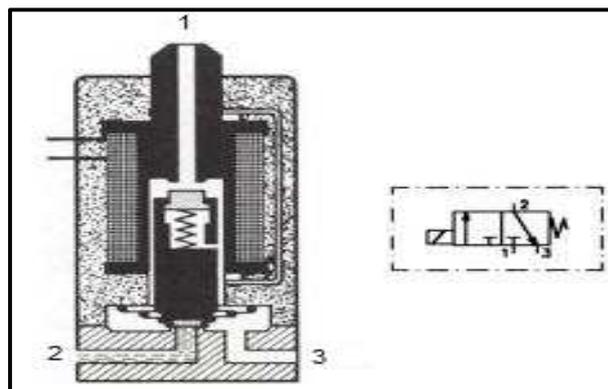


Fuente: LLadonosa V., Circuitos básicos de electro neumática, p. 54.

**Fig. 2.21** Electroválvula 2/2 normalmente cerrada.

2.7.2.1.2 De 3 vías de acción directa

Este tipo de electroválvulas poseen 3 vías y 2 asientos, y la presión se suministra bajo el asiento. En estado de reposo un muelle cónico impulsa la junta inferior generando la obstrucción del paso. Con alimentación de voltaje el núcleo obstruye el asiento de la vía 1 a través de una junta que está presionada por el muelle, y así el flujo circula de 2 a 3.



Fuente: LLadonosa V., Circuitos básicos de electro neumática, p. 54.

**Fig. 2.22** Electroválvula 3/2 normalmente cerrada.

### 2.7.2.2 De acción indirecta o pilotada

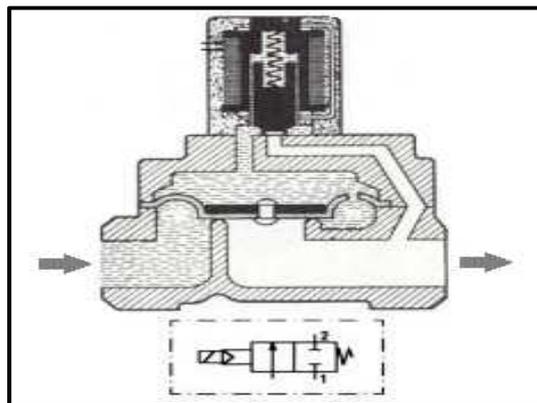
Se caracterizan porque la apertura y el cierre están dados por la presión de flujo, además se puede decir que una válvula de accionamiento indirecto consta de 2 válvulas:

- una válvula de corredera y
- una válvula piloto

#### 2.7.2.2.1 De 2 vías pilotadas

Se aplica una presión sobre los dos lados de la membrana a través de un orificio estrangulador, esto cuando la electroválvula está obstruida por dicha presión.

Si hay diferencia de presión entre la entrada y salida, se genera una fuerza de cierre encima de la membrana y la fuerza disminuye sobre ésta cuando se le suministra voltaje de alimentación a la bobina de la válvula piloto.

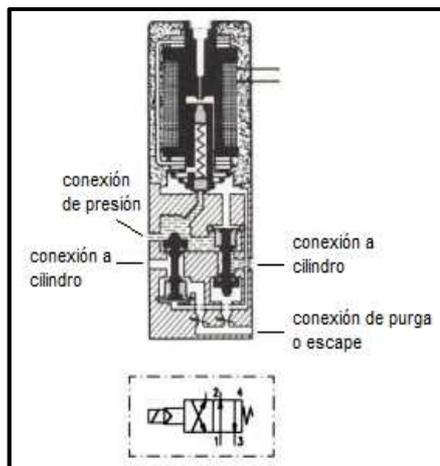


Fuente: LLadonosa V., Circuitos básicos de electro neumática, p. 56.

**Fig. 2.23** Electroválvula 2/2 normalmente cerrada pilotada.

#### 2.7.2.2.2 De 4 vías pilotadas

Comúnmente utilizadas para el accionamiento de cilindros de doble efecto. Se habilita la conexión entre el canal de mando y la conexión de presión cuando se le suministra un voltaje de alimentación a la válvula piloto, de esta manera se genera presión sobre las dos membranas de las válvulas principales.



Fuente: LLadonosa V., Circuitos básicos de electro neumática, p. 56.

**Fig. 2.24** Electroválvula 4/2 pilotada.

### 2.7.3 CONFIGURACIÓN DE LAS ELECTROVÁLVULAS

Varios fabricantes proveen electroválvulas con configuración y estructuración basada en las normas ISO, dentro de las cuales se consideran la combinación entre el número de solenoides, el número de posiciones, el flujo nominal, y el tipo de accionamiento ya sea retorno por muelle o enclavamiento mecánico.

## 2.8 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROCESO

El sistema automático didáctico consiste en el control de calidad y tapado de botellas plásticas, para lo cual se las llena previamente y se las coloca en el área de ingreso; consta de un sistema neumático que mediante el accionamiento de un cilindro ayuda a colocar cada envase en la zona de pesaje para determinar el valor apropiado de su masa, previo a su ubicación sobre la banda transportadora. Esta es la primera etapa del control de calidad.

Posteriormente la botella se coloca en la banda, sobre la cual se encuentra un mecanismo dispensador de tapas, que permite poner una tapa sobre el envase cuando éste pase por debajo de dicho mecanismo.

A continuación se verifica la presencia o no de la tapa basándose en el color de la misma mediante un sensor electrónico; siendo esta la segunda etapa del control de calidad. Con las dos etapas (pesaje y verificación) cumplidas se determina de manera completa la calidad de la botella.

Es decir si cumple con las condiciones de las etapas pasa hacia la última fase del sistema, de lo contrario la botella se retira de la banda transportadora. Al cumplir con la etapa de control de calidad el envase se dirige hacia la zona de sujeción y roscado, en donde mediante un sistema neumático-eléctrico se enrosca la tapa sobre la botella.

Tanto los elementos electrónicos, así como la velocidad de la banda dependiendo del peso aplicado sobre la cinta, son controlados mediante un

P.L.C.; obteniendo de esta manera un proceso didáctico implementado en el laboratorio de AIM.

El elemento de prueba que se utiliza como material para envasar en las botellas plásticas es el arroz, ya que se requiere establecer un peso que permita ejecutar la primera etapa del control de calidad. Debido a que el dosificado es de forma manual se impone un rango para la masa de ingreso, el cual es de  $\pm 1$  gramo del valor que se establece.

## CAPÍTULO 3

### DISEÑO MECÁNICO

#### 3.1 DISEÑO DE LA BANCADA

Uno de los aspectos importantes a considerar para el diseño es el tipo de envase utilizado como elemento a prueba dentro del proceso, ya que se debe tomar en cuenta el dimensionamiento, la masa y el tipo de material que lo conforma; para de esta manera dimensionar la estructura de forma que exista el espacio necesario para el funcionamiento de los elementos del sistema. Tanto el cuerpo como la tapa de la botella están formados por los polímeros PET (tereftalato de polietileno) y PE (polietileno) respectivamente.



Fuente: Los autores

**Fig. 3.1** Envase de plástico a utilizar.

**Tabla 3.1** Características del envase plástico.

| CARACTERÍSTICAS | ENVASE |       | TAPA |
|-----------------|--------|-------|------|
|                 | CUERPO | ROSCA |      |
| altura (mm)     | 84.5   | 10.5  | 11.5 |
| diámetro (mm)   | 53     | 37    | 41   |
| masa (g)        | 20.7   |       | 3.2  |

Fuente: Los autores

El PET es un tipo de polietileno de gran calidad, semicristalino y de alta consistencia, entre las características más importantes que posee son: resistencia al desgaste, dureza, muy buen aislante eléctrico, buena mecanización, entre otras. Es utilizado para la fabricación de envases y películas para envolturas alimenticias, como fibra para ropa, cuerdas y alfombras. El PE es un material termoplástico translúcido que mediante el uso de colorantes se puede elaborar una serie diversa de productos de diferentes colores. Existen dos tipos de polietileno; el de baja densidad LDPE y el de alta densidad HDPE. Para el caso de la tapa es de alta densidad.

**Tabla 3.2** Algunas propiedades de los termoplásticos involucrados.

| MATERIAL                 | DENSIDAD<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | RESISTENCIA<br>A LA<br>TENSIÓN<br>(x1000 psi) | RESISTENCIA<br>AL IMPACTO<br>(pie.lb/plg) | T. MÁX. DE<br>USO SIN<br>CARGA<br>(°C) |
|--------------------------|----------------------------------|---|---|--|
| <b>Polietileno:</b>      |                                  |   |   |  |
| <b>Baja<br/>densidad</b> | 0.92 - 0.93                      | 0.9 - 2.5                                     |   | 82 - 100                               |
| <b>Alta<br/>densidad</b> | 0.95 - 0.96                      | 2.9 - 5.4                                     | 0.4 - 14                                  | 80 - 120                               |
| <b>Poliéster:</b>        |                                  |   |   |  |
| <b>PET</b>               | 1.37                             | 10.4  | 0.8                                       | 80                                     |

Fuente: Fundamentos de la ciencia e ingeniería de Materiales, Smith, 4ta ed., 2006, p.499

Otro aspecto importante que se toma en cuenta es el peso total que está aplicado sobre la bancada, ya que sobre esta se encuentran diferentes elementos neumáticos, eléctricos y de control; y en base a un análisis estático se determina su resistencia durante el funcionamiento del sistema. El dimensionamiento general que tiene la estructura es:

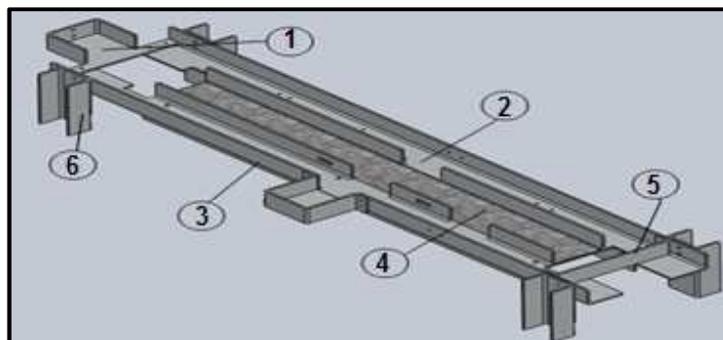
*Largo = 1065 mm*

*Ancho = 540 mm*

*Altura = 105 mm*

### 3.1.1 DISEÑO CAD

La estructura de bancada está formada por un conjunto de seis elementos que sirven como soporte tanto para la banda transportadora, para los elementos neumáticos, eléctricos y electrónicos, así como para los envases plásticos. En la figura 3.2 se observa el diseño en SolidWorks del ensamble de los elementos que conforman dicha estructura.



Fuente: Los autores

**Fig. 3.2** Diseño CAD de la estructura de soporte.

Cada uno de los elementos está descrito a continuación:

1.- Mesa de ingreso de los envases: Es la parte inicial de la bancada en donde se colocan los envases plásticos antes de ser ubicados sobre la balanza.

2.- Perfil lateral 1: Sirve como una pequeña mesa de apoyo para elementos neumáticos, elementos eléctrico-electrónicos y para el sistema dispensador.

3.- Perfil lateral 2: Cumple funciones similares al anterior, además de que consta de una pequeña mesa en el caso de que un envase sea retirado de la banda.

4.- Placa de deslizamiento: Sirve como soporte en la parte inferior de la cinta transportadora durante su desplazamiento, además se utiliza como apoyo para los rodillos de la banda.

5.- Pared: Es un acople al final del recorrido de la cinta transportadora que sirve para detener a los envases que han cumplido con todo el proceso.

6.- Apoyos de la estructura: Son las bases en las que se sujeta toda la estructura del sistema sobre el suelo.

### **3.1.2 SELECCIÓN DEL MATERIAL**

Para la selección se considera 3 tipos de materiales que tienen gran aplicabilidad en diversas áreas como la industrial, alimenticia, entre otras. Para este caso principalmente se toma en cuenta que es un sistema de uso didáctico, y que transporta envases con un producto alimenticio. En la siguiente

tabla se muestra algunas características de los materiales, que se consideran al momento de la selección.

**Tabla 3.3** Opciones de material a utilizar en la estructura de bancada.

| Material                         | Características   | Costo (\$) |
|----------------------------------|---|------------|
| <b>Acero Inoxidable AISI 304</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Es un acero inoxidable austenítico de gran aplicabilidad.</li> <li>• Es una aleación de hierro con 10,5% de cromo.</li> <li>• Al ser bajo en carbono tiene mayor resistencia a la corrosión en aplicaciones de soldadura.</li> </ul>                 | 240.54     |
| <b>Aluminio 6061</b>             | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Es una aleación de alta / media resistencia y de gran aplicabilidad.</li> <li>• En su estructura posee elementos como el aluminio, magnesio y silicio.</li> <li>• Resistente a la corrosión, maleable y una resistencia similar al acero.</li> </ul> | 127.01     |
| <b>Acero Galvanizado</b>         | <ul style="list-style-type: none"> <li>• El recubrimiento galvanizado le otorga al acero una excelente protección.</li> <li>• Posee la resistencia mecánica del acero y la resistencia a la corrosión generada por el Zinc.</li> </ul>  | 153.43     |

Fuente: Los Autores

Cada uno de los tres materiales tiene características que permiten elaborar la bancada del sistema de gran resistencia y estabilidad. En el caso del acero inoxidable AISI 304 es apropiado ya que el proceso involucra el transporte de envases con granos de arroz, y este es muy aplicado en el ámbito alimenticio. El acero galvanizado también es un material a ser considerado, ya que su aleación permite tener las propiedades del acero en sí y del Zinc en uno solo.

Sin embargo el material seleccionado es el Aluminio 6061, ya que es un material con características apropiadas para la implementación de la bancada,

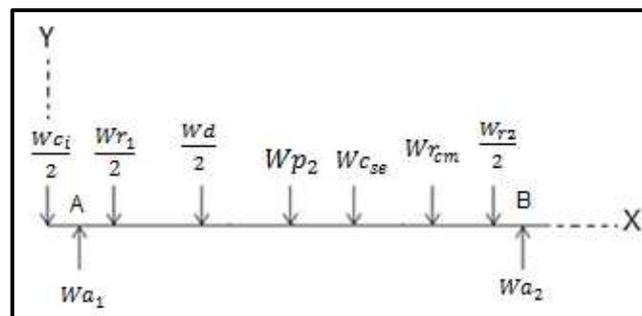
además que es utilizado en estructuras de sistemas didácticos, como lo realiza la empresa FESTO. También el laboratorio consta de otros equipos didácticos cuyo material estructural es el aluminio; así también para dicha selección se considera el costo que tiene cada uno, donde al aluminio es el más económico. La plancha que se utiliza en el diseño del sistema tiene un espesor de 3 mm.

### 3.1.3 ANÁLISIS DE CARGAS

Para el análisis se considera el peso que actúa sobre la estructura; este viene dado por todos los elementos que se utiliza para el proceso y que a su vez son de peso considerable. Las partes que se toman para el análisis son los perfiles laterales y los apoyos de la estructura; ya que sobre estas se concentra mayor peso.

- Perfil Lateral 1

Se debe determinar la fuerza que se ejerce en los soportes en función del peso que se aplica, para esto se analiza el momento sobre el punto A.



Fuente: Los autores

**Fig. 3.3** Diagrama de distribución de fuerzas en el lateral 1.

**Tabla 3.4** Pesos y distancias de los elementos involucrados.

| ELEMENTOS INVOLUCRADOS                         |          |            |          |                            |                            |
|--|----------|------------|----------|----------------------------|----------------------------|
| Elemento                                       | Masa (g) | Simbología | Peso (N) | Distancia respecto a A (m) | Distancia respecto a B (m) |
| <b>Cilindro de ingreso</b>                     | 133.72   | $Wc_i$     | 1.312    | 0.0325                     | 0.7675                     |
| <b>Rodillo 1</b>                               | 121.60   | $Wr_1$     | 1.193    | 0.0530                     | 0.6820                     |
| <b>Dispensador</b>                             | 193.52   | $Wd$       | 1.898    | 0.1500                     | 0.5850                     |
| <b>Botella con arroz y tapa sobre la banda</b> | 103.20   | $Wb_1$     | 1.012    | 0.3675                     | 0.3675                     |
| <b>Placa</b>                                   | 819.45   | $Wpl$      | 8.039    | 0.3675                     | 0.3675                     |
| <b>Cinta de banda</b>                          | 189      | $Wct$      | 1.854    | 0.3675                     | 0.3675                     |
| <b>Lateral 1</b>                               | 592.65   | $Wl_1$     | 5.814    | 0.3675                     | 0.3675                     |
| <b>Cilindro de separación</b>                  | 125.07   | $Wc_{se}$  | 1.227    | 0.3950                     | 0.3400                     |
| <b>Cilindro de roscado</b>                     | 603.20   | $Wc_r$     | 5.917    | 0.5450                     | 0.1900                     |
| <b>Motor de roscado</b>                        | 78       | $Wm_r$     | 0.765    | 0.5450                     | 0.1900                     |
| <b>Rodillo 2</b>                               | 118.80   | $Wr_2$     | 1.165    | 0.6930                     | 0.0420                     |
| <b>Soporte A</b>                               |          |            |          |                            | 0.7350                     |
| <b>Soporte B</b>                               |          |            |          | 0.7350                     |                            |

Fuente: Los autores

$$\Sigma M_A = 0 \quad S.AH. +$$

$$\frac{Wc_i}{2} * 0.0325 - \frac{Wr_1}{2} * 0.053 - \frac{Wd}{2} * 0.15 - Wp_2 * 0.3675 - Wc_{se} * 0.395 - Wc_{cm} * 0.545 - \frac{Wr_2}{2} * 0.693 + Wa_2 * 0.735 = 0$$

Donde:

$$Wp_2 = \frac{4*Wb_1}{2} + \frac{Wpl}{2} + \frac{Wct}{2} + Wl_1 \text{ (Peso considerado en la mitad del lateral 1)}$$

$$Wc_{cm} = Wc_r + Wm_r \text{ (Peso de roscado cilindro-motor)}$$

$W_{a_1}$  = Peso sobre el soporte A

$W_{a_2}$  = Peso sobre el soporte B

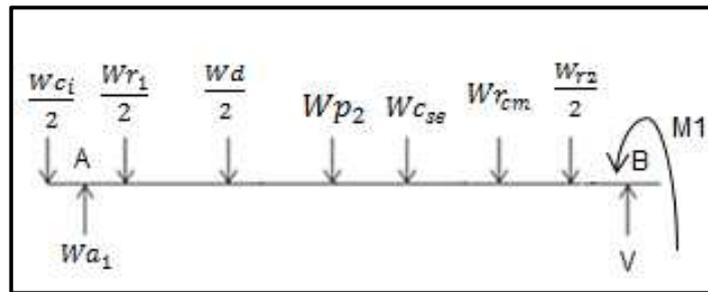
$$W_{a_2} = \frac{(-0.0213 + 0.0316 + 0.142 + 4.698 + 0.485 + 3.642 + 0.404) Nm}{0.735 m}$$

$$W_{a_2} = 12.764 N$$

$$\Sigma F_Y = 0$$

$$\frac{-W_{c_i}}{2} - \frac{W_{r_1}}{2} - \frac{W_d}{2} - W_{p_2} - W_{c_{se}} - W_{r_{cm}} - \frac{W_{r_2}}{2} + W_{a_1} + W_{a_2} = 0$$

$$W_{a_1} = 10.714 N$$



Fuente: Los autores

**Fig. 3.4** Análisis del momento por cortante sobre el lateral 1.

$$\Sigma M = 0 \quad S.AH. +$$

$$\begin{aligned} & \frac{W_{c_i}}{2} * 0.7675 + \frac{W_{r_1}}{2} * 0.682 + \frac{W_d}{2} * 0.585 + W_{p_2} * 0.3675 + W_{c_{se}} * 0.34 + W_{r_{cm}} \\ & * 0.19 + \frac{W_{r_2}}{2} * 0.042 - W_{a_1} * 0.735 + M1 = 0 \end{aligned}$$

$$M1 = -1.97 \times 10^{-4} Nm$$

**Tabla 3.5** Algunas propiedades mecánicas del aluminio 6061.

| PROPIEDADES  | VALOR                | UNIDAD   |
|--|----------------------|----------|
| <b>Módulo elástico</b>                             | $6.9 \times 10^{10}$ | $N/m^2$  |
| <b>Coefficiente de Poisson</b>                     | 0.33                 |          |
| <b>Densidad</b>                                    | 2700                 | $Kg/m^3$ |
| <b>Resistencia a la fluencia o Límite elástico</b> | 55148500             | $N/m^2$  |

Fuente: Datos de materiales en SolidWorks Premium 2012

**Tabla 3.6** Factor de seguridad bajo condiciones de trabajo.

| Factor de seguridad | Condición   |
|---------------------|---|
| <b>1.25 a 2.0</b>   | Diseño de estructuras bajo cargas estáticas, y existe algún grado de confianza en todos los datos del diseño                            |
| <b>2.0 a 2.5</b>    | Diseño de elementos de máquinas bajo cargas dinámicas, con una confianza promedio en los datos del diseño                               |
| <b>2.5 a 4.0</b>    | Diseño de estructuras estáticas o elementos de máquinas bajo cargas dinámicas con incertidumbre acerca de las cargas                    |
| <b>4.0 o mayor</b>  | Diseño de estructuras estáticas o elementos de máquinas bajo cargas dinámicas con incertidumbre en cuanto a alguna combinación de carga |

Fuente: Diseño de elementos de Máquinas, Mott, 4ta ed., 2006, p. 185

Se determina el esfuerzo admisible del aluminio tomando un valor de 1.5 para el factor de seguridad ya que el diseño del sistema se analiza bajo cargas estáticas:

$$\sigma_{adm} = \frac{S_y}{FS} \quad \text{Ecuación [3-1]}$$

Donde:

$\sigma_{adm}$  = Esfuerzo admisible

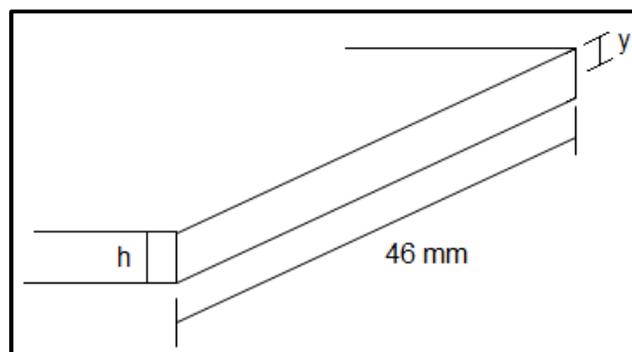
$S_y$  = Resistencia a la fluencia

$FS$  = Factor de seguridad

$$\sigma_{adm} = \frac{55.149 \text{ MPa}}{1.5}$$

$$\sigma_{adm} = 36.766 \text{ MPa}$$

Se considera los parámetros de la base para determinar el esfuerzo máximo en el lateral 1, por tanto:



Fuente: Los autores

**Fig. 3.5** Diagrama de los parámetros a considerar.

$$\sigma_{max} = \frac{|M|*y}{I_r}$$

Ecuación [3-2]

Donde:

$\sigma_{max}$  = Esfuerzo máximo

$M =$  Momento

$y =$  Altura del plano medio ( $y=h/2$ )

$I_r =$  Inercia de la sección transversal

$$\sigma_{max} = \frac{1.97 \times 10^{-4} Nm * \frac{3 \times 10^{-3} m}{2}}{\frac{46 \times 10^{-3} m * (3 \times 10^{-3} m)^3}{12}}$$

$$\sigma_{max} = 2855.07 \frac{N}{m^2}$$

$$\sigma_{max} = 2.855 \times 10^{-3} MPa$$

Se sabe que el esfuerzo admisible del material debe ser mayor o igual que el esfuerzo máximo calculado.

$$\sigma_{adm} \geq \sigma_{max}$$

Por lo tanto el Aluminio 6061 es apropiado para la construcción del lateral 1.

Además se determina la deflexión que se genera considerándola como una viga empotrada en sus extremos, mediante la siguiente ecuación:

$$y_{max} = \frac{-W_{total} * L_t^3}{384 * E * I_r} \quad \text{Ecuación [3-3]}$$

Donde:

$y_{max} =$  Deflexión

$W_{total} = \frac{Wc_i}{2} + \frac{Wr_1}{2} + \frac{Wd}{2} + Wp_2 + Wc_{se} + Wrcm + \frac{Wr_2}{2}$ , Carga uniformemente distribuida (todo el peso aplicado)

$L_t$  = Longitud total entre soportes

$E$  = Módulo elástico

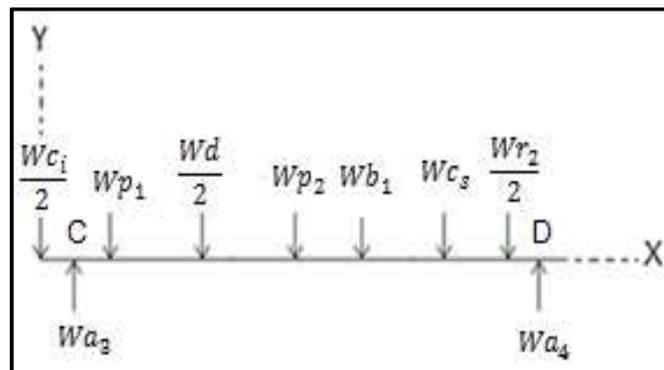
$$y_{max} = \frac{-23.478 \text{ N} * (0.735 \text{ m})^3}{384 * 6.9 \times 10^{10} \frac{\text{N}}{\text{m}^2} * \frac{46 \times 10^{-3} \text{ m} * (3 \times 10^{-3} \text{ m})^3}{12}}$$

$$y_{max} = -0.0034 \text{ m}$$

$$y_{max} = -3.4 \text{ mm}$$

- Perfil lateral 2

De igual manera se determina la fuerza que existe en los soportes en función del peso que se aplica, se analiza el momento sobre el punto C.



Fuente: Los autores

**Fig. 3.6** Diagrama de distribución de fuerzas en el lateral 2.

**Tabla 3.7** Pesos y distancias de otros elementos sobre el lateral 2.

| Elemento                  | Peso     |            |       | Distancia respecto a C (m) | Distancia respecto a D (m) |
|---------------------------|----------|------------|-------|----------------------------|----------------------------|
|                           | Masa (g) | Simbología | (N)   |                            |                            |
| <b>Motor de banda</b>     | 194.94   | $Wm_b$     | 1.912 | 0.0530                     | 0.6820                     |
| <b>Lateral 2</b>          | 650.42   | $Wl_2$     | 6.381 | 0.3675                     | 0.3675                     |
| <b>Cilindro sujetador</b> | 91.500   | $Wc_s$     | 0.898 | 0.5450                     | 0.1900                     |
| <b>Soporte C</b>          |          |            |       |                            | 0.7350                     |
| <b>Soporte D</b>          |          |            |       | 0.7350                     |                            |

Fuente: Los autores

$$\Sigma M_C = 0 \quad S.AH. +$$

$$\frac{Wc_i}{2} * 0.0325 - Wp_1 * 0.053 - \frac{Wd}{2} * 0.15 - Wp_2 * 0.3675 - Wb_1 * 0.395 - Wc_s * 0.545 - \frac{Wr_2}{2} * 0.693 + Wa_4 * 0.735 = 0$$

Donde:

$$Wp_1 = Wm_b + \frac{Wr_1}{2}$$

$$Wp_2 = \frac{4*Wb_1}{2} + \frac{Wpl}{2} + \frac{Wct}{2} + Wl_2 \text{ (Peso considerado en la mitad del lateral 2)}$$

$Wa_3$ = Peso sobre el soporte C

$Wa_4$ = Peso sobre el soporte D

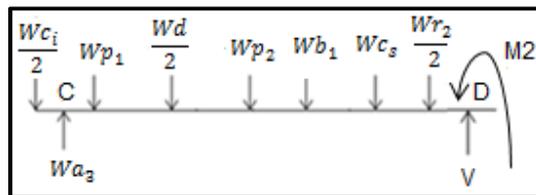
$$Wa_4 = \frac{(-0.0213 + 0.133 + 0.142 + 4.91 + 0.399 + 0.489 + 0.407) Nm}{0.735 m}$$

$$Wa_4 = 8.780 N$$

$$\Sigma F_Y = 0$$

$$\frac{-Wc_i}{2} - Wp_1 - \frac{Wd}{2} - Wp_2 - Wb_1 - Wc_s - \frac{Wr_2}{2} + Wa_3 + Wa_4 = 0$$

$$Wa_3 = 11.178 N$$



Fuente: Los Autores

**Fig. 3.7** Análisis del momento por cortante sobre el lateral 2.

$$\Sigma M = 0 \quad S. AH. +$$

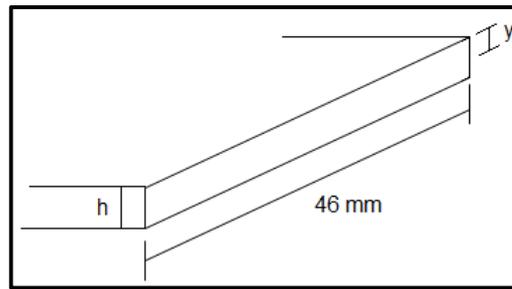
$$\begin{aligned} &\frac{Wc_i}{2} * 0.7675 + Wp_1 * 0.682 + \frac{Wd}{2} * 0.585 + Wp_2 * 0.3675 + Wb_1 * 0.34 + Wc_s \\ &* 0.19 + \frac{Wr_2}{2} * 0.042 - Wa_3 * 0.735 + M2 = 0 \end{aligned}$$

$$M2 = 5.47 \times 10^{-4} Nm$$

Para este caso también se considera un factor de seguridad de 1.5 ya que el análisis es similar al perfil lateral 1, entonces:

$$\sigma_{adm} = 36.766 MPa$$

Se considera los parámetros de la base del lateral para determinar el esfuerzo máximo mediante la ecuación [3-2], por tanto:



Fuente: Los autores

**Fig. 3.8** Diagrama de los parámetros a considerar del lateral 2.

$$\sigma_{max} = \frac{5.47 \times 10^{-4} \text{ Nm} * \frac{3 \times 10^{-3} \text{ m}}{2}}{\frac{46 \times 10^{-3} \text{ m} * (3 \times 10^{-3} \text{ m})^3}{12}}$$

$$\sigma_{max} = 7927.54 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

$$\sigma_{max} = 7.927 \times 10^{-3} \text{ MPa}$$

Este caso también se cumple que el esfuerzo admisible es mayor o igual que el esfuerzo máximo obtenido.

$$\sigma_{adm} \geq \sigma_{max}$$

Por lo tanto el Aluminio 6061 también es un material apropiado para la construcción del lateral 2.

También determina la deflexión que se genera, y de igual forma se la considera como una viga empotrada en sus extremos, entonces utilizando la ecuación [3-3] se tiene:

$$y_{max} = \frac{-19.957 N * (0.735 m)^3}{384 * 6.9 \times 10^{10} \frac{N}{m^2} * \frac{46 \times 10^{-3} m * (3 \times 10^{-3} m)^3}{12}}$$

$$y_{max} = -0.00289 m$$

$$y_{max} = -2.889 mm$$

Para los dos casos las deflexiones obtenidas son valores máximos, es decir el análisis únicamente se considera con apoyos en sus extremos.

Sin embargo tienen en la placa de deslizamiento de la cinta transportadora un apoyo adicional, por lo que dicha variable en su valor es menor a la obtenida.

- Soportes de apoyo

Cada uno de los cuatro soportes está sujeto al resto de la estructura mediante un par de pernos M4 con sujeción de tornillo; por tanto se determina si los mismos cumplen con la función de resistir el peso del sistema mediante un análisis de esfuerzos.

- Soporte A

Se calcula el esfuerzo admisible del perno  $\sigma_{adm}$ , para lo cual se sabe que el material que lo conforma es acero AISI 1015, el mismo que es utilizado en la fabricación de pernos y tornillos de uso general como para la sujeción de madera y metales (Deutschman, 1987, p. 844).

$$S_{y_p} = 0.577 * S_y$$

Ecuación [3-4]

Donde:

$Sy_p$  = Esfuerzo de fluencia para el perno

$Sy = 414 \text{ MPa}$  (Esfuerzo de fluencia del acero AISI 1015)

$$Sy_p = 0.577 * Sy$$

$$Sy_p = 0.577 * 414 \text{ MPa} = 238.88 \text{ MPa}$$

Se considera un factor de seguridad de 1.5, ya que de igual forma se realiza un análisis estático; mediante la ecuación [3-1] se tiene:

$$\sigma_{adm} = \frac{238.88 \text{ MPa}}{1.5} = 159.25 \text{ MPa}$$

El esfuerzo máximo depende de la fuerza que se aplica en el soporte; se considera un caso crítico, es decir toda la fuerza se concentra en un solo perno, por tanto:

$$\sigma_{mp} = \frac{F_{sp}}{A_{sp}} \quad \text{Ecuación [3-5]}$$

Donde:

$\sigma_{mp}$  = Esfuerzo máximo sobre el perno

$F_{sp} = Wa_1 = Wa_2 = Wa_3 = Wa_4$  = Fuerza cortante sobre el perno

$A_{sp}$  = Área de la sección transversal del perno

$$\sigma_{mpa} = \frac{10.714 N}{\pi * \frac{(4 mm)^2}{4}}$$

$$\sigma_{mpa} = 0.853 MPa$$

Donde:

$\sigma_{mpa}$  = Esfuerzo máximo sobre el perno en el soporte A

- Soporte B

Utilizando la ecuación [3-5], se tiene:

$$\sigma_{mpb} = \frac{12.764 N}{\pi * \frac{(4 mm)^2}{4}}$$

$$\sigma_{mpb} = 1.016 MPa$$

Donde:

$\sigma_{mpb}$  = Esfuerzo máximo sobre el perno en el soporte B

- Soporte C

$$\sigma_{mpc} = \frac{11.178 N}{\pi * \frac{(4 mm)^2}{4}}$$

$$\sigma_{mpc} = 0.889 MPa$$

Donde:

$\sigma_{mpc}$  = Esfuerzo máximo sobre el perno en el soporte C

- Soporte D

$$\sigma_{mpd} = \frac{8.780 \text{ N}}{\pi * \frac{(4 \text{ mm})^2}{4}}$$

$$\sigma_{mpd} = 0.699 \text{ MPa}$$

Donde:

$\sigma_{mpd}$  = Esfuerzo máximo sobre el perno en el soporte D

Por lo tanto los pernos que se utilizan son apropiados ya que esfuerzo admisible es mayor al máximo aplicado  $\sigma_{adm} > \sigma_{mp}$ .

## 3.2 BANDA TRANSPORTADORA

A la banda transportadora se la considera como la parte principal del sistema mecánico, ya que es la encargada de trasladar los envases a través de la mayoría de las etapas del proceso.

Por tal motivo para su diseño se considera el peso que transporta así como los elementos que intervienen en su funcionamiento.

### 3.2.1 DISEÑO DE LA BANDA TRANSPORTADORA

#### 3.2.1.1 Cinta de banda

Se selecciona la cinta de la banda, la cual es de material PVC grado alimenticio; esto debido a que se transporta envases que contienen granos de

arroz, además que este tipo es ampliamente utilizado en el área industrial alimenticio.

La masa de las botellas sobre la banda es aproximadamente de 413 g, ya que durante la operación del sistema están involucradas un número de cuatro.

**Tabla 3.8** Características técnicas de la banda de PVC.

| DATOS TÉCNICOS   |                         |
|--|-------------------------|
| <b>Espesor</b>   | 2 mm                    |
| <b>Peso de la banda</b>  | $2,3 \frac{Kg}{m^2}$    |
| <b>Diámetro de la polea (mínimo)</b>   | 25 mm                   |
| <b>Diámetro mínimo de la polea con contra flexión</b>  | 40 mm                   |
| <b>Carga para 1% de extensión por unidad de ancho</b>  | $12 \frac{N}{mm}$       |
| <b>Fuerza de tracción para 1% de alargamiento después de la relajación por unidad de ancho</b> | $7,5 \frac{N}{mm}$      |
| <b>Fuerza de tracción admisible por unidad de ancho</b>  | $12 \frac{N}{mm}$       |
| <b>Temperatura de funcionamiento (continua)</b>  | Min -10 °C<br>Max 70 °C |

Fuente: Catálogo Ficha de datos del producto NAB-8EEWV 11, Habasit

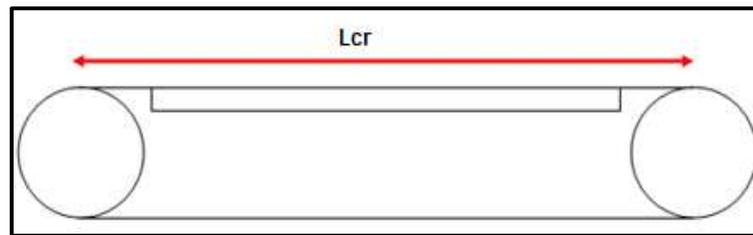
El diámetro del rodillo de acuerdo al tipo de banda fue tomado de la tabla anterior del catálogo de bandas:

$$D_{rb} = 25mm$$

$$r_{rb} = 12.5 \text{ mm}$$

Por criterios de diseño se impone una longitud entre centros de los rodillos, entonces:

$$L_{cr} = 640 \text{ mm}$$



Fuente: Los autores

**Fig. 3.9** Diagrama lateral de la banda transportadora.

$$L_t = 2L_{cr} + 2\pi r_{rb}$$

Ecuación [3-6]

Donde:

$L_t$  = Longitud geométrica de la banda

$r_{rb}$  = Radio de los rodillos

$$L_t = 2 * (640 \text{ mm}) + 2\pi * (12.5 \text{ mm})$$

$$L_t = 1358.5 \text{ mm} \approx 1360 \text{ mm}$$

El ancho de la banda es un dato que se toma a partir del diámetro de la botella plástica el cual es de 53 mm, por lo tanto:

$$Ancho_b = 60 \text{ mm}$$

El área de este elemento es:

$$Ab = Lt * Ancho_b \quad \text{Ecuación [3-7]}$$

Donde:

$Ab$ = Área de la banda

$Ancho_b$ = Ancho de la banda

$$Ab = 1.36 \text{ m} * 0.06 \text{ m}$$

$$Ab = 0.082 \text{ m}^2$$

El peso de la banda por unidad de área es un dato establecido por el fabricante y es de  $P_{xa} = 2.3 \frac{Kg}{m^2}$ .

Por lo tanto la masa de la cinta de banda utilizada es:

$$Mbt = P_{xa} * Ab \quad \text{Ecuación [3-8]}$$

$$Mbt = 2.3 \frac{Kg}{m^2} * 0.082 \text{ m}^2$$

$$Mbt = 0.189 \text{ Kg}$$

### 3.2.1.2 Motor de banda transportadora

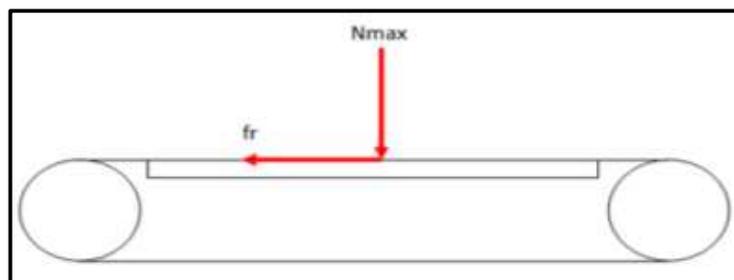
Para seleccionar el motor eléctrico apropiado es importante determinar tanto la potencia como el torque que se necesita para el accionamiento de la banda.

**Tabla 3.9** Coeficiente de fricción del acero con algunos materiales.

| Características mecánicas                   | POM    | PTFE     | PP   | PE   | PE   | PVC  |
|---|--------|----------|------|------|------|------|
|   | Derlin | Algoflon |      | APM  | UHMW |      |
| <b>Coeficiente de fricción con el acero</b> | 0,3    | 0,1      | 0,35 | 0,32 | 0,3  | 0,42 |

Fuente: Catálogo EuroFlon S.A

Se utiliza el coeficiente de fricción entre el PVC y el acero que es  $\mu = 0.42$ , esto debido a que la placa donde se desplazara la banda es de acero galvanizado.



Fuente: Los autores

**Fig. 3.10** Diagrama de cuerpo libre sobre la banda.

$$Nmax = (4Mb_1 + Mbt) * 9.81 \quad \text{Ecuación [3-9]}$$

Donde:

$Nmax$  = Fuerza normal máxima sobre la banda

$Mb_1$  = Masa de la botella llena con tapa

$Mbt$  = Masa de la cinta transportadora

$$Nmax = (0.413 + 0.189)Kg * 9.81 \frac{m}{s^2}$$

$$N_{max} = 5.906 \text{ N}$$

La fuerza de rozamiento es:

$$f_r = \mu * N_{max} \quad \text{Ecuación [3-10]}$$

$$f_r = 0.42 * 5.906 \text{ N}$$

$$f_r = 2.481 \text{ N}$$

Ahora el valor de la velocidad lineal es impuesto de acuerdo al número de botellas que se procesa en la planta:

$$v_b = 0.06 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

La velocidad angular es:

$$\omega = \frac{v_b}{r_{rb}} \quad \text{Ecuación [3-11]}$$

$$\omega = \frac{0.06}{0.0125}$$

$$\omega = 4.8 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

En revoluciones por minuto:

$$RPM = 4.8 * \frac{60\text{s}}{1\text{min}} * \frac{1 \text{ rev}}{2\pi \text{ rad}}$$

$$RPM = 45.83 \approx 46$$

Se determina la potencia requerida para el desplazamiento de la banda transportadora, en este caso está dada por la fuerza de rozamiento y la velocidad de la banda:

$$Pot = fr * v_b \quad \text{Ecuación [3-12]}$$

$$Pot = 2.481 \text{ N} * 0.06 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 0.149 \text{ W}$$

Con esto se obtiene el torque necesario:

$$T_n = \frac{Pot}{\omega} \quad \text{Ecuación [3-13]}$$

$$T_n = \frac{0.149 \frac{\text{Nm}}{\text{s}}}{4.8 \frac{\text{rad}}{\text{s}}} = 0.0310 \text{ Nm}$$

Este dato permite seleccionar el motor, el cual es marca Metal Gearmotor 100:1 el mismo que tiene las siguientes características técnicas:

**Tabla 3.10** Datos técnicos del motor seleccionado.

| Especificaciones generales                     |          |
|--|----------|
| <b>Velocidad de funcionamiento libre a 12V</b> | 100 RPM  |
| <b>Consumo de corriente máxima</b>             | 5 A      |
| <b>Torque máximo</b>                           | 16 kg-cm |

Fuente: Recuperado de <http://www.pololu.com/catalog/product/1106/specs>



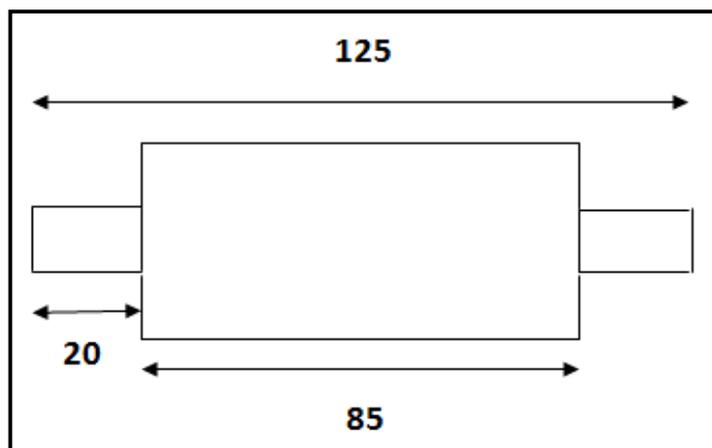
Fuente: <http://www.pololu.com/catalog/product/1106>, Metal Gear Motor, Inglés

**Fig. 3.11** Motor 100:1 Metal Gearmotor.

### 3.2.1.3 Rodillos para la banda transportadora

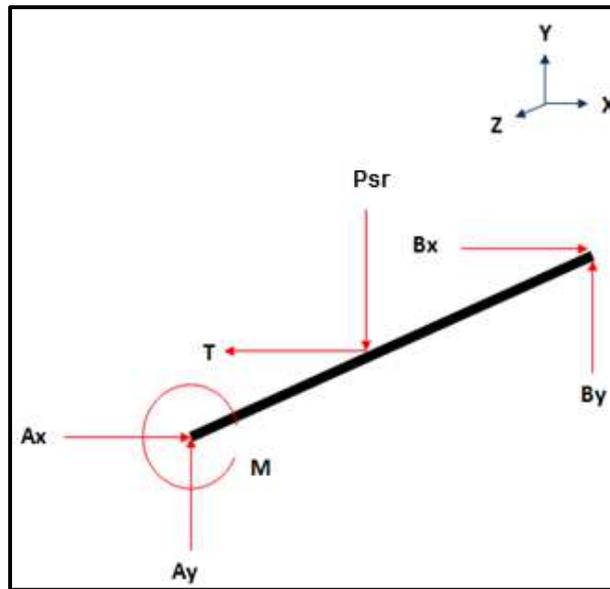
Se realiza el análisis para el rodillo el cual debido a los requerimientos del proceso en cuanto a la velocidad de trabajo de la banda, se diseña para el máximo torque que el motor puede entregar que en este caso es 16 kg-cm.

$$T_{mot} = 16kgcm = 1.568 Nm$$



Fuente: Los autores

**Fig. 3.12** Dimensionamiento general del rodillo.



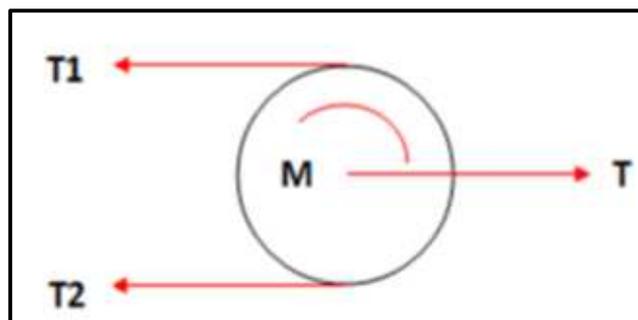
Fuente: Los autores

**Fig. 3.13** Distribución de fuerzas sobre el rodillo.

El peso sobre el rodillo es igual a la fuerza normal máxima sobre la banda:

$$Psr = Nmax = 5.906 \approx 6 \text{ N}$$

Se realiza el cálculo de la tensión  $T$  sobre el rodillo:



Fuente: Los autores

**Fig. 3.14** Diagrama de la tensión en el rodillo.

$$T = \frac{2 \cdot T_n}{r_{rb}}$$

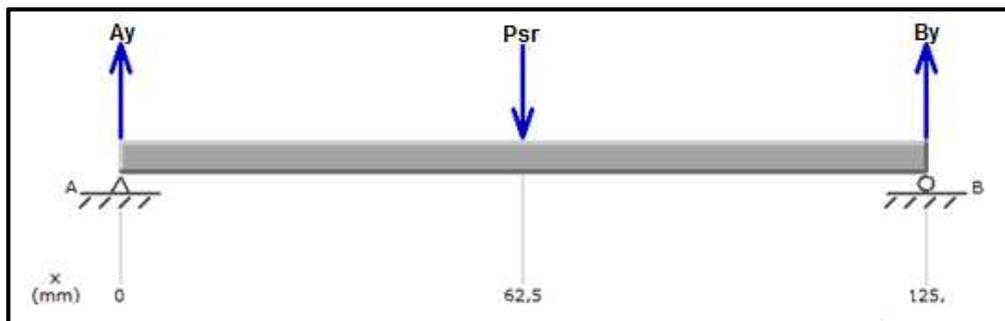
Ecuación [3-14]

$$T = \frac{2 * (0.0310 \text{ Nm})}{0.0125 \text{ m}}$$

$$T = 4.96 \text{ N}$$

Se analiza las cargas existentes sobre el rodillo en los dos planos donde se originan:

- Análisis del rodillo en el plano Y-Z



Fuente: Los autores

**Fig. 3.15** Distribución de fuerzas plano Y-Z.

$$\Sigma Fy = 0$$

$$-P_{sr} + Ay + By = 0$$

Donde:

$P_{sr}$  = Peso sobre el rodillo

$Ay$  = Reacción sobre el rodamiento A

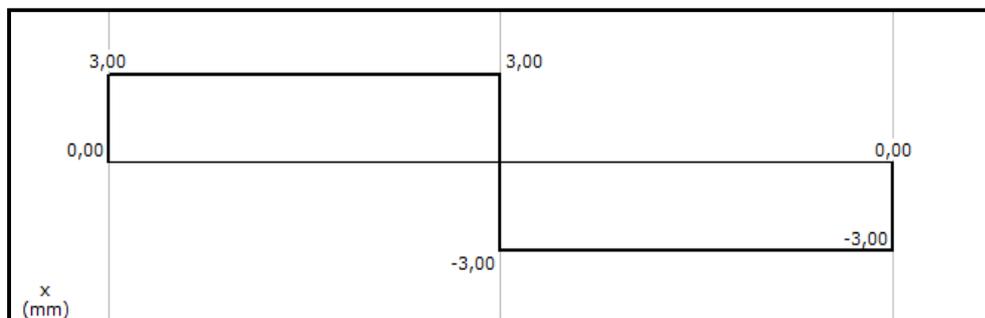
$By$  = Reacción sobre el rodamiento B

Pero  $A_y$  es igual a  $B_y$  ya que no existe otra carga que afecte al rodillo, entonces:

$$A_y = B_y$$

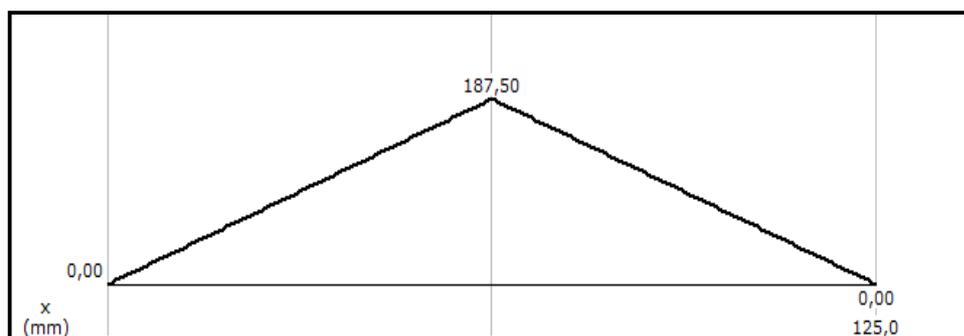
$$A_y = \frac{Psr}{2} = \frac{6}{2}$$

$$A_y = B_y = 3 \text{ N}$$



Fuente: Los Autores

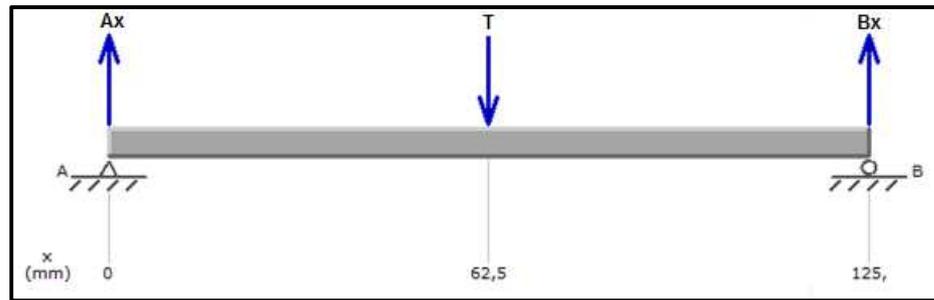
**Fig. 3.16** Diagrama de fuerzas del eje plano Y-Z.



Fuente: Los Autores

**Fig. 3.17** Diagrama de momentos del eje plano Y-Z.

- Análisis del rodillo en el plano X-Z



Fuente: Los autores

**Fig. 3.18** Distribución de fuerzas plano X-Z.

$$\Sigma F_x = 0$$

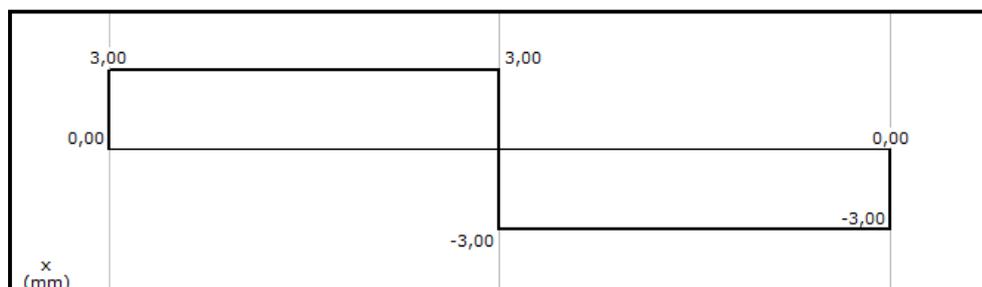
$$-T + Ax + Bx = 0$$

De igual manera  $Ax$  es igual a  $Bx$  ya que no existe otra carga que afecte al rodillo, entonces:

$$Ax = Bx$$

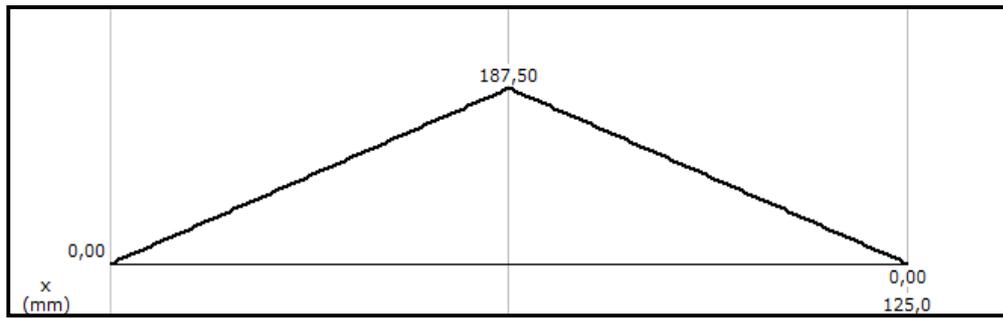
$$Ax = \frac{T}{2} = \frac{4.96}{2}$$

$$Ax = Bx = 2.48 \text{ N}$$



Fuente: Los autores

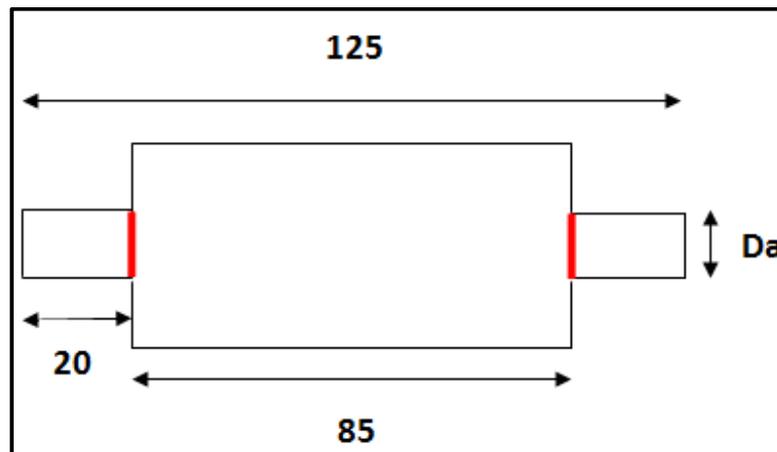
**Fig. 3.19** Diagrama de fuerzas del eje plano X-Z.



Fuente: Los autores

**Fig. 3.20** Diagrama de momentos del eje plano X-Z.

El rodillo tiene en sus extremos salientes para el apoyo en la estructura de bancada; se realiza el cálculo del diámetro mínimo de los apoyos del rodillo (sección roja):



Fuente: Los autores

**Fig. 3.21** Sección del rodillo sometida a cálculo.

$Da$  = Diámetro de los apoyos del rodillo

Fuerza total aplicada en el apoyo del rodillo:

$$F_{tar} = \sqrt{Ax^2 + Ay^2} \quad \text{Ecuación [3-15]}$$

$$Ft_{ar} = \sqrt{2.48^2 + 3^2}$$

$$Ft_{ar} = 3.892 \text{ N}$$

El momento flector es:

$$M = Ft_{ar} * 20 \text{ mm}$$

$$M = 3.892 \text{ N} * 20 \text{ mm}$$

$$M = 77.84 \text{ Nmm}$$

Para conocer el diámetro del apoyo se considera el esfuerzo por flexión así como la inercia del círculo:

$$\sigma_r = \frac{M * ra_r}{I_c} \quad \text{Ecuación [3-16]}$$

$$I_c = \frac{\pi * ra_r^4}{4} \quad \text{Ecuación [3-17]}$$

Donde:

$I_c$  = Inercia del círculo

$ra_r$  = Radio de apoyo del rodillo

$\sigma_r$ : Esfuerzo por flexión del rodillo

$$\sigma_r = \frac{77.84 \text{ Nmm} * ra_r}{\frac{\pi * ra_r^4}{4}}$$

$$\sigma_r = \frac{99.109 \text{ Nmm}}{ra_r^3}$$

$$\sigma_r \max = \frac{99.109 \text{ Nmm}}{ra_r^3}$$

$$\sigma_r \min = -\frac{99.109 \text{ Nmm}}{ra_r^3}$$

$$\sigma_r m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} = 0 \quad \text{Ecuación [3-18]}$$

$$\sigma_r a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} = \sigma_r \quad \text{Ecuación [3-19]}$$

Donde:

$\sigma_r m$  = Esfuerzo por flexión medio.

$\sigma_r a$  = Esfuerzo por flexión alternativo.

El coeficiente estático de flexión debido al cambio de sección es  $Kt\sigma = 2.2$  (Budynas, 2012, p.146).

$$kf_\sigma = 1 + (kt_\sigma - 1) * q \quad \text{Ecuación [3-20]}$$

Donde:

$Kf_\sigma$  = Coeficiente de fatiga por flexión

$Kt\sigma$  = Concentración de esfuerzo por flexión

$q = 1$  (Máxima sensibilidad en la muesca)

$$kf_\sigma = 1 + (2.2 - 1) * 1$$

$$kf_\sigma = 2.2$$

Entonces:

$$\sigma_a^* = k_{f\sigma} * \sigma_r a \quad \text{Ecuación [3-21]}$$

Donde:

$\sigma_a^*$  = Esfuerzo de flexión por fatiga

$$\sigma_a^* = 2.2 * \frac{99.109 \text{ Nmm}}{ra_r^3}$$

$$\sigma_a^* = \frac{218.04 \text{ Nmm}}{ra_r^3}$$

Esfuerzo por torsión:

$$\tau = \frac{T_{mot} * ra_r}{J} \quad \text{Ecuación [3-22]}$$

Donde:

$\tau$  = Esfuerzo por torsión

$J$  = Momento de torsión

$$J = \frac{\pi * ra_r^4}{2} \quad \text{Ecuación [3-23]}$$

Entonces:

$$\tau = \frac{2 * T_{mot} * ra_r}{\pi * ra_r^4}$$

$$\tau = \frac{998.22 \text{ Nmm}}{ra_r^3}$$

$$\tau_{max} = \tau_{min} = \frac{998.22 \text{ Nmm}}{ra_r^3}$$

$$\tau_m = \frac{\tau_{max} + \tau_{min}}{2} = \tau \quad \text{Ecuación [3-24]}$$

$$\tau_a = \frac{\tau_{max} - \tau_{min}}{2} = 0 \quad \text{Ecuación [3-25]}$$

Donde:

$\tau_m$  = Esfuerzo por torsión medio

$\tau_a$  = Esfuerzo por torsión alternativo

El coeficiente estático de torsión debido al cambio de sección  $kt_\tau = 3.0$  (Budynas, 2012 p.186).

$$kf_\tau = 1 + (kt_\tau - 1) * q \quad \text{Ecuación [3-26]}$$

Donde:

$kf_\tau$  = Coeficiente de fatiga por torsión

$kt_\tau$  = Concentración de esfuerzo por torsión

$$kf_\tau = 1 + (3 - 1) * 1$$

$$kf_\tau = 3$$

Entonces:

$$\tau_m^* = kf_\tau * \tau_m$$

Donde:

$\tau_m^*$  = Esfuerzo de flexión por torsión

$$\tau_m^* = 3 * \frac{998.22 \text{ Nmm}}{ra_r^3}$$

$$\tau_m^* = \frac{2994.7 \text{ Nmm}}{ra_r^3}$$

Aplicando el teorema de esfuerzo de VON-MISSES, se tiene:

$$\sigma_{eqm} = \sqrt{\sigma_m^{*2} + 3\tau_m^{*2}} \quad \text{Ecuación [3-27]}$$

$$\sigma_{eqa} = \sqrt{\sigma_a^{*2} + 3\tau_a^{*2}} \quad \text{Ecuación [3-28]}$$

Donde:

$\sigma_{eqm}$  = Esfuerzo equivalente medio

$\sigma_{eqa}$  = Esfuerzo equivalente alternativo

$$\sigma_{eqm} = \frac{5186.97 \text{ Nmm}}{ra_r^3}$$

$$\sigma_{eqa} = \frac{218.04 \text{ Nmm}}{ra_r^3}$$

El cálculo de la resistencia a la fatiga, se basa en distintos factores de diseño, varios de los cuales son tomados bajo criterios de los diseñadores, entonces:

$$Se = k_t * k_{sup} * k_{car} * k_{conf} * Se' \quad \text{Ecuación [3-29]}$$

Donde:

$k_t$  = Factor de tamaño

$k_{sup}$  = Factor de superficie

$k_{car}$  = Factor de carga

$k_{conf}$  = Factor de confiabilidad

$Se'$  = Limite a la fatiga para vida infinita

Entonces:

$$Se' = 0.5 * Su \qquad \text{Ecuación [3-30]}$$

Donde:

$Su$  = Resistencia última

Para el caso del Aluminio 6061 esta variable tiene un valor de  $124 \text{ MPa} = 18 \text{ Ksi}$ . Para materiales forjados se considera un  $Su \leq 200 \text{ Ksi}$ .

$$Se' = 0.5 * 124 = 62 \text{ MPa}$$

Determinación de los Factores

- Factor de tamaño:

$k_t = 0.7$  En el caso cuando no se tiene datos iniciales (Deutschman, 1987, p. 124).

- Factor de Superficie:

$$k_{sup} = A(Su)^b \quad \text{Ecuación [3-31]}$$

Donde:

$A$  y  $b$  = Son los coeficientes para la ecuación del factor de superficie.

**Tabla 3.11** Valores de coeficientes según el tipo de acabado superficial.

| Acabado Superficial          | MPa  |        | Kpsi |        |
|------------------------------|------|--------|------|--------|
|                              | A    | b      | A    | b      |
| Maquinado o estirado en frio | 4,51 | -0,265 | 2,7  | -0,265 |

Fuente: Diseño de Máquinas, Norton, Primera ed., 1999, p.378

$$k_{sup} = 2.7(18)^{-0.265} = 1.255$$

- Factor de carga:

Factor de carga igual a 1 cuando existe flexión.  $k_{car} = 1$

- Factor de Confiabilidad:

**Tabla 3.12** Valores para el factor de confiabilidad.

| Confiabilidad % | $k_{confiabilidad}$ |
|-----------------|---------------------|
| 50              | 1.000               |
| 90              | 0.897               |
| 99              | 0.814               |
| 99.9            | 0.753               |
| 99.99           | 0.702               |
| 99.999          | 0.659               |

Fuente: Diseño de Máquinas, Norton, Primera ed., 1999, p. 381.

El factor elegido es para una confiabilidad del 90%, ya que los resultados parciales obtenidos demuestran que el diseño seleccionado es apropiado para el trabajo requerido.

Entonces:

$$S_e = 0.7 * 1.255 * 1 * 0.897 * 62 \text{ MPa} = 48.857 \text{ MPa}$$

Aplicando el criterio de Soderberg:

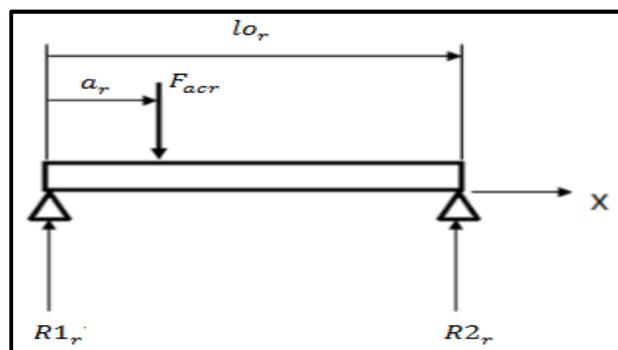
$$\frac{S_y}{FS} = \sigma_{eqm} + \frac{S_y * \sigma_{eqa}}{S_e} \quad \text{Ecuación [3-32]}$$

$$\frac{55.149 \text{ MPa}}{1.5} = \frac{5186.97 \text{ Nmm}}{ra_r^3} + \frac{55.149 \text{ MPa} * \frac{218.04 \text{ Nmm}}{ra_r^3}}{48,857 \text{ M}}$$

El radio mínimo para el apoyo del rodillo es:

$$ra_r = 5.2 \text{ mm}$$

Finalmente se determina la deflexión sobre el rodillo de la banda transportadora:



Fuente: Los autores

**Fig. 3.22** Diagrama del rodillo para análisis de deflexión.

$$y_{r_{max}} = \frac{F_{acr} * l_{or}^3}{48 * E * I_c} \quad \text{Ecuación [3-33]}$$

Donde:

$y_{r_{max}}$  = Deflexión máxima en el rodillo

$F_{acr}$  = Fuerza total que actúa sobre el rodillo

$l_{or}$  = 125 mm (Longitud total del rodillo)

$a_r$  = Distancia donde se localiza la fuerza sobre el rodillo

$R1_r$  y  $R2_r$  = Reacciones normales sobre el eje

$$F_{acr} = \sqrt{T^2 + N_{max}^2} \quad \text{Ecuación [3-34]}$$

$$F_{acr} = \sqrt{4.96^2 + 6^2}$$

$$F_{acr} = 7.784 \text{ N}$$

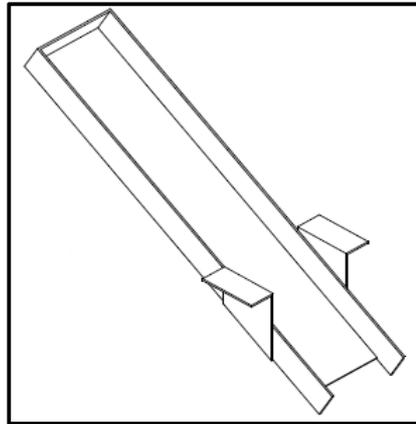
$$y_{r_{max}} = \frac{7.784 \text{ N} * (125 \text{ mm})^3 * 64}{48 * 69000 \text{ MPa} * \pi * (25 \text{ mm})^4}$$

$$y_{r_{max}} = 2.39 \times 10^{-4} \text{ mm}$$

### 3.3 DISEÑO DEL SISTEMA DISPENSADOR DE TAPAS

Con la finalidad de colocar la tapa sobre el envase para su posterior detección y roscado, se diseña un dispensador en base al dimensionamiento y al peso de la tapa; se basa en una mesa inclinada que facilita la salida de las

mismas. Sobre el dispensador se coloca un total de cinco tapas alineadas para su posterior retiro.



Fuente: Los autores

**Fig. 3.23** Diagrama del sistema dispensador de tapas.

Considerando el número de tapas a colocar en el dispensador, se determina el peso aplicado sobre la mesa inclinada por tanto:

Datos de la mesa:

$$m_t = 3.2 \text{ g}$$

$$\text{gravedad} = 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$W = m_t * \text{gravedad} \quad \text{Ecuación [3-35]}$$

$$W_{t1} = 2 * 3.2 \text{ g} * \frac{1\text{Kg}}{1000\text{g}} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$W_{t1} = 0.0627 \text{ N}$$

$$Wt2 = 3 * 3.2 \text{ g} * \frac{1\text{Kg}}{1000\text{g}} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$Wt2 = 0.0942 \text{ N}$$

Donde:

$mt$  = Masa de la tapa

$Wt1$  = Peso de dos tapas

$Wt2$  = Peso de tres tapas

La mesa tiene una inclinación con respecto a la horizontal, el ángulo se establece bajo criterios de diseño de tolvas (Linarez, 2010), se determina de forma experimental el ángulo de inclinación con el cual el material comienza a deslizarse; al ángulo resultante se le suma 15° más con el fin de garantizar el desplazamiento.

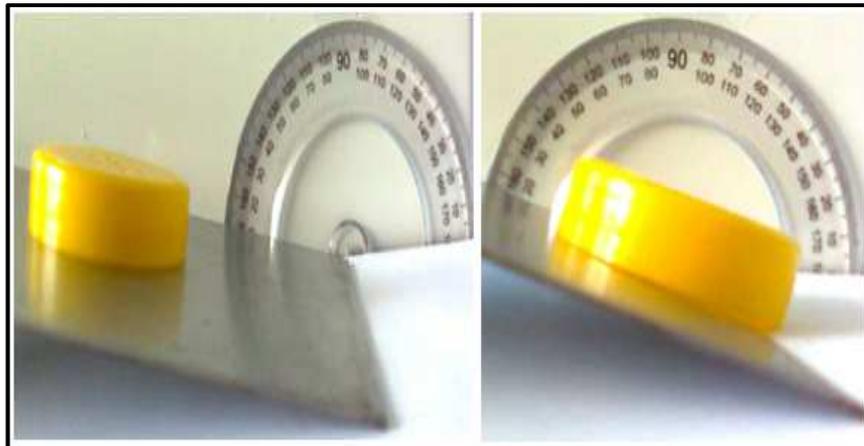
$$\alpha_i = \alpha_e + 15^\circ \quad \text{Ecuación [3-36]}$$

Donde:

$\alpha_i$  = Ángulo de la mesa de inclinación

$\alpha_e$  = Ángulo experimental de inclinación

Para determinar el ángulo se realiza métodos experimentales utilizando el acero galvanizado; en donde se levanta un extremo de la placa gradualmente hasta visualizar el desplazamiento de la tapa.



Fuente: Los autores

**Fig. 3.24** Análisis experimental del ángulo de inclinación del dispensador.

**Tabla 3.13** Datos experimentales del ángulo de inclinación.

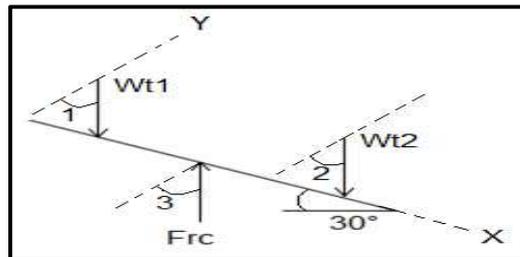
| NÚMERO DE INTENTOS | ÁNGULO |
|--------------------|--------|
| 1                  | 13     |
| 2                  | 14     |
| 3                  | 15     |
| 4                  | 15     |
| 5                  | 16     |
| 6                  | 17     |
| 7                  | 12     |
| 8                  | 15     |
| 9                  | 14     |
| 10                 | 16     |
| Promedio:          | 14.7   |

Fuente: Los Autores

Se comprueba que comienza a deslizarse sobre el acero con un ángulo aproximado de  $14.7^\circ \approx 15^\circ$ . Utilizando la ecuación [3-36] se determina:

$$\alpha_i = 15^\circ + 15^\circ = 30^\circ$$

El dispensador está sujeto sobre la banda transportadora mediante dos columnas, de esta manera la fuerza resultante en las columnas  $Frc$  se obtiene mediante un análisis de cuerpo libre.



Fuente: Los autores

**Fig. 3.25** Diagrama de cuerpo libre de la mesa inclinada.

$$\Sigma F = 0$$

$$Frc = Wt1 + Wt2$$

$$Frc = 0.0627 + 0.0942 N = 0.157 N, \frac{Frc}{2} = 0.0785 N$$

Se necesita conocer el espesor del material, para lo cual se realiza un análisis de esfuerzos sobre la mesa inclinada del dispensador.

**Tabla 3.14** Algunas propiedades mecánicas del acero galvanizado.

| PROPIEDADES  | VALOR              | UNIDAD   |
|--|--------------------|----------|
| <b>Módulo elástico</b>                             | $2 \times 10^{11}$ | $N/m^2$  |
| <b>Coficiente de Poisson</b>                       | 0.29               |          |
| <b>Densidad</b>                                    | 7870               | $Kg/m^3$ |
| <b>Resistencia a la fluencia o Límite elástico</b> | 203943242.6        | $N/m^2$  |

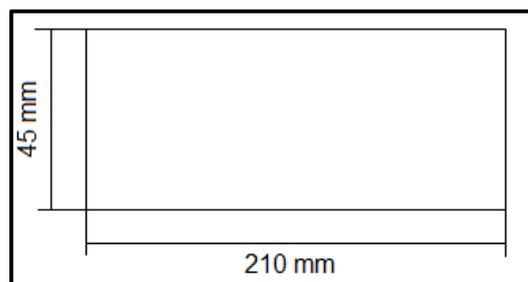
Fuente: Datos de materiales en SolidWorks Premium 2012

Se toma un valor de 1.5 para el factor de seguridad ya que el diseño del sistema se analiza bajo cargas estáticas.

Con el material seleccionado la resistencia a la fluencia es un dato establecido para el acero, entonces utilizando la ecuación [3-1] y los datos obtenidos de las tablas se tiene:

$$\sigma_{adm} = \frac{203.943 \text{ MPa}}{1.5}$$

$$\sigma_{adm} = 135.96 \text{ MPa}$$

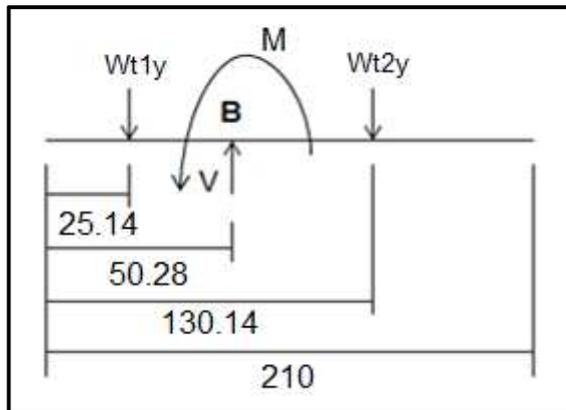


Fuente: Los autores

**Fig. 3.26** Dimensionamiento de la mesa inclinada.

Se determina el esfuerzo máximo considerando las fuerzas actuantes sobre la mesa inclinada. Para esto se analiza en el punto B, colineal al punto de sujeción; donde se genera una fuerza cortante y un momento.

En función a las dimensiones requeridas de la base inclinada, se determinan las distancias respecto al punto de análisis B, donde están aplicados los pesos de las tapas.



Fuente: Los autores

**Fig. 3.27** Distancia en mm de las fuerzas sobre la mesa inclinada.

En la figura 3.25 los ángulos 1, 2 y 3 son de  $30^\circ$ , por tanto los componentes de los pesos perpendiculares a la mesa, son los involucrados en este análisis para determinar el momento.

$$\Sigma M_B = 0 \quad S.AH.+$$

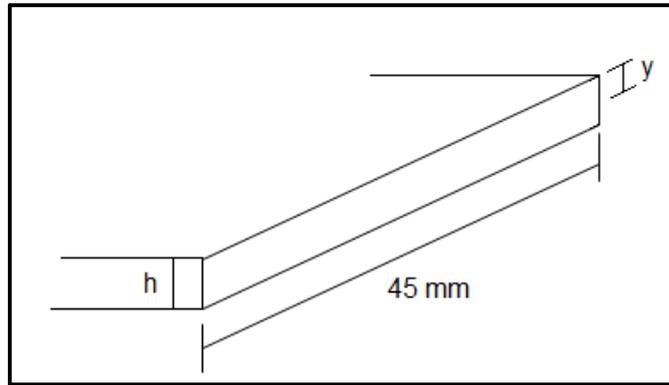
$$Wt1_y * 25.14 \text{ mm} + M - Wt2_y * 79.86 \text{ mm} = 0$$

$$M = Wt2 * \cos(30^\circ) * 0.02514 \text{ m} - Wt1 * \cos(30^\circ) * 0.07986 \text{ m}$$

$$M = 0.0942 \text{ N} * \cos(30^\circ) * 0.02514 \text{ m} - 0.0627 \text{ N} * \cos(30^\circ) * 0.07986 \text{ m}$$

$$M = -2.285 \times 10^{-3} \text{ Nm}$$

Partiendo del esfuerzo máximo usando la ecuación [3-2] se determina el espesor que debe tener el material.



Fuente: Los autores

**Fig. 3.28** Diagrama de los parámetros de la base del dispensador.

$$\sigma_{max} = \frac{2.285 \times 10^{-3} \text{ Nm} * \frac{h}{2}}{\frac{0.045 \text{ m} * h^3}{12}}$$

Se sabe que el esfuerzo admisible es mayor o igual que el esfuerzo máximo, por tanto:

$$\sigma_{adm} \geq \sigma_{max}$$

$$1.359 \times 10^8 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = \frac{2.285 \times 10^{-3} \text{ Nm} * \frac{h}{2}}{\frac{0.045 \text{ m} * h^3}{12}}$$

$$1.359 \times 10^8 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = \frac{0.0274 \text{ Nm}}{0.09 \text{ m} * h^2}$$

$$h^2 = \frac{0.0274 \text{ Nm}}{0.09 \text{ m} * 1.359 \times 10^8 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}}$$

$$h = 4.7 \times 10^{-5} \text{ m}$$

$$h = 0.0473 \text{ mm}$$

Con el dato calculado del espesor mínimo, se utiliza el acero galvanizado con espesor de 1 mm por cuestiones de seguridad y además por ser uno de los más comerciales. Mediante el diseño CAD de este elemento en SolidWorks, considerando su dimensionamiento y el material, se puede determinar la masa de este dispositivo; el cual es de 193.52 gramos.

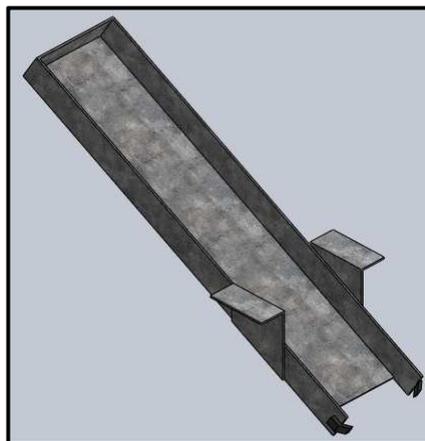
Por lo tanto:

$$W_d = 193.52 \text{ g} * \frac{1 \text{ Kg}}{1000 \text{ g}} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 1.898 \text{ N}$$

Donde:

$W_d = \text{Peso del dispensador}$

A la salida de las tapas en la parte inferior de la mesa inclinada se coloca un par de acoples de caucho, con la finalidad de sostener a la tapa hasta que sea retirada por el envase.



Fuente: Los autores

**Fig. 3.29** Modelo CAD del dispensador de tapas.

- Diseño de las columnas de soporte

El dispensador de tapas necesita estar apoyado sobre dos columnas de aluminio 6061. Para el análisis de diseño se utiliza el criterio de pandeo de columnas para determinar si la carga que soporta cada una es la adecuada.

Datos de la columna de soporte del dispensador:

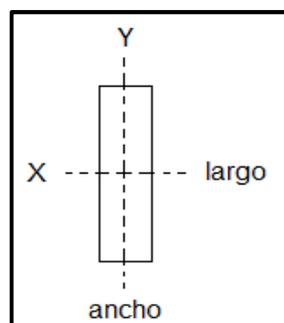
$$L = 147 \text{ mm}$$

$$\text{espesor} = 3 \text{ mm}$$

$$\text{ancho} = 30 \text{ mm}$$

Se realiza en el caso de columna de extremo libre – empotrado, ya que por la parte inferior la columna está sujeta en los perfiles laterales y en la superior reposa el dispensador; en este caso la longitud efectiva  $K$  es 2.1 para casos prácticos (Mott, 2006, p. 234).

Se determina el radio de giro, considerando un eje  $Y$  como paralelo al lado largo de la columna.



Fuente: Los autores

**Fig. 3.30** Sección transversal de la columna de soporte del dispensador.

$$r_y = \frac{\text{espesor}}{\sqrt{12}} \quad \text{Ecuación [3-37]}$$

$$r_y = \frac{3 \text{ mm}}{\sqrt{12}} = 0.866 \text{ mm}$$

Se calcula tanto la relación de esbeltez así como la relación de esbeltez de transición.

$$Re = \frac{k*L}{r_y} \quad \text{Ecuación [3-38]}$$

$$Cc = \sqrt{\frac{2*\pi^2*E}{S_y}} \quad \text{Ecuación [3-39]}$$

Donde:

$Re$  = Relación de esbeltez

$Cc$  = Relación de esbeltez de transición

$E$  = Módulo elástico

$S_y$  = Resistencia a la fluencia

Aplicando las ecuaciones [3-38] y [3-39] respectivamente se obtiene:

$$Re = \frac{2.1 * 147 \text{ mm}}{0.866 \text{ mm}}$$

$$Re = 356.47$$

$$C_c = \sqrt{\frac{2 * \pi^2 * 69000 \text{ MPa}}{55.1485 \text{ MPa}}}$$

$$C_c = 157.153$$

Como la relación de esbeltez es mayor a la relación de esbeltez de transición (Mott, 2006, p. 235) se considera una columna larga por tanto se aplica la fórmula de Euler:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 * E * A}{\left(\frac{k * L}{r}\right)^2} \quad \text{Ecuación [3-40]}$$

Donde:

$P_{cr}$  = Carga crítica

$A$  = Área transversal de la columna

$r = r_y$  = Radio de giro

Por lo tanto para este caso la carga crítica es:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 * 69000 \text{ MPa} * (3 \times 10^{-3} \text{ m} * 30 \times 10^{-3} \text{ m})}{\left(\frac{2.1 * 0.147 \text{ m}}{0.866 \times 10^{-3} \text{ m}}\right)^2}$$

$$P_{cr} = 0.482 \times 10^{-3} \text{ MN}$$

$$P_{cr} = 482.34 \text{ N}$$

$$P_{adm} = \frac{P_{cr}}{N} \quad \text{Ecuación [3-41]}$$

Donde:

$P_{adm}$  = Carga admisible

$N$  = Número de columnas

$$P_{adm} = \frac{482.34 N}{2} = 241.17 N$$

El peso que se aplica sobre las columnas es:

$$W_{total} = Frc + W_d \quad \text{Ecuación [3-42]}$$

$$W_{total} = 0.157 N + 1.898 N$$

$$W_{total} = 2.055 N$$

Donde:

$W_{total}$  = Peso total aplicado en las columnas

Por lo tanto el aluminio 6061 es adecuado como material para las columnas de soporte, ya que el peso total aplicado es menor a la carga admisible de las columnas  $W_{total} < P_{adm}$ .

### 3.4 NEUMÁTICA

El sistema neumático que se utiliza dentro del proceso se basa en un conjunto de cuatro cilindros con sus respectivas electroválvulas, además de un compresor como fuente de alimentación.

Para el accionamiento general del sistema neumático se utiliza una presión de funcionamiento de 4 Bar ó 0.4 MPa suministrada por un compresor que además provee de un caudal máximo de 15 l/min.

### **3.4.1 DISEÑO DEL SISTEMA NEUMÁTICO**

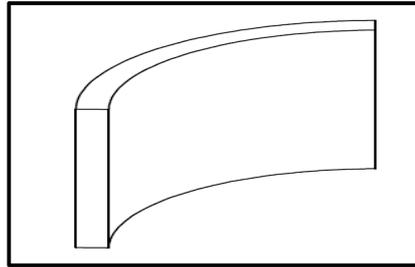
Se determina cada cilindro en función de la presión de alimentación, así como de la fuerza necesaria para empujar los envases, de igual manera se selecciona las electroválvulas de acuerdo al tipo y a la necesidad que tiene cada cilindro.

#### **3.4.1.1 Sistema de abastecimiento de botellas**

Es la primera parte de todo el sistema neumático, consta de un cilindro el cual es de simple efecto; ya que la salida del vástago empuja el envase al área de pesaje, a su vez al colocarse otro envase, la siguiente salida hace que la primera botella se coloque en la banda mientras que la segunda se ubica sobre la balanza. Por tanto el retorno del vástago no implica mayor consideración.

Para la acción de empuje se implementa en el vástago una pequeña placa de aluminio en forma de U para garantizar que el envase sea desplazado; por tanto se realiza su diseño CAD para determinar la masa de la misma entonces:

$$M_{placa1} = 9.80 \text{ g}$$



Fuente: Los autores

**Fig. 3.31** Placa en U para el cilindro de separación.

En este caso se utiliza la masa de la botella con arroz:

$$M_{barr} = 100 = 0.1 \text{ Kg}$$

Por lo tanto:

$$M_{total} = M_{placa} + M_{barr} \quad \text{Ecuación [3-43]}$$

$$M_{total_1} = 0.0098 + 0.1 = 0.1098 \text{ Kg}$$

$$F_{total} = M_{total} * g \quad \text{Ecuación [3-44]}$$

$$F_{total_1} = 0.1098 \text{ Kg} * 9.81 \frac{m}{s^2}$$

$$F_{total_1} = 1.077 \text{ N}$$

Donde:

$M_{total_1}$  = Masa total a empujar por el cilindro de ingreso

$F_{total_1}$  = Fuerza mínima requerida para el cilindro de ingreso

El cilindro tiene una carrera de 75 mm, esta distancia permite que los envases se coloquen tanto sobre la balanza así como sobre la banda transportadora.

Con la fuerza mínima se determina el diámetro necesario del cilindro.

$$F = P * \frac{\pi * D^2}{4} \quad \text{Ecuación [3-45]}$$

Donde:

$P$  = Presión de alimentación

$D$  = Diámetro del cilindro

Despejando el diámetro de la ecuación [3-45] se tiene:

$$D = \sqrt{\frac{4 * F}{\pi * P}} \quad \text{Ecuación [3-46]}$$

$$D = \sqrt{\frac{4 * 1.077 \text{ N}}{\pi * \left(4 * 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right)}}$$

$$D_1 = 1.852 * 10^{-3} \text{ m} = 1.852 \text{ mm}$$

Donde:

$D_1$  = Diámetro del cilindro de ingreso

Debido a que el diámetro requerido es pequeño, se selecciona el cilindro en base a la carrera necesaria; por lo tanto en el anexo 3-6 se encuentra el

catálogo de cilindros apropiados que pueden cumplir la función establecida.

Entonces:

**Tabla 3.15** Características del cilindro seleccionado para el abastecimiento.

| Tamaño de diámetro (mm) | Vástago de diámetro (mm) | Tipo de acción                | Presión de operación (MPa) | Empuje del cilindro (N) | Estándar de carrera (mm) |
|-------------------------|--------------------------|-------------------------------|----------------------------|-------------------------|--------------------------|
| 16                      | 6                        | Tipo de simple efecto-empujar | 0.4                        | 54.8                    | 75                       |

Fuente: Catálogo Cilindro mini acero inoxidable Serie MI, AIRTAC

Se determina la fuerza teórica del pistón  $Ft$  considerando también la fuerza que provoca el muelle la cual está entre el 3% y el 10% de la fuerza teórica (Creu2, 2011), en donde se toma el 10% como el valor más crítico; con el objetivo de verificar si es mayor a la fuerza mínima requerida.

$$Ft = P * \frac{\pi * D^2}{4} - 0.1 * P * \frac{\pi * D^2}{4} \quad \text{Ecuación [3-47]}$$

$$Ft_1 = 400000 \frac{N}{m^2} * \frac{\pi * (0.016 m)^2}{4} - 0.1 * 400000 \frac{N}{m^2} * \frac{\pi * (0.016 m)^2}{4}$$

$$Ft_1 = 80.425 - 8.042 N$$

$$Ft_1 = 72.383 N$$

La fuerza nominal a 4 Bar de acuerdo a catálogo es 54.8 N, como la fuerza nominal del pistón es mayor a la fuerza mínima requerida se toma este cilindro para ser utilizado.

Al ser un cilindro de simple efecto el consumo de aire se determina en base al volumen por ciclo de trabajo, el cual está dado por el volumen de salida  $V_s$ .

$$V_s = \frac{\pi * D^2}{4} * S \quad \text{Ecuación [3-48]}$$

$$V_{s_1} = \frac{\pi * (1.6 \text{ cm})^2}{4} * 7.5 \text{ cm} = 15.079 \text{ cm}^3$$

Donde:

$S$ = Carrera del cilindro

$V_{s_1}$ = Volumen de salida del cilindro de alimentación

Para calcular los ciclos de ida y vuelta durante un minuto  $n$ , se establece que un envase es empujado cada 7 segundos, por lo tanto:

$$n = \frac{t_{ev}}{t_{ac}} \quad \text{Ecuación [3-49]}$$

Donde:

$t_{ev}$ = Tiempo de evaluación

$t_{ac}$ = Tiempo de accionamiento del cilindro

$$n_1 = \frac{60 \text{ s}}{7 \text{ s}} = 8.57 \frac{\text{ciclos}}{\text{min}}$$

El volumen de consumo  $V_c$  viene dado por:

$$V_c = n * V_s \quad \text{Ecuación [3-50]}$$

$$V_{c_1} = 8.57 \frac{\text{ciclos}}{\text{min}} * 15.079 \text{ cm}^3 = 129.23 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}}$$

Entonces el consumo del cilindro  $Q$  está dado según el principio de la Ley de Boyle (Millan, 1995, p. 109), por lo tanto:

$$Q = P_{abs} * Vc \quad \text{Ecuación [3-51]}$$

$$Q = (P + 1) * Vc \quad \text{Ecuación [3-52]}$$

$$Q_1 = (4 + 1) * 129.23 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}}$$

$$Q_1 = 646.15 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}} = 0.646 \frac{\text{Nl}}{\text{min}}$$

Donde:

$P_{abs}$  = Presión absoluta

$Q_1$  = Consumo del cilindro de abastecimiento

Las unidades de litros normales ( $Nl$ ) son consideradas a condiciones normales de operación. También es importante analizar el consumo que se produce en las mangueras de conexión de los elementos neumáticos. Todo el sistema neumático está interconectado con manguera de  $\frac{1}{4}$  plg; por lo tanto el volumen de la manguera es:

$$V = L_p * A_m \quad \text{Ecuación [3-53]}$$

Donde:

$V$  = Volumen de la manguera

$L_p$  = Longitud promedio

$A_m$  = Área transversal de la manguera

$$V_{m1} = 30 \text{ cm} * \frac{\pi * (0.64 \text{ cm})^2}{4} = 9.651 \text{ cm}^3$$

El consumo de la manguera del cilindro de abastecimiento está dado por la ecuación [3-50] y [3-52]:

$$V_{c_{m1}} = 8.57 * 9.651 = 82.709 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}}$$

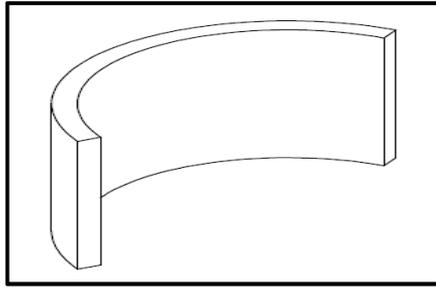
$$Q_{m1} = (4 + 1) * 82.709 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}} = 413.55 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}} = 0.414 \frac{\text{Nl}}{\text{min}}$$

#### 3.4.1.2 Sistema de separación de botellas

La segunda parte del sistema neumático consta de un cilindro también de simple efecto, el cual permite retirar de la banda transportadora los envases que no cumplan con el control de calidad.

A este cilindro se implementa también una placa en forma de U que permita empujar el envase sin que la banda se detenga. De igual forma con la ayuda de su diseño CAD se obtiene la masa, la cual es:

$$M_{placa2} = 26.53 \text{ g}$$



Fuente: Los autores

**Fig. 3.32** Placa en U para el cilindro de sujeción.

La masa total para el cilindro es:

$$M_{total_2} = 0.02653 + 0.1 = 0.127 \text{ Kg}$$

Mediante la ecuación [3-44] la fuerza mínima requerida es:

$$F_{total_2} = 0.116 \text{ Kg} * 9.81 \frac{m}{s^2}$$

$$F_{total_2} = 1.246 \text{ N}$$

Se necesita que el cilindro tenga una carrera de 100 mm, con la finalidad de garantizar que el envase sea retirado completamente de la banda y no exista colisión con los siguientes envases. Mediante la ecuación [3-46] se obtiene el diámetro necesario del cilindro.

$$D = \sqrt{\frac{4 * 1.246 \text{ N}}{\pi * \left(4 * 10^5 \frac{N}{m^2}\right)}}$$

$$D_2 = 1.992 * 10^{-3} m = 1.992 \text{ mm}$$

En este caso el resultado del diámetro resulta muy pequeño; de igual manera se selecciona el cilindro en base a la carrera necesaria; por lo tanto en el anexo 3-6 se encuentra el catálogo de cilindros apropiados que pueden cumplir la función de separación. Por lo tanto:

**Tabla 3.16** Características del cilindro seleccionado para la separación.

| Tamaño de diámetro (mm) | Vástago de diámetro (mm) | Tipo de acción                | Presión de operación (MPa) | Empuje del cilindro (N) | Estándar de carrera (mm) |
|-------------------------|--------------------------|-------------------------------|----------------------------|-------------------------|--------------------------|
| 16                      | 6                        | Tipo de simple efecto-empujar | 0.4                        | 54.8                    | 100                      |

Fuente: Catálogo Cilindro mini acero inoxidable Serie MI, AIRTAC

Con la ecuación [3-47] la fuerza teórica del pistón de separación es:

$$F_{t_2} = 400000 \frac{N}{m^2} * \frac{\pi * (0.016 m)^2}{4} - 0.1 * 400000 \frac{N}{m^2} * \frac{\pi * (0.016 m)^2}{4}$$

$$F_{t_2} = 80.425 - 8.042 N$$

$$F_{t_2} = 72.383 N$$

A 4 Bar de alimentación la fuerza nominal de acuerdo al catálogo es 54.8 N. Como esta fuerza es mayor a la fuerza que oponen los elementos a ser trasladados se toma este pistón para ser utilizado en el área de separación.

También es un cilindro de simple efecto, es decir el consumo de aire se determina en base al volumen por ciclo de trabajo, el cual está dado por el volumen de salida que se determina con la ecuación [3-48].

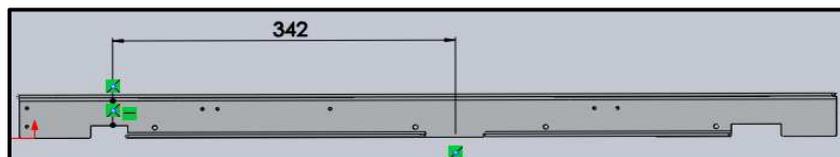
$$V_{S_2} = \frac{\pi * (1.6 \text{ cm})^2}{4} * 10 \text{ cm}$$

$$V_{S_2} = 20.11 \text{ cm}^3$$

Donde:

$V_{S_2}$  = Volumen de salida del cilindro de separación

El ciclo de trabajo se establece de acuerdo al máximo funcionamiento del cilindro, es decir en el caso que dentro de un minuto todos los envases son retirados, y a la distancia que existe desde la entrada en la banda hasta la posición a la cual está el cilindro en el sistema.



Fuente: Los autores

**Fig. 3.33** Distancia desde la entrada en la banda hasta el cilindro.

Se determina el tiempo que le toma al envase llegar hasta el pistón de separación.

$$t_{ciclo} = \frac{d_s}{v_b} \quad \text{Ecuación [3-54]}$$

Donde:

$t_{ciclo}$  = Tiempo de ciclo

$d_s$  = Distancia desde la entrada en la banda hasta el cilindro

$$tciclo_2 = \frac{34.2 \text{ cm}}{6 \frac{\text{cm}}{\text{s}}} = 5.7 \text{ s}$$

$tciclo_2$  = Tiempo de ciclo del cilindro de separación

Los ciclos del cilindro son:

$$n_2 = \frac{60 \text{ s}}{5.7 \text{ s}}$$

$$n_2 = 10.53 \frac{\text{ciclos}}{\text{min}}$$

Finalmente se determina el volumen de consumo y el consumo que tiene el cilindro analizado a través de las ecuaciones [3-50] y [3-52] respectivamente.

$$Vc_2 = 10.53 \frac{\text{ciclos}}{\text{min}} * 20.1 \text{ cm}^3$$

$$Vc_2 = 211.65 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}}$$

De esta manera el consumo es:

$$Q_2 = (4 + 1) * 211.65 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}}$$

$$Q_2 = 1058.3 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}} = 1.058 \frac{\text{Nl}}{\text{min}}$$

Para el análisis del consumo de aire en la manguera del cilindro de separación, se obtiene el volumen de la misma.

$$V_{m2} = 52 \text{ cm} * \frac{\pi * (0.64 \text{ cm})^2}{4} = 16.728 \text{ cm}^3$$

El consumo de la manguera del cilindro de separación está dado por las ecuaciones [3-50] y [3-52]:

$$V_{C_{m2}} = 10.53 * 16.728 = 176.15 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}}$$

$$Q_{m2} = (4 + 1) * 176.15 = 880.75 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}} = 0.881 \frac{\text{Nl}}{\text{min}}$$

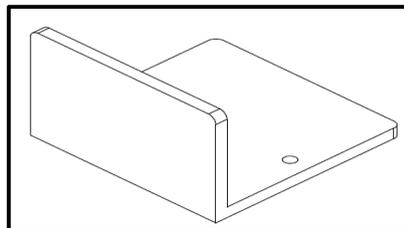
### 3.4.1.3 Sistema del proceso de tapado de botellas

La tercera parte del sistema neumático consta de dos cilindros, uno de simple efecto para la sujeción del envase y otro de doble efecto para el roscado de la tapa.

- Cilindro de sujeción

Para su propósito este cilindro necesita una placa tipo L, con la finalidad de empujar y sostener el envase para la etapa de roscado, entonces:

$$M_{placa3} = 30.87 \text{ g}$$



Fuente: Los autores

**Fig. 3.34** Placa para el cilindro de separación.

La masa total  $M_{total_3}$  para el cilindro es:

$$M_{total_3} = 0.0309 + 0.1 = 0.131 \text{ Kg}$$

La fuerza mínima requerida para el cilindro es:

$$F_{total_3} = 0.131 \text{ Kg} * 9.81 \frac{m}{s^2}$$

$$F_{total_3} = 1.285 \text{ N}$$

El cilindro necesita una carrera de 50 mm, para de esta manera mantener al envase sujeto mientras la tapa es roscada. Se obtiene el diámetro necesario del cilindro.

$$D = \sqrt{\frac{4 * 1.285 \text{ N}}{\pi * \left(4 \times 10^5 \frac{N}{m^2}\right)}}$$

$$D_3 = 2.022 \times 10^{-3} m = 2.022 \text{ mm}$$

De igual manera del diámetro resulta pequeño; y también se selecciona el cilindro en base a la carrera necesaria.

**Tabla 3.17** Características del cilindro seleccionado para la sujeción.

| Tamaño de diámetro (mm) | Vástago de diámetro (mm) | Tipo de acción                | Presión de operación (MPa) | Empuje del cilindro (N) | Estándar de carrera (mm) |
|-------------------------|--------------------------|-------------------------------|----------------------------|-------------------------|--------------------------|
| 16                      | 6                        | Tipo de simple efecto-empujar | 0.4                        | 54.8                    | 50                       |

Fuente: Catálogo Cilindro mini acero inoxidable Serie MI, AIRTAC

Se obtiene la fuerza teórica del cilindro:

$$F_{t_3} = 400000 \frac{N}{m^2} * \frac{\pi * (0.016 m)^2}{4} - 0.1 * 400000 \frac{N}{m^2} * \frac{\pi * (0.016 m)^2}{4}$$

$$F_{t_3} = 80.425 - 8.042 N$$

$$F_{t_3} = 72.383 N$$

A 4 Bar de alimentación la fuerza nominal de acuerdo al catálogo es 54.8 N. Como esta fuerza es mayor a la fuerza que oponen los elementos a ser trasladados se toma este pistón para ser utilizado.

Como es de simple efecto el consumo de aire se determina en base al volumen por ciclo de trabajo, el cual está dado por el volumen de salida del vástago, entonces se tiene:

$$V_{S_3} = \frac{\pi * (1.6 cm)^2}{4} * 5 cm$$

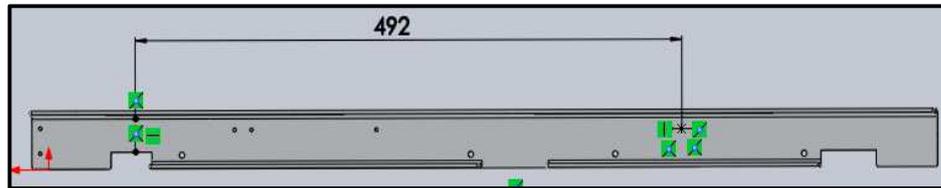
$$V_{S_3} = 10.053 cm^3$$

Donde:

$V_{S_3}$  = Volumen de salida del cilindro de sujeción

También el ciclo de trabajo se establece de acuerdo al máximo funcionamiento del cilindro, considerando que en un minuto todos los envases llegan a la etapa de sujeción.

Por tanto se toma en cuenta la distancia que existe desde la entrada en la banda hasta la posición del cilindro.



Fuente: Los autores

**Fig. 3.35** Distancia desde la entrada en la banda hasta el cilindro de sujeción.

Se determina el tiempo que le toma al envase llegar hasta el pistón de separación, entonces:

$$tciclo_3 = \frac{49.2 \text{ cm}}{6 \frac{\text{cm}}{\text{s}}} = 8.2 \text{ s}$$

$tciclo_3$  = Tiempo de ciclo del cilindro de sujeción

Los ciclos del cilindro son:

$$n_3 = \frac{60 \text{ s}}{8.2 \text{ s}}$$

$$n_3 = 7.32 \frac{\text{ciclos}}{\text{min}}$$

De igual manera se obtiene el volumen de consumo y el consumo que tiene el cilindro.

$$Vc_3 = 7.32 \frac{\text{ciclos}}{\text{min}} * 10.053 \text{ cm}^3$$

$$V_{c_3} = 73.588 \frac{cm^3}{min}$$

El consumo es:

$$Q_3 = (4 + 1) * 73.588 \frac{cm^3}{min}$$

$$Q_3 = 367.94 \frac{cm^3}{min} = 0.368 \frac{Nl}{min}$$

Analizando el consumo de aire en la manguera del cilindro de sujeción se tiene:

$$V_{m_3} = 110 \text{ cm} * \frac{\pi * (0.64 \text{ cm})^2}{4} = 35.387 \text{ cm}^3$$

Así mismo se calcula el consumo de la manguera que se utiliza en el cilindro de sujeción.

$$V_{c_{m_3}} = 7.32 * 35.387 = 259.03 \frac{cm^3}{min}$$

$$Q_{m_3} = (4 + 1) * 259.03 = 1295.16 \frac{cm^3}{min} = 1.295 \frac{Nl}{min}$$

- Cilindro de roscado

El cilindro se encuentra en posición vertical frente al cilindro de sujeción, para roscar la tapa sobre el envase con la ayuda de un motor eléctrico D.C. acoplado al vástago del mismo.

La selección del motor se realiza en base al torque que se necesita para obtener un ajuste correcto de la tapa; para lo cual se utiliza un torquímetro, y de manera experimental con la ayuda de un acople (tuerca) adherido sobre la tapa determinar el valor aproximado de dicho torque.



Fuente: Los autores

**Fig. 3.36** Elementos utilizados para determinar el torque de ajuste.

Con la ayuda de una entenalla para sostener al envase se procede a realizar varias pruebas experimentales con las cuales se puede verificar el valor del torque, el cual resulta menor al valor mínimo de la escala del torquímetro utilizado que es de 1 Kg-m.



Fuente: Los autores

**Fig. 3.37** Proceso experimental para determinar el torque.

Por tanto al ser necesario un torque pequeño se implementa un servomotor truncado, es decir que el eje puede girar libremente 360° como un motor DC; además tiene implementado un accesorio de caucho para de esta manera tener mayor adherencia entre la tapa que se ubica sobre el envase y el motor al momento del roscado. El servomotor seleccionado presenta las siguientes características:

*Voltaje de alimentación = 4.8 V - 6 V*

*Torque del motor = 0.198 Kg-m - 0.247 Kg-m*

*Peso del motor + acoples = 78 g*

*Modulación = Análoga*



Fuente: [http://www.servocity.com/html/hs-805bb\\_mega\\_power.html](http://www.servocity.com/html/hs-805bb_mega_power.html)

**Fig. 3.38** Servomotor HITEC HS-805 BB.

El peso que actúa en el vástago del cilindro se basa en el peso del motor, del accesorio de caucho y del acople de sujeción entre el motor y el cilindro.

$$W_{total_4} = 0.078 \text{ Kg} * 9.81 \frac{m}{s^2} = 0.765 \text{ N}$$

El cilindro con una carrera de 25 mm, es ideal para levantar y bajar el motor sin inconvenientes. Se obtiene el diámetro necesario del cilindro.

$$D = \sqrt{\frac{4 * 0.765 \text{ N}}{\pi * \left(4x10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right)}}$$

$$D_4 = 1.56x10^{-3} \text{ m} = 1.56 \text{ mm}$$

En el anexo 3-6 se encuentra el catálogo de cilindros que pueden cumplir la función de sostener, bajar y levantar el motor. Por lo tanto:

**Tabla 3.18** Características del cilindro seleccionado para el roscado.

| Tamaño de diámetro (mm) | Vástago de diámetro (mm) | Tipo de acción              | Presión de operación (MPa) | Empuje del cilindro (N) | Estándar de carrera (mm) |
|-------------------------|--------------------------|-----------------------------|----------------------------|-------------------------|--------------------------|
| 32                      | 12                       | Doble efecto empuje lateral | 0.4                        | 327.1                   | 25                       |

Fuente: Catálogo Cilindro mini acero inoxidable Serie MI, AIRTAC

La fuerza teórica del cilindro se la determina al considerar la fuerza de salida y la de entrada ya que en un cilindro de doble efecto.

Fuerza de salida:

$$F_{s_4} = 400000 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} * \frac{\pi * (0.032 \text{ m})^2}{4}$$

$$F_{s_4} = 321.69 \text{ N}$$

Fuerza de entrada:

$$F e_4 = P * \frac{\pi*(D^2-d^2)}{4} \quad \text{Ecuación [3-55]}$$

$$F e_4 = 400000 \frac{N}{m^2} * \frac{\pi * (0.032^2 - 0.012^2)m^2}{4}$$

$$F e_4 = 276.46 N$$

A 4 Bar de alimentación la fuerza nominal de acuerdo al catálogo es 327.1 N. Como esta fuerza es mayor al peso del motor eléctrico y sus componentes adicionales, se utiliza este cilindro para ser utilizado.

De igual manera para determinar el consumo del cilindro de doble efecto se toma en cuenta tanto el volumen de salida como de entrada.

Volumen de salida:

$$V_{S_4} = \frac{\pi * (3.2 \text{ cm})^2}{4} * 2.5 \text{ cm} = 20.106 \text{ cm}^3$$

Volumen de entrada:

$$V e_4 = \frac{\pi*(D^2-d^2)}{4} * S \quad \text{Ecuación [3-56]}$$

$$V e_4 = \frac{\pi * (3.2^2 - 1.2^2)cm^2}{4} * 2.5 \text{ cm} = 17.278 \text{ cm}^3$$

Volumen total en un ciclo:

$$V_{S_4} + V e_4 = 37.384 \text{ cm}^3$$

También el ciclo de trabajo se establece de acuerdo al máximo funcionamiento del cilindro, considerando que en un minuto todos los envases

llegan a la etapa de roscado; la distancia que existe desde la entrada en la banda hasta la posición del cilindro es la misma que la de sujeción, entonces:

$$n_4 = 7.32 \frac{\text{ciclos}}{\text{min}}$$

De igual manera se obtiene el volumen de consumo y el consumo que tiene el cilindro de doble efecto.

$$V_{c_4} = 7.32 \frac{\text{ciclos}}{\text{min}} * 37.384 \text{ cm}^3$$

$$V_{c_4} = 273.65 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}}$$

$$Q_4 = (4 + 1) * 273.65 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}}$$

$$Q_4 = 1368.25 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}} = 1.368 \frac{\text{NI}}{\text{min}}$$

Analizando el consumo de aire en las mangueras del cilindro de roscado se tiene:

$$V_{ms4} = 78 \text{ cm} * \frac{\pi * (0.64 \text{ cm})^2}{4} = 25.093 \text{ cm}^3$$

$$V_{me4} = 80 \text{ cm} * \frac{\pi * (0.64 \text{ cm})^2}{4} = 25.736 \text{ cm}^3$$

Donde:

$V_{ms4}$  = Volumen de consumo de salida del cilindro de roscado

$V_{me4}$  = Volumen de consumo de entrada del cilindro de roscado

El volumen total de consumo es:

$$V_{ms4} + V_{me4} = (25.093 + 25.736) \text{ cm}^3 = 50.829 \text{ cm}^3$$

Igualmente se determina el consumo de la manguera del cilindro de roscado.

$$V_{cm4} = 7.32 * 50.829 = 372.07 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}}$$

$$Q_{m4} = (4 + 1) * 372.07 = 1860.35 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}} = 1.860 \frac{\text{Nl}}{\text{min}}$$

Por lo tanto el consumo total de aire en el sistema neumático es:

$$Q_t = Q_1 + Q_{m1} + Q_2 + Q_{m2} + Q_3 + Q_{m3} + Q_4 + Q_{m4} \text{ Ecuación [3-57]}$$

$$Q_t = (0.646 + 0.414 + 1.058 + 0.881 + 0.368 + 1.295 + 1.368 + 1.860) \frac{\text{Nl}}{\text{min}}$$

$$Q_t = 7.89 \frac{\text{Nl}}{\text{min}}$$

La etapa de roscado también necesita una mesa de apoyo para el cilindro de doble efecto, por lo cual se utiliza hierro forjado AISI 304 (Módulo elástico = 190000 MPa, Resistencia a la fluencia = 205.8 MPa), para su construcción. Así también se determina si la carga que soporta dicha columna es la adecuada.

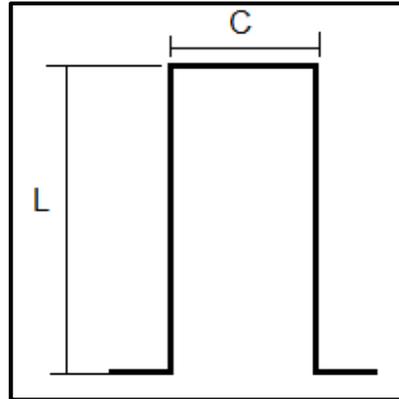
Datos de la columna para la etapa de roscado:

$$L = 255 \text{ mm}$$

$C = 78 \text{ mm}$  (Longitud de la base para el cilindro de roscado)

$\text{espesor} = 3 \text{ mm}$

$\text{ancho} = 47 \text{ mm}$



Fuente: Los autores

**Fig. 3.39** Vista lateral de la mesa de la etapa de roscado.

Por cuestiones de diseño se considera como un caso de columna de extremo libre – empotrada para determinar la resistencia de dichas columnas, tomando en cuenta que por la parte inferior los apoyos están sujetos en los perfiles de la estructura y en la superior se encuentra tanto el cilindro como el motor de roscado; la longitud efectiva  $K$  es 2.1 para casos prácticos.

En función a la figura 3.30 se determina el radio de giro respecto al eje  $Y$  utilizando la ecuación [3-37]:

$$r_y = \frac{3 \text{ mm}}{\sqrt{12}} = 0.866 \text{ mm}$$

Así también se calcula la relación de esbeltez así como la relación de esbeltez de transición utilizando las ecuaciones [3-38] y [3-39]:

$$Re = \frac{2.1 * 255 \text{ mm}}{0.866 \text{ mm}}$$

$$Re = 618.36$$

$$Cc = \sqrt{\frac{2 * \pi^2 * 190000 \text{ MPa}}{205.8 \text{ MPa}}}$$

$$Cc = 134.995$$

Como la relación de esbeltez es mayor a la relación de esbeltez de transición se considera una columna larga por tanto se aplica la fórmula de Euler [3-40]:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 * 190000 \text{ MPa} * (3 \times 10^{-3} \text{ m} * 47 \times 10^{-3} \text{ m})}{\left(\frac{2.1 * 0.255 \text{ m}}{0.866 \times 10^{-3} \text{ m}}\right)^2}$$

$$P_{cr} = 0.691 \times 10^{-3} \text{ MN}$$

$$P_{cr} = 691.495 \text{ N}$$

Tomando en cuenta que la mesa del pistón tiene dos apoyos se determina la carga admisible.

$$P_{adm} = \frac{P_{cr}}{2} = 345.748 \text{ N}$$

El peso a colocar sobre la columna es:

$$W_{total_r} = W_{c_r} + W_{m_r} + F_{s_4} \quad \text{Ecuación [3-58]}$$

Donde:

$W_{total_r}$  = Peso total sobre la columna de la etapa de roscado

$W_{c_r}$  = Peso del cilindro de roscado

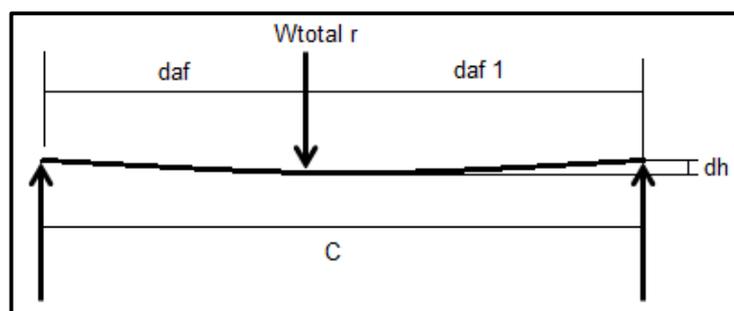
$W_{m_r}$  = Peso del motor de rosado

$$W_{total_r} = 5.917 \text{ N} + 0.765 \text{ N} + 327.1 \text{ N}$$

$$W_{total_r} = 333.78 \text{ N}$$

Por lo tanto para este caso el hierro forjado es adecuado como material para la columna, ya que el peso total sobre la columna de la etapa de roscado es menor a la carga admisible  $W_{total_r} < P_{adm}$ .

Se analiza el lado C de la figura 3.38 como una viga de apoyos simples y de carga intermedia para determinar la deformación que se genera a causa del peso  $W_{total_r}$ , entonces:



Fuente: Los autores

**Fig. 3.40** Diagrama de análisis de la parte superior de la columna.

$$dh = \frac{-W_{total} * d_{af} * d_{af_1} * (C + d_{af_1}) * \sqrt{3 * d_{af} * (C + d_{af_1})}}{27 * E * I_{psc} * C} \text{ Ecuación [3-59]}$$

$d_{af}$  = Distancia de aplicación de la fuerza

$d_{af_1}$  = Distancia de complemento de aplicación de la fuerza

$dh$  = Desplazamiento vertical

$I_{psc}$  = Inercia de la parte superior de las columnas

$$dh = \frac{-333.78 \text{ N} * 0.045 * 0.028 * (0.073 + 0.028) * \sqrt{3 * 0.045 * (0.073 + 0.028)}}{27 * 1.9 \times 10^{11} \frac{\text{N}}{\text{m}^2} * \frac{0.047 \text{ m} * (3 \times 10^{-3} \text{ m})^3}{12} * 0.073 \text{ m}}$$

$$dh = -0.125 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$dh = -0.125 \text{ mm}$$

Por lo tanto se determina que sobre la mesa del pistón no se produce ningún problema por deformación, por lo que puede ser utilizada durante el proceso de roscado.

### 3.4.2 SELECCIÓN DE COMPONENTES ADICIONALES

#### 3.4.2.1 Electroválvulas

Para el accionamiento de los cilindros neumáticos se implementan electroválvulas, que controlan el flujo de aire tanto para la salida como para el ingreso del vástago según sea el caso.

De esta manera para los cilindros de simple efecto se utiliza electroválvulas 3/2 monoestables, ya que no se requiere controlar el retorno del vástago en los cilindros de ingreso, de separación y sujeción. Se utiliza 3 de estos elementos con las siguientes características:

**Tabla 3.19** Datos técnicos de la electroválvula monoestable.

| Tamaño de conexión | Número de bobinas | Número de posiciones  | Rango de presión (KPa) | Voltaje de alimentación      |
|--------------------|-------------------|-----------------------|------------------------|------------------------------|
| 1/8 "              | Uno               | 3vías-<br>2posiciones | 101.3 – 965.3          | DC 24V<br>AC 110V<br>AC 120V |

Fuente: Catálogo Válvulas direccionales neumáticas, Chelic

Mientras que para el cilindro de doble efecto de preferencia se utiliza una electroválvula 5/2 biestable, con la finalidad de tener mayor control sobre dicho cilindro al momento de bajar y levantar el motor de roscado.

La electroválvula tiene las siguientes características:

**Tabla 3.20** Datos técnicos de la electroválvula biestable.

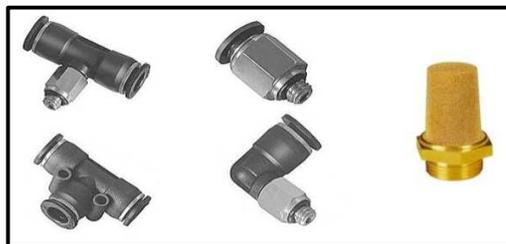
| Tamaño de conexión | Número de bobinas | Número de posiciones  | Rango de presión (KPa) | Voltaje de alimentación      |
|--------------------|-------------------|-----------------------|------------------------|------------------------------|
| 1/4 "              | Doble             | 5vías-<br>2posiciones | 101.3 –<br>965.3       | DC 24V<br>AC 110V<br>AC 120V |

Fuente: Catálogo Válvulas direccionales neumáticas, Chelic

### 3.4.2.2 Racores y Silenciadores

Así también para la conexión entre los elementos neumáticos y la manguera de suministro se utiliza racores tipo recto y de codo.

De igual manera silenciadores de  $\frac{1}{8}$  plg para reducir el ruido al momento de la circulación del aire por medio de las electroválvulas.

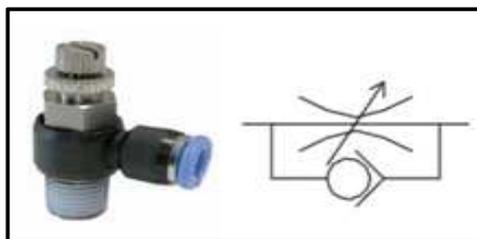


Fuente: <http://news.directindustry.es/press/pneuflex-pneumatic-co-ltd/racores-rapidos-aire-racores-neumaticos-68892-387511.html>, Racores rápidos para aire, Español.

**Fig. 3.41** Racores y silenciador utilizados.

### 3.4.2.3 Regulador de Caudal

Se implementa un regulador de  $\frac{1}{8}$  plg a la salida del cilindro de doble efecto con la finalidad de controlar que el motor de roscado acoplado al vástago no descienda bruscamente.



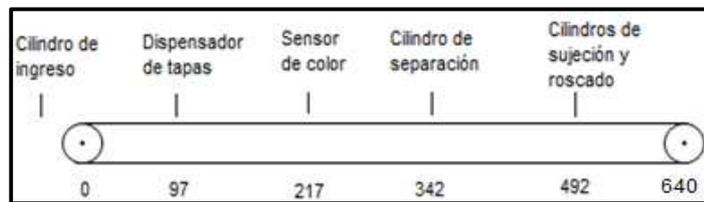
Fuente: <http://www.acfluid.es/productos.php?ct=90&sct=98>, Racordaje y conexión neumática, Español

**Fig. 3.42** Regulador de caudal y símbolo.

### 3.4.3 DIAGRAMA FASE - TIEMPO

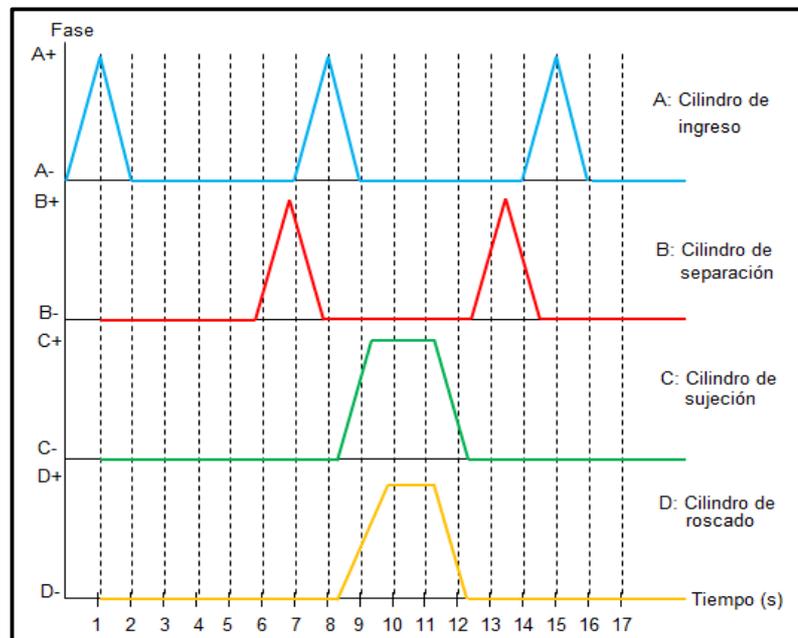
En función a la posición de algunos elementos sobre la banda transportadora, así como de la velocidad lineal aproximada de  $v_b = 6 \frac{cm}{s}$ .

Se determina el tiempo empleado por los envases para llegar hasta dichos elementos y de esta manera obtener el diagrama fase-tiempo de los cilindros neumáticos que actúan durante el proceso.



Fuente: Los autores

**Fig. 3.43** Ubicación en mm de elementos respecto al rodillo 1 de la banda.



Fuente: Los autores

**Fig. 3.44** Diagrama fase – tiempo de los cilindros involucrados.

El diagrama muestra el funcionamiento continuo de todo el conjunto de cilindros neumáticos, en donde se indica que cada siete segundos se coloca un envase sobre la cinta transportadora mediante el cilindro de ingreso; excepto cuando uno llega a la etapa de roscado entonces el siguiente envase entra catorce segundos después hasta que se estabilice la velocidad de la banda transportadora. Mientras que el cilindro de separación entra en acción cuando el envase no cumple con la etapa de control de calidad.

Así también los cilindros de sujeción y roscado se activan al mismo tiempo en el caso de que se haya cumplido con dicho control; es decir que no pueden trabajar todos los cilindros para un solo envase.

Con el objetivo de garantizar una operación de funcionamiento eficiente de los pistones de separación y sujeción, los mismos son activados un segundo antes de que las botellas se coloquen frente a estos.

## CAPÍTULO 4

### DISEÑO ELÉCTRICO - ELECTRÓNICO

#### 4.1 SENSORES

Dentro del sistema eléctrico – electrónico se utiliza un número total de cuatro sensores, cada uno implementado para una función específica dentro de las diferentes etapas del sistema automático didáctico. Los cuales son:

##### 4.1.1 CELDA DE CARGA

Se implementa una celda de carga para obtener un medidor de peso (balanza) que permita determinar el peso que poseen los envases llenos de arroz en un rango de 0 a 150 gramos, colocados al inicio de todo el proceso.

La celda de carga es de tipo “Single Point” modelo “Dual-Beam” o de doble biga, las aplicaciones más comunes de este tipo de celda de carga son en balanzas de supermercado, contadoras, máquinas de embalaje, dosificadores etc.

Esta es una celda de carga en forma de paralelogramo que no detecta las cargas excéntricas debido a las características que presenta y que se muestran a continuación:



Fuente: [www.masoportunidades.com.ar/aviso/3874013-celda-de-carga-2mv-v-10kg-tede-huntleigh-model-1022-disponible-en-buenos-aires](http://www.masoportunidades.com.ar/aviso/3874013-celda-de-carga-2mv-v-10kg-tede-huntleigh-model-1022-disponible-en-buenos-aires), Celda de carga, Español.

**Fig. 4.1** Celda de carga “Single Point Dual-Beam”.

Especificaciones:

**Tabla 4.1** Tabla de especificaciones generales de la celda de carga.

| ESPECIFICACIONES GENERALES                |          |
|---|----------|
| Tensión máxima en V                       | 10V      |
| Capacidad en Gr                           | 500      |
| Sensibilidad mV/V                         | 2+/-10%  |
| Rango de funcionamiento de temperatura °C | -10 a 40 |
| Balance de cero %                         | +/-1     |
| Alinealidad %                             | 0.03     |
| Histéresis %                              | 0.02     |
| Repetibilidad %                           | 0.02     |
| Material Base                             | Aluminio |

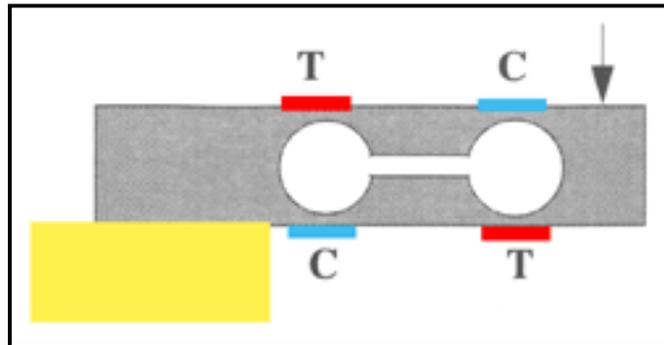
Fuente: Catalogo Ortega Precisiones

**Tabla 4.2** Código de colores de cables de celda de carga.

| CODIGO DE COLORES |                |
|-------------------|----------------|
| ROJO              | Señal (-)      |
| BLANCO            | Señal (+)      |
| AMARILLO          | Excitación (+) |
| VERDE             | Excitación (-) |

Fuente: Los autores

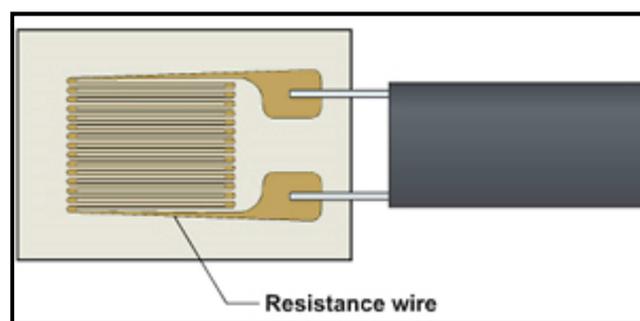
Una celda de carga basa su funcionamiento en cuatro galgas extensiométricas que en este caso están dispuestas de tal forma que dos se encuentran a tensión y las otras dos están a compresión como se puede ver en el siguiente gráfico:



Fuente: Instrumentación Mecatrónica 2, L. Echeverría, 2010, p. 27

**Fig. 4.2** Disposición de las galgas en la celda de carga.

Las galgas extensiométricas son básicamente unas resistencias variables, y esta variabilidad depende de la deformación que esta sufra, ya que esta tendrá la misma deformación de la base sobre la cual se encuentra.



Fuente: Instrumentación Mecatrónica 2, L. Echeverría, 2010, p. 22

**Fig. 4.3** Galga extensiométrica.

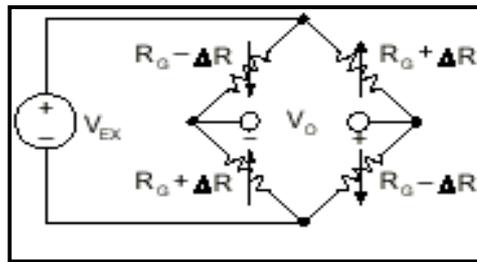
Variando la longitud del hilo metálico que conforma la galga y al mismo tiempo variando la resistencia eléctrica del hilo, ya que la resistencia es directamente proporcional a la longitud del hilo, esta consta de una base muy delgada no conductora y flexible en la cual se encuentran dos terminales que van conectadas al circuito de acondicionamiento.

Las características de las galgas extensiométricas son las siguientes:

- Anchura y Longitud
- Peso
- Tensión medible
- Temperatura de funcionamiento
- Resistencia de la galga
- Factor de galga
- Material de la base
- Factor de expansión lineal

Para realizar mediciones por medio de galgas, estas han sido montadas en un puente de Wheatstone, tiene tres tipos de configuraciones; con una sola galga, con dos galgas (medio puente) y con cuatro galgas (puente completo).

Esta última es la que se encuentra en la celda de carga que se implementa, se la representa gráficamente de la siguiente manera:



Fuente: [www.ni.com/white-paper/7130/es/](http://www.ni.com/white-paper/7130/es/), Como realizar una medición con galga extensiométrica, Español

**Fig. 4.4** Circuito de puente completo.

La celda de carga utiliza este tipo de configuración ya que posee una mayor sensibilidad y la capacidad de compensación del efecto de la temperatura sobre la medición que se está realizando. Este tipo de configuración responde a la siguiente ecuación:

$$\frac{V_o}{V_{EX}} = -GF * \varepsilon \quad \text{Ecuación [4-1]}$$

Dónde:

$V_o$  = Voltaje de salida del circuito de puente completo.

$V_{EX}$  = Voltaje de excitación del puente completo.

$G$  = Factor de galga.

$F$  = Fuerza aplicada a la celda de carga.

$\varepsilon$  = Cambio fraccional en longitud  $\frac{\Delta L}{L}$

La variación de voltaje que ocurre en el circuito del puente completo es muy pequeña por lo que es necesario acondicionarla por medio de un circuito electrónico.

#### 4.1.2 SENSORES MAGNÉTICOS Y ÓPTICOS

Los sensores de tipo magnético y tipo óptico son muy utilizados en los procesos industriales, desde los más sencillos a los más complejos, ya que son útiles en diferentes aspectos de cualquier proceso, los sensores magnéticos en la detección de finales de carrera de actuadores neumáticos, contaje, seguridad de máquinas, nivel de líquido, control de velocidad, y otras, además de su buen funcionamiento en condiciones extremas de elevada suciedad o en alto higiene para cumplir con procesos que así lo ameriten.



Fuente: [https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcS\\_ebRR8NZ6XQHKj2sjJROlb5F89x-TmeOxsDKXponUwhU2wAM3Dw](https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcS_ebRR8NZ6XQHKj2sjJROlb5F89x-TmeOxsDKXponUwhU2wAM3Dw)

**Fig. 4.5** Sensor magnético.

Este tipo de sensores se utiliza en casos donde no se puede realizar acercamientos precisos ya que los campos magnéticos producidos por el objeto a detectar que generalmente es un imán permanente, pueden atravesar

diversos materiales y detectarlo sin la necesidad de la exposición directa al objeto.

Los sensores magnéticos funcionan bajo el principio de detectar campos magnéticos producidos por los imanes o corrientes eléctricas, esto es realizado por medio del interruptor REED, que son un par de láminas metálicas de material ferromagnético encapsuladas, que en presencia de un campo magnético se atraen de esa forma cierran el circuito y detectan al objeto en cuestión, es muy útil para evitar el contacto físico de los elementos del proceso industrial.

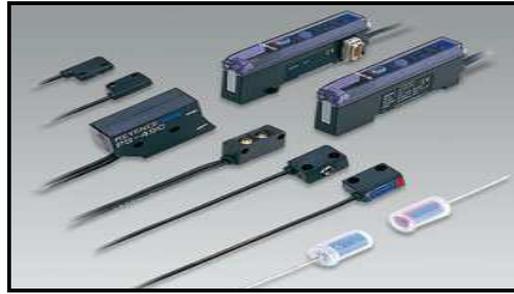


Fuente:

[http://recursostic.educacion.es/secundaria/edad/4esotecnologia/quincena11/index\\_4quincena11.htm](http://recursostic.educacion.es/secundaria/edad/4esotecnologia/quincena11/index_4quincena11.htm), Sensores magnéticos, Español

**Fig. 4.6** Interruptor REED.

Por otra parte los sensores ópticos son utilizados en la industria para la detección de todo tipo de materiales como por ejemplo cartón, plástico, vidrio, madera, líquidos además de detectar el color del material, pero existe una desventaja derivada de la brillantez que pueden tener ciertos objetos y que producen señales falsas en los sensores.



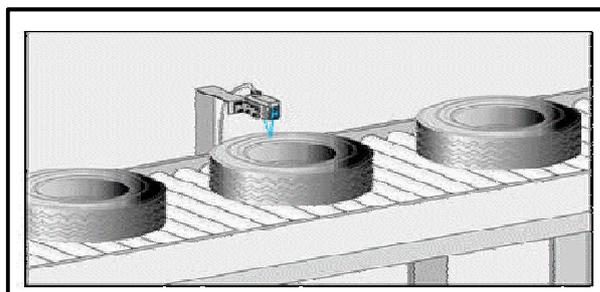
Fuente: [http://www.bitmakers.com/files/imagenes/630\\_fp\\_ps01.jpg](http://www.bitmakers.com/files/imagenes/630_fp_ps01.jpg)

**Fig. 4.7** Sensores ópticos.

En lo que tiene que ver a color es un aspecto muy utilizado en las industrias, el color de los materiales tienen una gran incidencia en la luz ya que un color blanco refleja la mayor cantidad que un objeto de color negro que en cambio absorbe casi toda la luz que recibe, con lo cual un sensor óptico puede diferenciar la cantidad de luz reflejada de acuerdo al color del objeto y así se determina de qué color es dicho objeto.

Los sensores ópticos se clasifican en tres grupos principales:

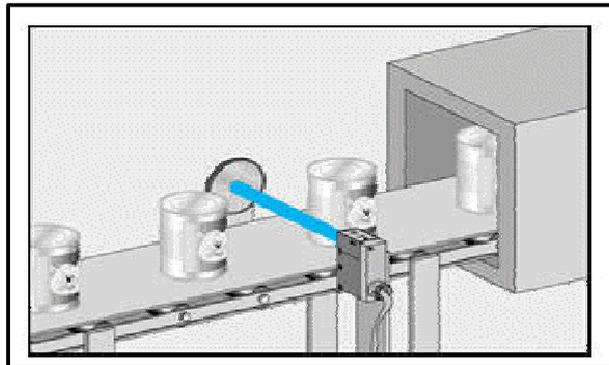
- **Sensores de reflexión directa:** Este tipo de sensores detectan la presencia en función de la luz reflejada sobre el objeto.



Fuente: <http://www.mescorza.com/neumatica/sensoresweb/>, Aplicaciones del detector óptico, Español.

**Fig. 4.8** Sensor de reflexión directa.

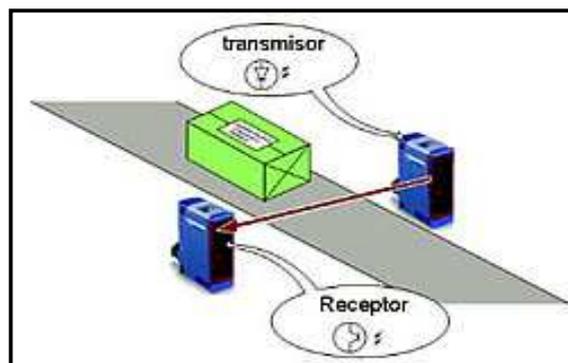
- **Sensores de reflexión mediante espejo:** Detectan continuamente un haz de luz reflejado en un espejo así al momento de que un objeto corte ese haz de luz este será detectado, es un proceso donde no influye el color del objeto.



Fuente: <http://www.mescorza.com/neumatica/sensoresweb/>, Aplicaciones del detector óptico, Español.

**Fig. 4.9** Sensor de reflexión mediante espejo.

- **Sensores de barrera:** Estos sensores están constituidos por un emisor y un receptor el cual detectará un objeto cuando este obstruya el haz de luz.



Fuente: <http://www.elec serrano.com.ar/schneider/sensor/optico>, Sensores, Español

**Fig. 4.10** Sensor óptico de barrera.

Como el principio de funcionamiento de los sensores ópticos es la detección de luz una de las principales desventajas es que pueden verse afectados por la luz ambiente, solar u otro tipo de fuentes.

Como se observa estos tipo de sensores son de gran importancia en la industria por lo que no podían faltar en un módulo didáctico como es este caso, en el cual se utiliza un detector magnético de final de carrera de un cilindro neumático.



Fuente: [http://www.sick.com/es/es-es/home/products/product\\_portfolio/industrial\\_sensors/PublishingImages/magnetische\\_zylindersensoren\\_namur\\_mz.jpg](http://www.sick.com/es/es-es/home/products/product_portfolio/industrial_sensors/PublishingImages/magnetische_zylindersensoren_namur_mz.jpg), Sensor intelligence, Inglés.

**Fig. 4.11** Sensor magnético para final de carrera de cilindro neumático.

Es un sensor que funciona con diferentes voltajes que van desde los 5V pasando por los 12V hasta llegar a los 24V que es lo que importa, para que con este nivel de voltaje sea detectable por parte del PLC, no necesita circuito de acondicionamiento, ya que va directamente conectado a las entradas del PLC, ya que su funcionamiento es el de un interruptor.

Para el caso del sensor óptico el objetivo es poder detectar dos tipos de colores de la superficie de las tapas de los frascos que se encuentran dentro del

proceso del módulo didáctico, para lo cual se optó por un sensor óptico de reflexión directa el TCRT 5000, como se observa en el siguiente gráfico:



Fuente: <http://www.tectronix.cl/sensor-optico-tcrt5000.html>, Sensor óptico IR TCRT 5000, Español

**Fig. 4.12** Sensor óptico de reflexión TCRT 5000.

**Tabla 4.3** Tabla de las principales características del sensor óptico.

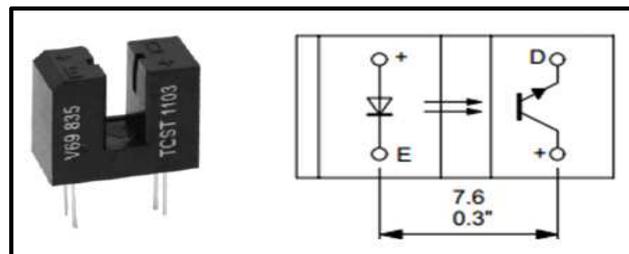
| Sensor óptico TCRT5000           |   |           |
|----------------------------------|---|-----------|
| Temperatura de operación °C      |   | -25 a +85 |
| Voltaje colector-emisor          | V | 70        |
| Distancia máxima de detección mm |   | 12        |
| Voltaje de retorno               | V | 5         |

Fuente: Datasheet Vishay TCRT5000.

Debido al bajo voltaje de retorno de este tipo de sensor la señal será acondicionada por medio de un circuito electrónico de amplificación para que de esa manera pueda entrar dentro de los rangos de funcionamiento del PLC, y este tipo de sensor sea detectado por el controlador.

Una de las aplicaciones de los sensores ópticos de barrera es el de contar pulsos, los cuales por medio de un tratamiento de dicha señal se puede traducirla a diferentes magnitudes, una de ellas la velocidad o más precisamente las revoluciones por minuto, para lo cual el módulo didáctico está

provisto de un contador de revoluciones en el que se implementa un sensor óptico foto-interruptor tipo slot, el TCST1103; es un sensor óptico con fototransistor de salida.



Fuente: [http://aliatron.pt/e-biz/product\\_info.php?cPath=30\\_187&products\\_id=884&osCsid=gtb3](http://aliatron.pt/e-biz/product_info.php?cPath=30_187&products_id=884&osCsid=gtb3), Sensor óptico tipo slot, portugués.

**Fig. 4.13** Sensor óptico tipo “slot” con fototransistor de salida TCST1103.

**Tabla 4.4** Tabla de las principales características del sensor óptico.

| Sensor óptico TCST1103             |          |                 |
|------------------------------------|----------|-----------------|
| <b>Temperatura de operación °C</b> |          | <b>&lt;= 25</b> |
| <b>Voltaje colector-emisor</b>     | <b>V</b> | <b>70</b>       |
| <b>Voltaje de retorno</b>          | <b>V</b> | <b>6</b>        |

Fuente: Datasheet VISHAY TCST1103.

Como en el primer sensor óptico debido al bajo voltaje de retorno de este tipo de sensor la señal será acondicionada por medio de un circuito electrónico de amplificación para de esa manera entrar dentro de los rangos de funcionamiento del PLC.

#### 4.1.3 MICROSWITCH

El microswitch o también comúnmente llamado “final de carrera” es un sensor de contacto, un dispositivo eléctrico que puede ser neumático o

mecánico, que se encuentra en la ruta de desplazamiento de algún dispositivo móvil como un cilindro neumático o una cinta transportadora como es en el caso del módulo didáctico.

Para que este pueda enviar una señal al controlador y cambie el estado y las condiciones de funcionamiento del módulo, internamente poseen interruptores normalmente abiertos (NO) y normalmente cerrados (NC) que conmutan al ser accionados.



Fuente: [www.alpha-crucis.com/es/botones/3963-omron-microswitch-5a-250v-3700386609138.html](http://www.alpha-crucis.com/es/botones/3963-omron-microswitch-5a-250v-3700386609138.html), Omron Microswitch, Español

**Fig. 4.14** Sensor de contacto mecánico (microswitch).

Este tipo de sensores están compuestos de dos partes principales, el cuerpo del sensor donde se encuentran los contactos y el detector o “cabeza”, es utilizado comúnmente en procesos rectilíneos o de desplazamiento fijo, existen en diferentes materiales tales como plástico, metal o fibra de vidrio.

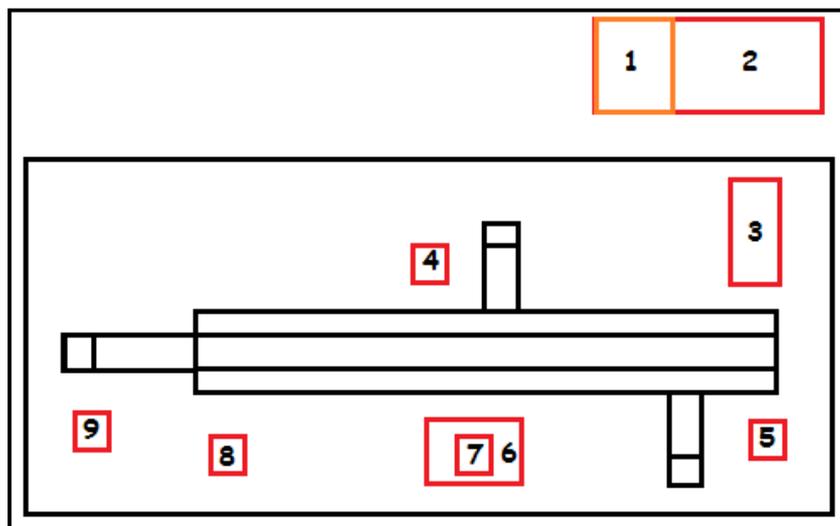
Es un dispositivo de fácil instalación, de elevada robustez, funciona a diferentes tensiones, pero tiene el inconveniente de producir rebotes en el

contacto y dar falsas señales esto si el proceso en el que se encuentren actuando es de alta velocidad.

Debido a sus ventajas anteriormente descritas y debido a que no está sometido a altas velocidades de accionamiento no necesita de circuito de acondicionamiento para funcionar con el controlador, solo es alimentado con 24V y conectado directamente a las entradas del PLC.

## 4.2 DIAGRAMA DEL CIRCUITO

En el siguiente diagrama de los circuitos que conforman el módulo didáctico, se muestra la ubicación de los 5 circuitos de acondicionamiento de los sensores que posee el sistema, un circuito de recolección de señales de entradas y salidas al controlador PLC, además del PLC y la fuente de voltaje con las diferentes tensiones necesarias para el funcionamiento del sistema.



Fuente: Los autores

**Fig. 4.15** Diagrama de distribución de los circuitos del módulo didáctico.

Descripción:

1. Fuente de voltaje, de 200 W con tensiones de 3, 5, 12, -12 voltios.
2. Controlador lógico programable (PLC), Siemens S7 1200.
3. Circuito de recolección de señales de entrada y salida provisto de un conector DB25.
4. Circuito de amplificación de señal de sensor óptico reflectivo.
5. Circuito de amplificación de contador de revoluciones que cuenta con un sensor óptico de barrera.
6. Circuito central de adquisición y muestra de señales digitales provistos por los sensores ópticos y analógica entregada por la celda de carga por medio de un PIC 16F877A, para tratamiento y posterior presentación en un LCD 2x16.
7. Circuito de filtraje de señal de celda de carga tipo Butterworth.
8. Circuito de control de velocidad del motor de la banda por ancho de pulso PWM.
9. Circuito de amplificación de señal de la celda de carga.

#### **4.2.1 CIRCUITO DE ACONDICIONAMIENTO DE LOS SENSORES**

Los circuitos de acondicionamiento de los sensores utilizados en el módulo, realizan funciones tales como amplificar estas señales a un rango en el que se puede apreciar su cambio en el tiempo, otra función de los circuitos de acondicionamiento es la de filtrar las señales para obtener una lectura sin

cambios bruscos de valor en la lectura de los sensores, esto debido a picos de corriente en el sistema.

#### 4.2.2 CIRCUITO DE AMPLIFICACIÓN DE LOS SENSORES

Debido a la naturaleza de fabricación de los sensores ópticos utilizados en el módulo didáctico, tanto el sensor reflectivo como el de barrera tienen un voltaje de retorno que oscila entre los 5 y 6 V, lo que para un controlador lógico programable (PLC) no es un rango de voltaje que pueda reconocer, ya que los rangos en los que trabaja en PLC están para un “cero” lógico de 0 a 15V y un “uno” lógico va desde los 15V a los 24V.

Para lo cual se utiliza un amplificador operacional muy comúnmente usado, el LM358, en configuración de “amplificador no inversor”, a continuación se observa las características principales del amplificador operacional:



Fuente: [https://encrypted-tbn2.gstatic.com/images?q=tbn:AND9GcTmd9\\_uyBDS6mWux5KJqYfAsKHi4k96QhZD6YUyPvyVo3va1eMj](https://encrypted-tbn2.gstatic.com/images?q=tbn:AND9GcTmd9_uyBDS6mWux5KJqYfAsKHi4k96QhZD6YUyPvyVo3va1eMj)

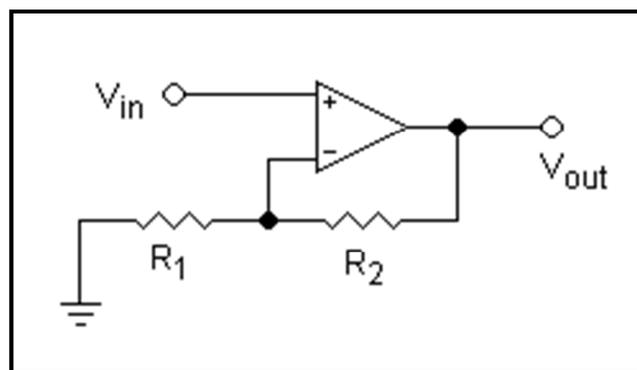
**Fig. 4.16** Amplificador operacional LM358.

**Tabla 4.5** Tabla de las principales características del amplificador operacional.

| Amplificador operacional LM358        |           |            |
|---------------------------------------|-----------|------------|
| <b>Temperatura de operación</b>       | <b>°C</b> | 0 a 70     |
| <b>Voltaje de alimentación</b>        | <b>V</b>  | +32        |
| <b>Voltaje de entrada</b>             | <b>V</b>  | -0.3 a +32 |
| <b>Voltaje diferencial de entrada</b> | <b>V</b>  | +32        |

Fuente: Datasheet ST LM358.

La configuración interna que presenta el amplificador no inversor es la siguiente:



Fuente: [http://es.wikipedia.org/wiki/Amplificador\\_operacional](http://es.wikipedia.org/wiki/Amplificador_operacional), Amplificador operacional, Español

**Fig. 4.17** Configuración de amplificador no inversor.

La característica principal de este tipo de configuración es que no invierte la señal como su nombre lo dice, la amplifica pero la mantiene con su signo, esta configuración responde a la siguiente ecuación:

$$V_{out} = V_{in} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \quad \text{Ecuación [4-2]}$$

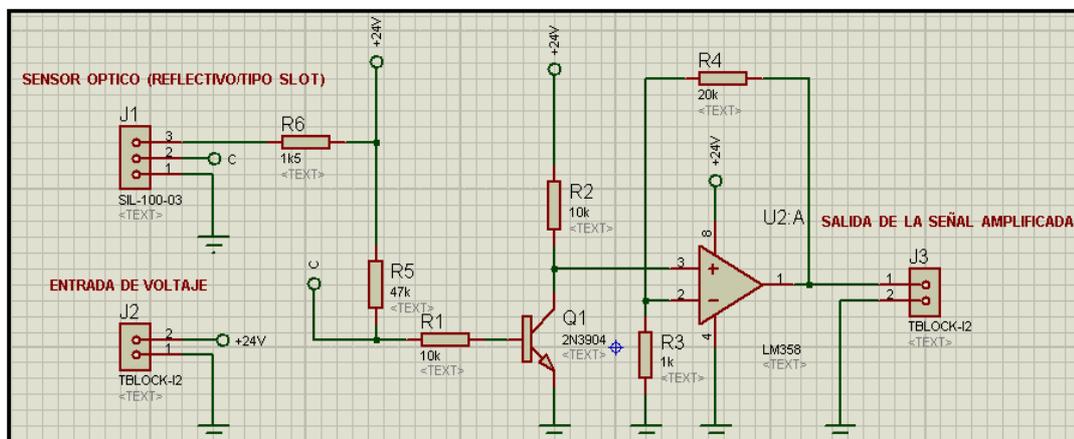
Dónde:

$V_{out}$ = Voltaje amplificado.

$V_{in}$ = Voltaje de entrada, proveniente del sensor.

R1, R2= Resistencias de la configuración amplificador no inversor.

Para obtener una señal amplificada que pueda detectar el control lógico programable se utiliza lo anteriormente expuesto en el circuito que se observa en la figura 4.16, el transistor que se encuentra en el circuito es para invertir la señal que el sensor proporciona para que al momento que este detecte colores claros por parte del sensor de reflexión y la detección del haz de luz para el sensor tipo “slot”, el circuito proporcione un “uno lógico” hacia el control.



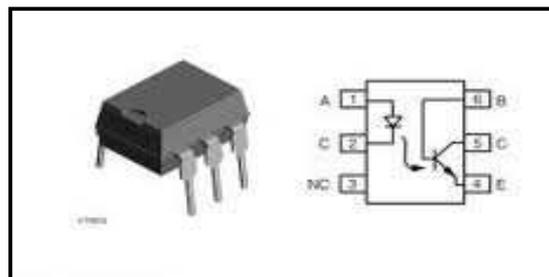
Fuente: Los autores

**Fig. 4.18** Circuito de acondicionamiento de señal de los sensores ópticos (de reflexión y tipo “slot”).

#### 4.2.3 CIRCUITO DE CONTROL DEL MOTOR DE LA BANDA

Uno de los objetivos del módulo didáctico es permitir al estudiante que utilice la capacidad que posee de realizar un control de velocidad al motor de la

banda transportadora, por medio de la modulación del ancho de pulso PWM, ya que el motor es de corriente directa de consumo de amperaje de aproximadamente 300mA, por lo que es necesario un circuito que abra y cierre la alimentación del motor para controlar la velocidad del mismo, además que este circuito separe la parte de control de la parte de potencia, para evitar picos de corriente que afecte el sistema. Un elemento vital para realizar estas consideraciones es un optoacoplador más específicamente el 4N35; a continuación alguna de las características:



Fuente: <https://encrypted-tbn1.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcSiKDc4ZfbHTqhVj943Q26L0jkt1nPvadrF8bF4i9tb0nNK7XPx>

**Fig. 4.19** Optoacoplador 4N35.

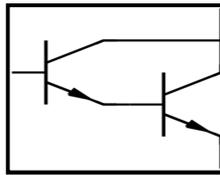
**Tabla 4.6** Tabla de las principales características del Optoacoplador.

| Optoacoplador 4N35              |           |           |
|---------------------------------|-----------|-----------|
| <b>Temperatura de operación</b> | <b>°C</b> | -55 a 100 |
| <b>Voltaje de entrada</b>       | <b>V</b>  | 6         |
| <b>Voltaje colector-emisor</b>  | <b>V</b>  | 30        |

Fuente: Datasheet Fairchild Semiconductor optoacoplador 4N35.

Para realizar el control de velocidad el circuito está compuesto por el optoacoplador 4N35, separando el circuito de potencia de el de control, además

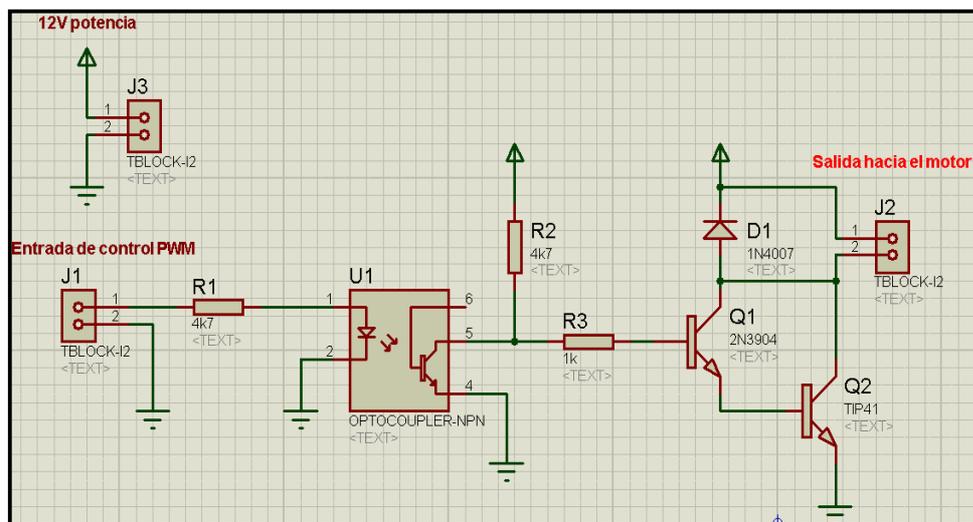
cuenta con un arreglo Darlington de transistores NPN, esto debido a las propiedades que tiene el arreglo Darlington de producir una ganancia de corriente que es el producto de la ganancia de los dos transistores de forma individual, que puede ser de 1000 o superior además de un mayor desplazamiento de fase en altas frecuencias.



Fuente: <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/4/4f/Darlington00.svg/220px-Darlington00.svg.png>

**Fig. 4.20** Arreglo Darlington de transistores.

Este arreglo abrirá y cerrará el paso de corriente en la parte de potencia, comandado por el optoacoplador que funciona de acuerdo a las señales del controlador, como se muestra en el siguiente circuito:



Fuente: Los autores

**Fig. 4.21** Circuito de control de velocidad del motor con arreglo Darlington.

#### **4.2.4 CIRCUITOS DE ACONDICIONAMIENTO DE LA BALANZA.**

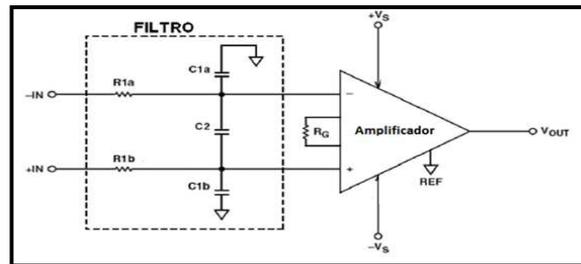
La celda de carga es un elemento de medición muy sensible que varía en el rango de los milivoltios, por que el acondicionamiento de la señal es un poco crítica, para lo cual la señal será tratada por dos circuitos diferentes, el primero un circuito de filtrado y el segundo de amplificación de la señal, la cual cuenta con un arreglo de capacitores y amplificadores que posee un amplificador de instrumentación como es el AD620 el cual funciona de manera adecuada en amplios rangos de amplificación de voltaje y que se encuentra en aplicaciones tales como instrumentación médica, básculas electrónicas y amplificador de transductores.

##### **4.2.4.1 Arreglo de capacitores**

Debido a que existe la gran posibilidad de la existencia de ruidos de alta frecuencia provocados por la fuente de alimentación y otras fuentes de ruido del sistema, es necesario realizar un arreglo de capacitores (circuito pasa bajos).

Esto se debe realizar antes de la etapa de amplificación, ya que la mayoría de amplificadores incluso los de instrumentación no eliminan el ruido de las señales, sino que al contrario las amplifican, por lo que es importante eliminarlos para evitar errores en la medición de la señal.

Se puede ver que el circuito pasa bajos es colocado antes de iniciar la etapa de amplificación para evitar los errores anteriormente mencionados:



Fuente: [www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/19335/3/3%20PARTE%20-%20CAP%C3%8DTULO%202.docx](http://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/19335/3/3%20PARTE%20-%20CAP%C3%8DTULO%202.docx), Desarrollo del acondicionamiento de señal, Español

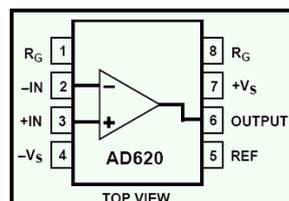
**Fig. 4.22** Circuito pasa bajos.

Es un filtro en modo común, que al momento de existir un ruido de alta frecuencia este altera el equilibrio del puente como se puede ver en el gráfico, y rechaza las frecuencias en modo común, por lo que es necesario que las resistencias R1a y R1b así como los capacitores C1a y C1b sean iguales, este filtro debe cumplir las siguientes condiciones:

$$\frac{R1a}{C1a} = \frac{R1b}{C1b} \quad \text{Ecuación [4-3]}$$

Además para que este puente sea efectivo el capacitor C2 que está conectado a la salida del mismo debe ser en valor por lo menos 10 veces mayor al valor de los capacitores C1a y C1b.

#### 4.2.4.2 Arreglo de amplificadores



Fuente: [https://lc.fie.umich.mx/~jfelix/Instr\\_sep05-feb06/AIB/Instru4.htm](https://lc.fie.umich.mx/~jfelix/Instr_sep05-feb06/AIB/Instru4.htm), El amplificador de instrumentación básico, Español

**Fig. 4.23** Diagrama del amplificador de instrumentación AD620.

Las características principales son las siguientes:

**Tabla 4.7** Características del amplificador de instrumentación AD620.

| Amplificador de instrumentación AD620                         |                  |
|---|------------------|
| <b>Ganancia de voltaje</b>                                    | 1 a 10000        |
| <b>Voltajes bipolares operativos V</b>                        | +2.3 a +18       |
| <b>Desvío máximo</b>  | <b>uV/°C</b> 0.6 |
| <b>La ganancia se coloca utilizando una sola resistencia.</b> |                  |

Fuente: Datasheet Analog Devices AD620.

Este amplificador responde a la ecuación:

$$V_o = AV(V_{+IN} - V_{-IN}) \quad \text{Ecuación [4-4]}$$

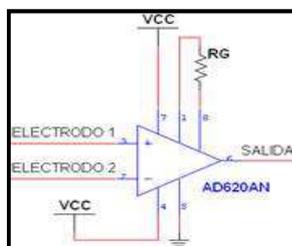
Dónde:

El voltaje de entrada es el voltaje diferencial entre las terminales -IN y +IN

AV= Ganancia dada por la ecuación.

$$AV = \frac{49.4 K\Omega}{RG} + 1 \quad \text{Ecuación [4-5]}$$

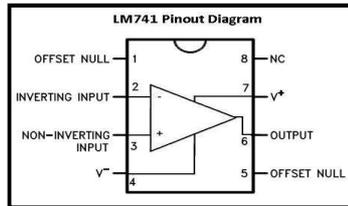
RG= Resistencia de ganancia.



Fuente: [www.monografias.com/trabajos82/electro-medicina/image003.jpg](http://www.monografias.com/trabajos82/electro-medicina/image003.jpg), amplificador de instrumentación, Español

**Fig. 4.24** Configuración del amplificador de instrumentación AD620.

Un seguidor de voltaje con un amplificador operacional LM741 para filtrar la señal además de un arreglo de amplificador no inversor con el mismo LM741, como se puede ver:



Fuente: [http://2.bp.blogspot.com/-btS77okVhmo/ULmgzIApfml/AAAAAAAAAM4/nfgL0h8Nejo/s1600/LM741\\_pinout\\_diagram.jpg](http://2.bp.blogspot.com/-btS77okVhmo/ULmgzIApfml/AAAAAAAAAM4/nfgL0h8Nejo/s1600/LM741_pinout_diagram.jpg)

**Fig. 4.25** Diagrama de pines del amplificador LM741.

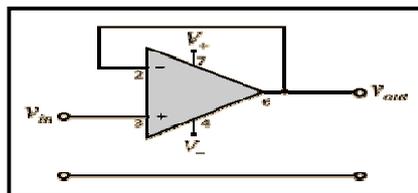
Este es un amplificador con alimentación diferencial, a continuación algunas características del amplificador:

**Tabla 4.8** Características del amplificador de instrumentación LM741.

| Amplificador LM741              |           |        |
|---------------------------------|-----------|--------|
| <b>Temperatura de operación</b> | <b>°C</b> | 0 a 70 |
| <b>Voltaje de alimentación</b>  | <b>V</b>  | + -18  |
| <b>Voltaje de entrada</b>       | <b>V</b>  | + -15  |

Fuente: Datasheet Fairchild Semiconductor LM741.

Amplificador LM741 dispuesto como seguidor de voltaje:



Fuente: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/electronic/ietron/volf2.gif>

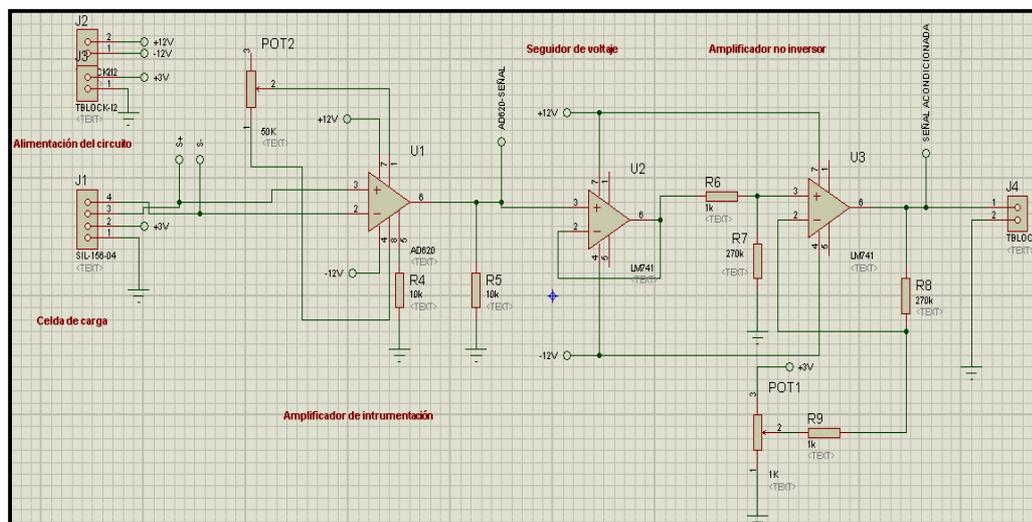
**Fig. 4.26** Configuración de seguidor de voltaje.

La ecuación a la que se rige su funcionamiento:

$$V_{in} = 0.9999999V_{out} \quad \text{Ecuación [4-6]}$$

La disposición como amplificador no inversor es igual a la disposición que tenía el amplificador LM358, y se rige bajo la misma ecuación, la diferencia en este arreglo con el circuito del LM358 es que la resistencia para obtener la ganancia es un potenciómetro de precisión, para de esta manera, regular alguna desviación de offset del sensor, y afinar de manera correcta la sensibilidad del sensor.

El circuito implementado es el siguiente:



Fuente: Los autores

**Fig. 4.27** Circuito de amplificación de la señal de la celda de carga. Filtro Butterworth

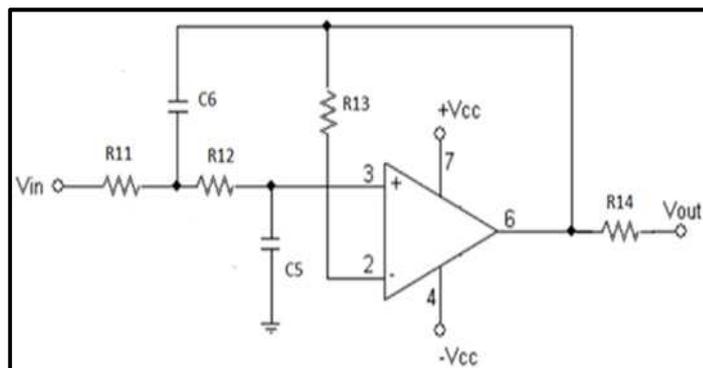
Debido a que la señal proporcionada por la celda de carga es muy pequeña, esta se ve afectada de manera considerable por los ruidos que se encuentran

en el sistema y una de las principales es la fuente de alimentación, este particular ocasiona problemas al momento de tratar la señal, más específicamente al momento de realizar la conversión análogo/digital, esto tanto por parte del microcontrolador PIC y del controlador lógico programable PLC, haciendo que esta no sea la más óptima.

A la salida de la etapa de amplificación se debe tener muy en cuenta la frecuencia de la señal que esta no produzca un error conocido como aliasing (soplamiento), esto antes de que la señal sea digitalizada.

El aliasing impide al convertidor análogo/digital tomar la señal de muestreo de manera correcta, de tal forma que toma datos con cambios muy grandes en los valores de la señal (pendiente abrupta de señal), por lo que es necesario implementar un filtro pasa bajos de segundo orden Butterworth.

A continuación se observa como está conformado un filtro Butterworth:



Fuente: [www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/19335/3/3%20PARTE%20-%20CAP%3%8DTULO%202.docx](http://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/19335/3/3%20PARTE%20-%20CAP%3%8DTULO%202.docx)

**Fig. 4.28** Filtro pasa bajo de segundo orden Butterworth.

## **4.3 SELECCIÓN DE LOS ELEMENTOS DE LOS CIRCUITOS**

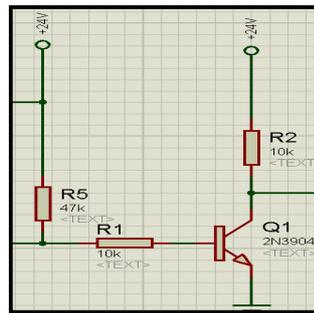
La selección de elementos de los diferentes circuitos depende de los voltajes y las corriente a los que se va someter a dichos elementos, esto dependiendo del tipo de sensor y la función que van a cumplir, como anteriormente se describe los circuitos de acondicionamiento de señales de los diferentes sensores del módulo didáctico, se selecciona los elementos de acuerdo a las necesidades de los sensores y del sistema.

### **4.3.1 PARA LOS CIRCUITOS DE LOS SENSORES**

Como se mencionó anteriormente en las características de los sensores ópticos su volteje de retorno está dentro de los 5V máximo por lo cual es necesario amplificarlo, pero por consideraciones de diseño y por qué estos sensores deben que tener una referencia común con el PLC, para que este pueda reconocer sus señales; estos sensores estarán alimentados por la fuente del PLC, la cual es de 24 V, por lo que se debe hacer ciertas condiciones de protección de los sensores por medio de resistencias, en la alimentación de cada uno, debido a que la diferencia más importante entre los sensores ópticos que se utiliza es la forma, ya que poseen los mismos elementos internos; se hace la selección de los elementos para uno de ellos y esto se aplicará al otro ya que son básicamente lo mismo.

Como el sensor será alimentado con 24V este deberá protegerse con resistencias para reducir el voltaje que ingresará a los elementos internos de los sensores.



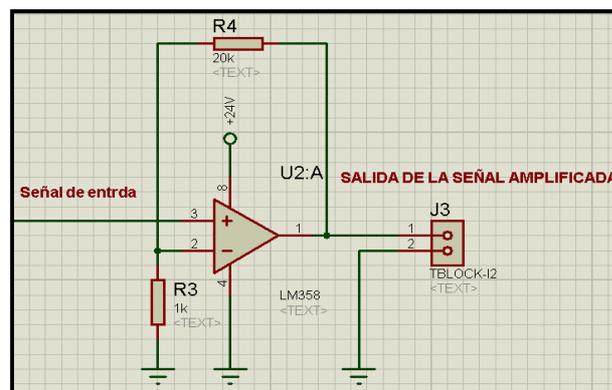


Fuente: Los autores

**Fig. 4.30** Arreglo de resistencias para transistor 2N3904.

$$I = \frac{V}{R} = \frac{24}{10000} = 2.4mA$$

Como se observa la corriente del colector no supera a la máxima admitida por el transistor, debido a los arreglos de resistencias en el colector del transistor se tiene una señal entre 0 y 1.1V aproximadamente, para lo cual se necesita una amplificación de por lo menos unas 20 veces para que esta señal pueda ser reconocida por el controlador, para lo cual se utiliza dos resistencias, una de 20KΩ y una de 1KΩ, y se lo puede comprobar con la ecuación del amplificador no inversor.



Fuente: Los autores

**Fig. 4.31** Amplificador provisto con resistencias para aumento de 20 veces.

Mediante la ecuación 4-2 se tiene:

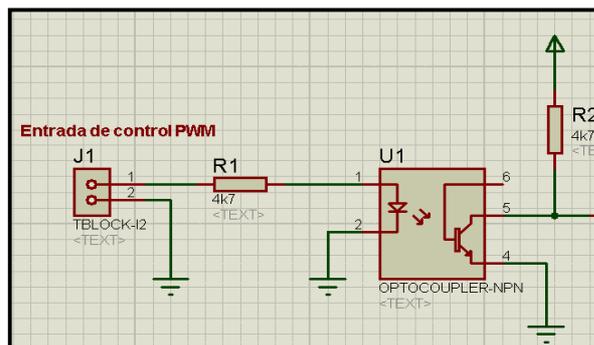
$$V_{out} = 1.1 \left( 1 + \frac{20000}{1000} \right) = 22V$$

Con esta señal amplificada ya se puede llevarla al controlador para su posterior utilización en el programa de control.

#### 4.3.2 PARA EL CIRCUITO DE CONTROL DE LA BANDA.

Para realizar el control de velocidad del motor se debe tener muy en cuenta la corriente en la parte de la alimentación de potencia del motor, para la parte de control y para aislar la parte de control de la parte de potencia se implementa el optoacoplador 4N35 descrito anteriormente, como en el caso de los sensores ópticos está alimentado directamente con 24V de la fuente del PLC.

Se utiliza una resistencia de 4.7KΩ para obtener una corriente menor a la máxima permitida por el emisor que es de 60 mA.

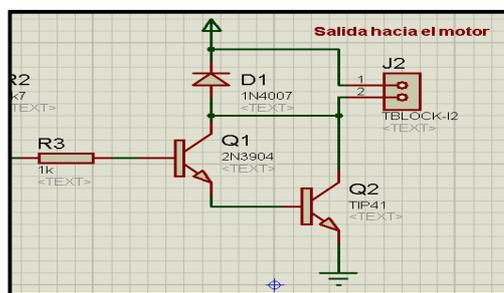


Fuente: Los autores

**Fig. 4.32** Optoacoplador provisto de resistencias.

$$I = \frac{V}{R} = \frac{24}{4700} = 5.1 \text{ mA}$$

Con este resultado se puede ver que la corriente está dentro del rango de funcionamiento, para un correcto desempeño del optoacoplador. Otra parte importante del circuito es el arreglo Darlington que amplifica la corriente como se ya mencionó, para lo cual se utiliza un transistor 2N3904 como receptor de la señal y un transistor TIP 41, que es un transistor NPN de potencia que tiene las siguientes características:



Fuente: Los autores

**Fig. 4.33** Configuración Darlington para el control del motor.

**Tabla 4.10** Tabla de las principales características del transistor NPN TIP41.

| Transistor NPN TIP41            |           |           |
|---------------------------------|-----------|-----------|
| <b>Temperatura de operación</b> | <b>°C</b> | -55 a 150 |
| <b>Voltaje colector-emisor</b>  | <b>V</b>  | 40        |
| <b>Corriente de colector</b>    | <b>A</b>  | 6         |

Fuente: Datasheet Fairchild Semiconductor TIP41.

Con estas características se observa que este tipo de transistor el motor de la banda trabaja de forma óptima, ya que este al momento del arranque tiene un pico de corriente de 5A, el motor cuenta con un diodo inversamente polarizado 1N4007 que protege al sistema de las sobretensiones producidas por el funcionamiento de la bobina del motor.

### 4.3.3 PARA LOS CIRCUITOS DE LA CELDA DE CARGA

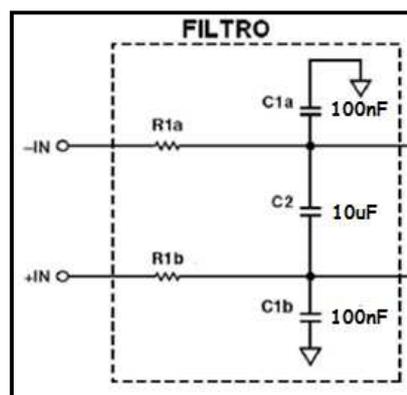
Para la selección de los elementos del circuito de acondicionamiento de la celda de carga, se parte por las etapas como estaban descritas anteriormente.

#### 4.3.3.1 Circuito pasa bajo

La selección de los elementos del circuito pasa bajo, deben cumplir que el capacitor paralelo a las señales positiva y negativa de la celda debe ser como mínimo 10 veces mayor a los capacitores entre las diferentes señales y tierra.

El valor de estos últimos capacitores es de 100nF por lo tanto como mínimo el capacitor en paralelo a las señales debería de ser de 1uF.

Pero se obtuvo mejores resultados para la eliminación de ruidos de alta frecuencia con un capacitor de 10uF el cual quedó instalado en el circuito, la única condición en las resistencias es que sus valores sean iguales, se puede utilizar resistencias de 220Ω.

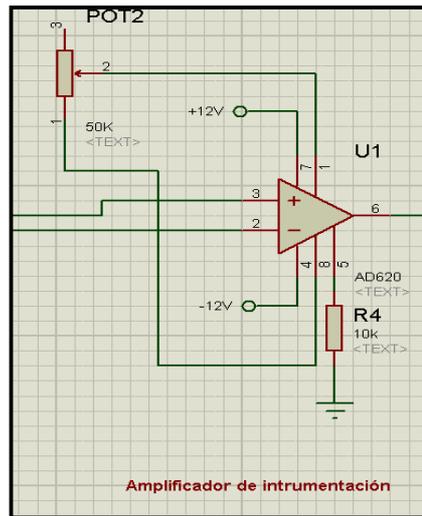


Fuente: [www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/19335/3/3%20PARTE%20-%20CAP%C3%8DTULO%202.docx](http://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/19335/3/3%20PARTE%20-%20CAP%C3%8DTULO%202.docx)

**Fig. 4.34** Valores de los capacitores del filtro pasa bajo.

### 4.3.3.2 Arreglo de amplificadores

Como se vio anteriormente el amplificador de instrumentación tiene grandes ganancias y ellas están en función de su fórmula:



Fuente: Los autores

**Fig. 4.35** Configuración del amplificador de instrumentación con RG variable.

$$V_o = \left(\frac{49.4 \text{ K}\Omega}{R_G} + 1\right)(V_{+IN} - V_{-IN}) \quad \text{Ecuación [4-7]}$$

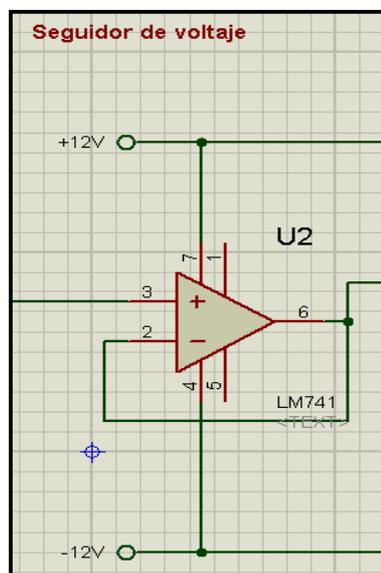
Debido a que la resistencia RG es un potenciómetro de precisión la fórmula queda en función de RG que variará entre:

**Tabla 4.11** Valores máximo y mínimo de ganancias.

| Ganancia de voltaje |      |
|---------------------|------|
| RG (Ω)              | AV   |
| 0                   | ∞    |
| 50 k                | 1.99 |

Fuente: Los autores

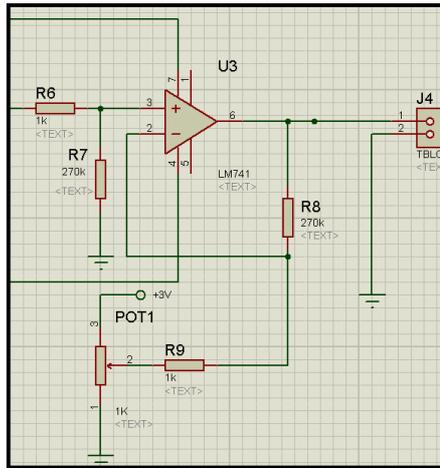
Otra parte del arreglo de amplificadores es un seguidor de voltaje, que está implementado con un LM741 y su principal función es la de eliminar los ruidos que no hayan sido eliminados por el amplificador de instrumentación, no existen mayor razones de cálculo en este tipo de configuración, ya que su objetivo no es amplificar, sino la de eliminar los ruidos existentes en la señal, como se observa en el siguiente gráfico:



Fuente: Los autores

**Fig. 4.36** Configuración del amplificador de seguidor de voltaje con LM741.

Y en la última etapa del arreglo de amplificadores se encuentra el amplificador operacional LM741 que está en configuración de amplificador no inversor, que ya se explicó con anterioridad, el cual está regida por la siguiente ecuación:



Fuente: Los autores

**Fig. 4.37** Configuración del amplificador no inversor de voltaje con LM741.

$$V_{out} = V_{in} \left( 1 + \frac{270000}{1000 + POT1} \right) \quad \text{Ecuación [4-8]}$$

Debido a que la resistencia POT1 es un potenciómetro de precisión la fórmula queda en función de esa resistencia, que variará entre:

**Tabla 4.12** Valores máximo y mínimo de ganancias.

| Ganancia de voltaje |          |
|---------------------|----------|
| POT1 (Ω)            | Ganancia |
| 0                   | 271      |
| 2 k                 | 136      |

Fuente: Los autores

#### 4.3.3.3 Selección de los elementos del filtro Butterworth

Este un filtro pasa bajo de segundo orden que se implementa para mejorar la digitalización de la señal análoga, la selección de los elementos depende de la frecuencia de muestreo con la que trabaje el convertidor análogo/digital, la

frecuencia de corte de la señal será de 10KHz, debido a que se trata de evitar que se procesen los cambios abruptos en las señales análogas provenientes de la etapa de amplificación.

Para la realización del cálculo es necesario saber la razón de amortiguamiento de los filtros de segundo orden y es:

$$\text{Razón de amortiguamiento } \zeta = 0.707$$

Para:

$$R_{11} = R_{12} = 100\Omega$$

$$R_{13} = 2 * R_{11} = 200 \Omega$$

El capacitor C5 debe ser diferente al capacitor C6, y la frecuencia de corte es igual a 10KHz, entonces:

$$\zeta = \sqrt{\frac{C_5}{C_6}} \quad \text{Ecuación [4-9]}$$

$$f_c = \frac{1}{2 \pi R \sqrt{C_5 * C_6}} \quad \text{Ecuación [4-10]}$$

$$\zeta = \sqrt{\frac{C_5}{C_6}}$$

$$0.707 = \sqrt{\frac{C_5}{C_6}}$$

$$0.49 = \frac{C_5}{C_6}$$

$$C_6 = 2 C_5$$

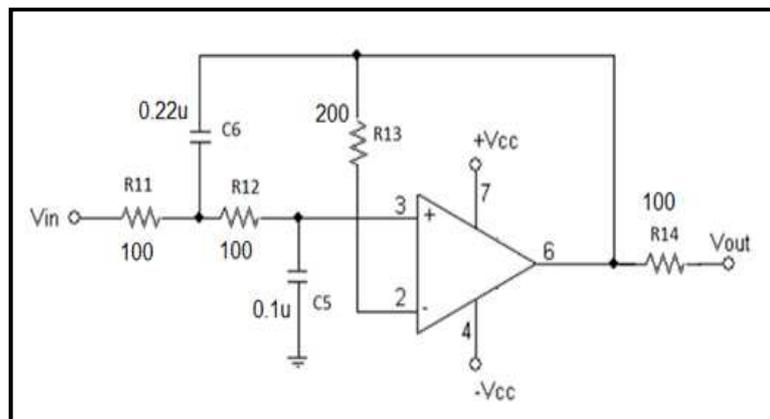
Por lo tanto si  $C_6 = 0.1\mu\text{F}$  entonces  $C_5 = 0.22\mu\text{F}$ .

$$R = \frac{1}{2 \pi * f * \sqrt{C5 * C6}} \quad \text{Ecuación [4-11]}$$

$$R = \frac{1}{2 \pi * 10k \text{ Hz} * \sqrt{0.1\mu\text{F} * 0.22\mu\text{F}}}$$

$$R14 = 107.302 \Omega$$

Lo cual se aproxima a una resistencia comercial de 100Ω, con lo que se tiene ya los elementos necesarios para el filtro Butterworth, como se observa en la siguiente imagen:

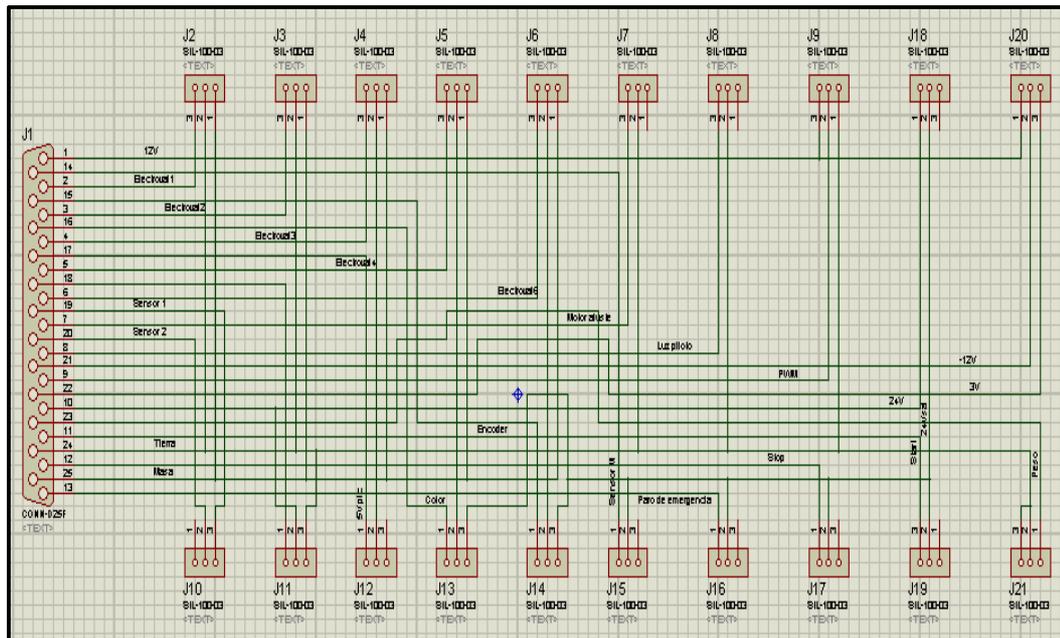


Fuente: [www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/19335/3/3%20PARTE%20-%20CAP%3%8DTULO%202.docx](http://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/19335/3/3%20PARTE%20-%20CAP%3%8DTULO%202.docx)

**Fig. 4.38** Filtro pasa bajo de segundo orden Butterworth.

#### 4.3.3.4 Selección de elementos del circuito de recolección de señales de entrada y salida

El módulo didáctico está provisto de un circuito de recolección de señales de entrada y salida de manera que todas estas señales sean transmitidas al controlador PLC, por medio de un conector DB25, el diagrama del circuito se muestra a continuación:



Fuente: Los autores

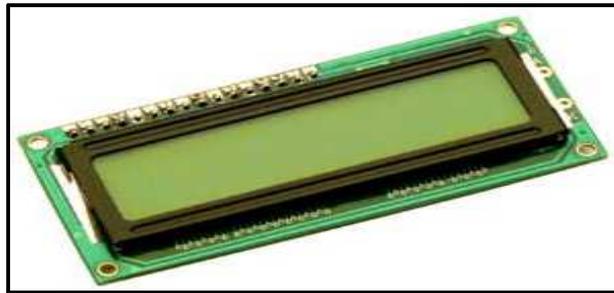
**Fig. 4.39** Circuito de recolección de señales de entrada y salida.

La lista de cada uno de las borneras y específicamente de cada uno de sus pines se encuentra en la tabla 6.2.

#### 4.4 CIRCUITO ELECTRÓNICO DEL CONTROLADOR

Debido a la necesidad de mostrar de manera visual por medio de un LCD 2x16, los datos obtenidos por el contador de revoluciones, presentando así la velocidad a la que se encuentra la banda, y de presentar el peso de las botellas en gramos por medio de los datos obtenidos en la celda de carga; se utiliza el microcontrolador PIC 16f877A, cuya estructura física se representa por el siguiente diagrama:

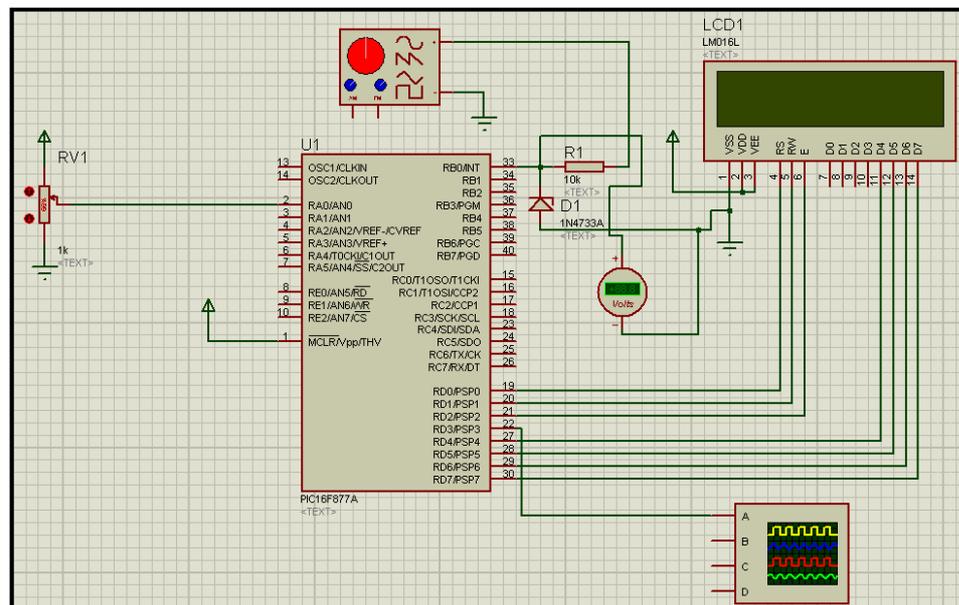




Fuente: [http://www.kamami.com/?id\\_prod=2214700](http://www.kamami.com/?id_prod=2214700), LCD 1602, Inglés

**Fig. 4.41** Pantalla LCD 2x16.

Este circuito muestra las variables en el LCD, además de estar provisto de un pequeño circuito de reseteo del microcontrolador, de una entrada análoga por el puerta RA1/AN1 y un contador de pulsos para la medición de revoluciones por medio del pin RB0/INT, el programa interno del microcontrolador está compilado en PIC C, que se encuentra en el anexo 5-2.



Fuente: Los autores

**Fig. 4.42** Circuito electrónico del controlador PIC 16F877A.

Al ingreso de las señales tanto la análoga como lo es el peso y la digital del contador de revoluciones son acondicionadas para que puedan estar dentro de los rangos del controlador lógico programable, debido a que para el PLC un “uno lógico” es a partir de 15V y su conversor análogo/digital varía en el rango de los 0 a 10 V; es necesario colocar diodos zener para limitar el voltaje que ingresa al microcontrolador y no supere los 5V ya que si este nivel es superado el voltaje llegará a quemar el dispositivo.

#### **4.5 DIAGRAMA DE CONEXIONES DE LOS CIRCUITOS**

Se realiza un diagrama general de las conexiones de los diferentes circuitos electrónicos que conforman el módulo didáctico, el cual se encuentra en el anexo 4-10.

## CAPÍTULO 5

### DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL

#### 5.1 P.L.C.

Este dispositivo es el más importante en el sistema de control, ya que con la ayuda de este elemento se puede energizar con 24 VDC a varios de los dispositivos eléctricos y electrónicos que lo requieran; y especialmente accionar y controlar a los mismos de forma sincronizada mediante la programación secuencial (ladder).

##### 5.1.1 SELECCIÓN DEL CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE

Para el control y funcionamiento del sistema se utiliza como principal elemento el PLC S7-1200 del modelo 1214C AC/DC/Relé marca Siemens; el cual posee características adecuadas para el manejo de los motores eléctricos, sensores, electroválvulas, y además permite generar un controlador PID apropiado para mantener constante la velocidad de la banda transportadora.



Fuente: [www.kingkata.co.id](http://www.kingkata.co.id), New Simatic S7-1200, Inglés

**Fig. 5.1** Controlador Lógico S7-1200, CPU y algunos módulos adicionales.

### 5.1.2 CARACTERÍSTICAS

De manera general la familia S7-1200 ofrece tanto flexibilidad como potencia para realizar el control de una gran variedad de dispositivos para las diversas aplicaciones y necesidades de automatización. Entre las características se puede mencionar:

- La CPU posee un microprocesador, una fuente de alimentación integrada, circuitos de entrada y salida, PROFINET integrado, entrada/salida de control de movimiento de alta velocidad y entradas analógicas incorporadas.
- Tiene la capacidad lógica necesaria para controlar los dispositivos de la aplicación una vez que se cargue el programa. La CPU vigila las entradas y cambia el estado de las salidas según la lógica del programa de usuario.
- Además dispone de módulos y placas adicionales de conexión para ampliar su capacidad, como por ejemplo el módulo de salidas digitales a transistor, así como otros protocolos de comunicación.
- El S7-1200 tiene la capacidad de soportar la creación de archivos de registro para el almacenamiento de valores de proceso. Se pueden crear instrucciones de tipo "DataLog" específicas para la creación y gestión de registros.

Para la programación y comunicación del PLC con el computador se utiliza un cable UTP Ethernet con terminales RJ-45 inmune a perturbaciones. Así también se utiliza el Software Tia Portal V11, el cual permite la autoconfiguración de las direcciones IP para el reconocimiento y comunicación con los dispositivos.

**Tabla 5.1** Características de los modelos del CPU S7-1200.

| Función                                       |                           | CPU 1211C              | CPU 1212C               | CPU 1214C                |
|---|---------------------------|------------------------|-------------------------|--------------------------|
| <b>Dimensión</b>                              | <b>mm</b>                 | 90 X 100 X 75          | 90 X100 X75             | 110 x 100 x 75           |
| <b>Memoria de usuario</b>                     | <b>Trabajo</b>            | 25 KB                  | 25 KB                   | 50 KB                    |
|   | <b>Carga</b>              | 1 MB                   | 1 MB                    | 2 MB                     |
|   | <b>Remanente</b>          | 2 KB                   | 2 KB                    | 2 KB                     |
| <b>E/S integradas locales</b>                 | <b>Digital</b>            | 6 entradas / 4 salidas | 8 entradas / 6 salidas  | 14 entradas / 10 salidas |
|   | <b>Análogo</b>            | 2 entradas             | 2 entradas              | 2 entradas               |
| <b>Tamaño de la memoria imagen de proceso</b> | <b>Entradas (I)</b>       | 1024 bytes             | 1024 bytes              | 1024 bytes               |
|   | <b>Salidas (Q)</b>        | 1024 bytes             | 1024 bytes              | 1024 bytes               |
| <b>Área de marcas (M)</b>                     |                           | 4096 bytes             | 4096 bytes              | 8192 bytes               |
| <b>Contadores rápidos</b>                     | <b>Total</b>              | 3                      | 4                       | 6                        |
|   | <b>Fase simple</b>        | 3 a 100 kHz            | 3 a 100 kHz, 1 a 30 kHz | 3 a 100 kHz, 3 a 30 kHz  |
|   | <b>Fase en cuadratura</b> | 3 a 80 kHz             | 3 a 80 kHz, 1 a 20 kHz  | 3 a 80 kHz, 3 a 20 kHz   |

Fuente: Manual del Sistema del controlador programable S7-1200, Siemens, 2011, p. 18

El sistema automático didáctico en su parte de control consta de dos partes:

- Activación y control de los dispositivos eléctricos y electrónicos mediante la programación ladder, para la generación de la etapa de control de calidad y de roscado.
- Supervisión de la velocidad de la banda transportadora mediante la adecuación de un controlador PID.

## 5.2 SISTEMA DE CONTROL DE CALIDAD

El sistema es diseñado para determinar la calidad que poseen las botellas previo a su posterior tapado, en dicho sistema se determina dos factores como

son el peso del envase y la colocación o no de la tapa, mediante los sensores indicados en el capítulo cuatro.

### 5.2.1 CONTROL DEL PESO DE LA BOTELLA

Esta etapa permite determinar si el envase posee un peso de 100 gramos considerando un rango de  $\pm 1$  gramo, esto debido a que la dosificación o llenado de los mismos se realiza de forma manual.

Entonces sobre la balanza se ubica una botella cada siete segundos mediante el cilindro de ingreso accionado por una electroválvula 3/2 monoestable, por lo tanto mediante la programación que se carga en el PLC el dato de la masa es tomado cada 4.5 segundos, considerando una relación entre los valores de voltaje y peso. Se toma el dato mencionado en el tiempo indicado a fin de que la señal se estabilice y se obtenga el valor con mayor precisión.



Fuente: Los autores

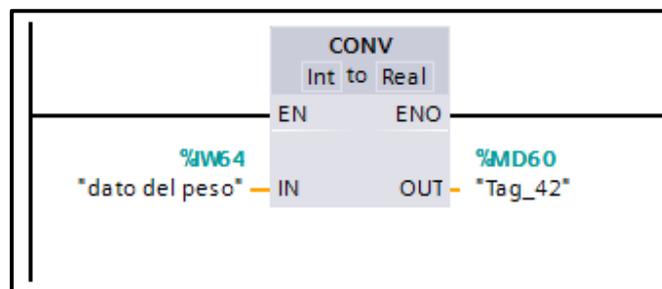
**Fig. 5.2** Etapa de ingreso y pesaje de botellas.

De manera paralela la masa se visualiza en un LCD 2x16 y así se puede verificar el accionar de esta etapa del control de calidad, ya que junto con el control de posicionamiento de las tapas, permite retirar las botellas defectuosas o simplemente dar el paso de las mismas a la siguiente etapa.

### 5.2.1.1 Accionamiento del control de peso

La señal con la que trabaja la balanza es de tipo análoga por lo que se utiliza en el PLC una entrada de este tipo.

Dentro de la programación se emplea la variable IW64 asignada al canal AI0.0, la cual es propia para este tipo de señales.



Fuente: Los autores

**Fig. 5.3** Bloque convertidor de del dato de entero a real.

El dato análogo varía aproximadamente entre (10800 y 11100), el cual puede cambiar en cada accionamiento del sistema por lo que se recomienda siempre verificar este parámetro, para posteriormente colocar dentro de un rango establecido el dato obtenido, y de esta manera garantizar que se encuentra en los 100 gramos.



Fuente: Los autores

**Fig. 5.4** Bloque “In\_Range” para establecer un rango del dato de peso.

### 5.2.2 CONTROL DE POSICIONAMIENTO DE TAPAS

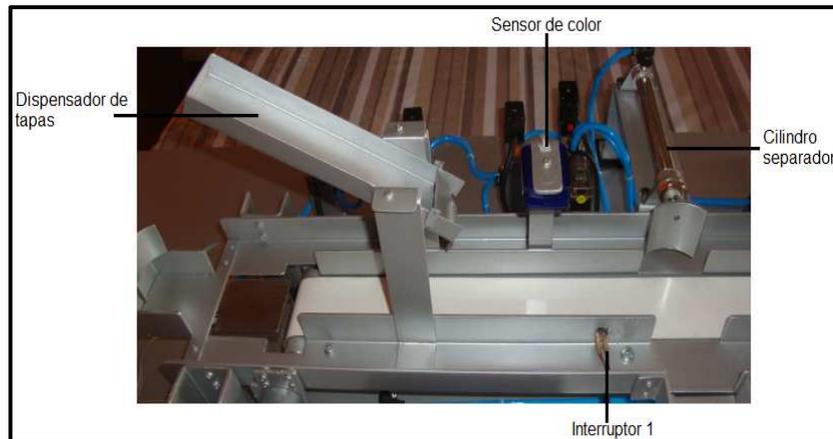
Una vez que el envase haya pasado por la balanza es colocada sobre la banda transportadora. El control de posicionamiento está formado de dos partes; la primera consta del dispensador de tapas el cual las coloca sobre cada botella, mientras que la segunda parte está constituida por el sensor óptico TCRT 5000 el cual mediante la presencia de la tapa emite una señal de voltaje que permite determinar el color de cada una de las tapas.

**Tabla 5.2** Valores de voltaje según el color.

| COLOR           | VOLTAJE |
|-----------------|---------|
| <b>Amarillo</b> | 4.5 V   |
| <b>Negro</b>    | 0.5 V   |

Fuente: Los autores.

En este caso se utiliza al color amarillo como el predeterminado para la parte de control, es decir que si el envase cumple con el valor de la masa y la tapa que se encuentra sobre este es de color amarillo entonces habrá cumplido con toda la etapa de control de calidad y por tanto pasa a la fase de tapado.



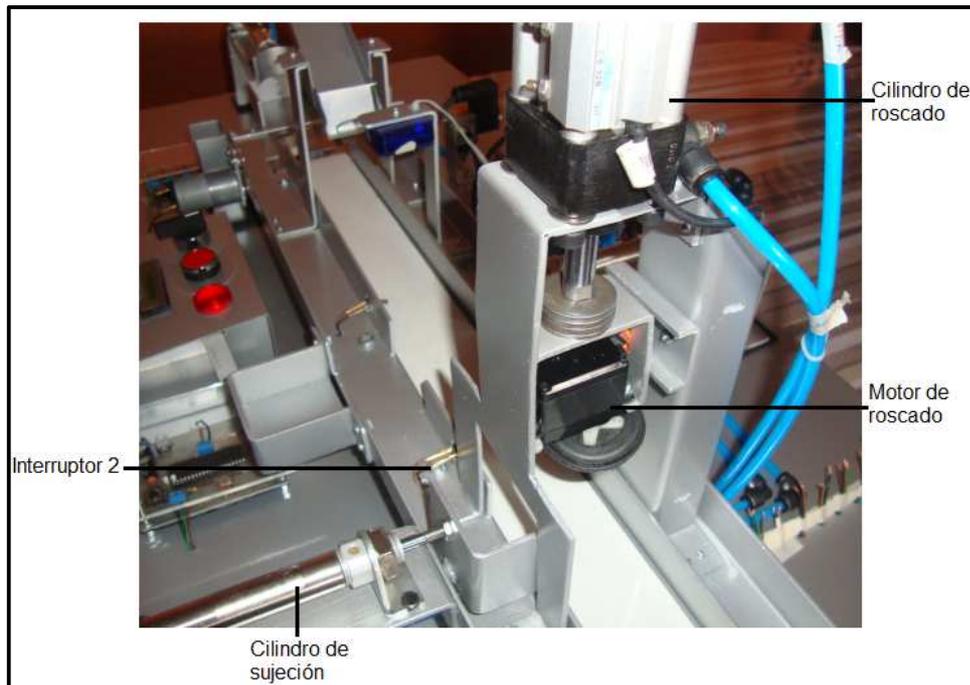
Fuente: Los autores

**Fig. 5.5** Etapa de posicionamiento de tapas y separación de botellas.

Caso contrario se retira de la banda mediante el pistón neumático de separación el mismo que es accionado por una segunda electroválvula 3/2 monoestable. Esta parte se ejecuta cuando se presiona el interruptor 1, es decir si no cumple con el peso o el color de la tapa o con ninguno de los dos el interruptor habilita el pistón de separación, caso contrario si posee los dos requisitos y se presiona el dicho interruptor el cilindro no realiza ninguna acción.

### 5.3 PROCESO DE TAPADO

A esta fase llegan únicamente los envases con 100 gramos y que tengan tapa de color amarillo, por tanto cuando se presiona el interruptor 2 se activa el cilindro de sujeción mediante una tercera electroválvula 3/2 monoestable, el cilindro de roscado a través de una electroválvula 5/2 biestable y el servomotor o motor de roscado.



Fuente: Los autores

**Fig. 5.6** Etapa de rosado de las botellas plásticas.

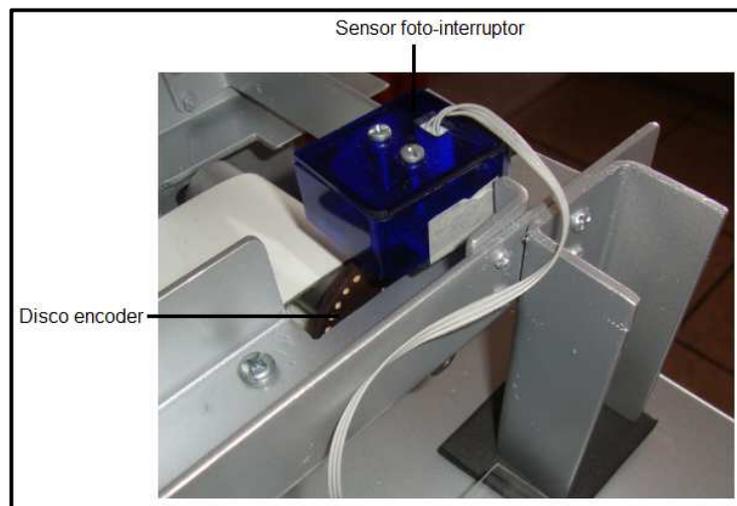
El proceso tiene una duración de cuatro segundos en donde el envase se sostiene a presión por el cilindro de sujeción, mientras que la tapa realiza un desplazamiento vertical y giratorio para posicionarse sobre dicho envase mediante el cilindro y motor de rosado.

#### **5.4 CONTROL DE LA VELOCIDAD DE LA BANDA**

A más del control de calidad que se realiza sobre las botellas y del proceso de tapado de las mismas el sistema didáctico posee un controlador PID implementado sobre la banda transportadora; con el objetivo de mantener constante su velocidad ya que puede variar especialmente en el momento que se acciona la etapa de rosado.

#### 5.4.1 COMPONENTES UTILIZADOS

Para el control se utiliza un disco perforado (disco encoder) acoplado al eje secundario de la banda transportadora el cual tiene 32 orificios, ya que a mayor número de pulsos que se traducen en orificios se tiene una mejor resolución de las revoluciones por minuto, así también un sensor foto-interruptor (tipo slot) GP3S62 que permite determinar las revoluciones a la que gira dicho eje para de esta manera obtener la velocidad lineal con la que se mueve la cinta.



Fuente: Los autores

**Fig. 5.7** Elementos para el control de velocidad.

El PLC S7-1200 permite realizar el controlador PID de forma directa, sin embargo para este caso se utiliza también un módulo digital adicional ya que se necesita una salida tipo transistor, esto debido a que se requiere una rápida respuesta a la señal de alta frecuencia que recibe el CPU el mismo que posee salidas tipo relé, las cuales resultan deficientes frente a un trabajo de estas características.

### 5.4.2 ANÁLISIS Y SIMULACIÓN

El número de revoluciones por minuto responde a la siguiente ecuación.

$$RPM = N * \frac{60}{32} \quad \text{Ecuación [5-1]}$$

$$RPM = N * 1.875$$

Dónde:

N= Número de veces que el haz de luz atraviesa los orificios del disco en un segundo, y es detectado por el foto-interruptor.

1.875 es la constante que resulta de la división de 60 que son los segundos en un minuto (esto debido a que el controlador cuenta el número de pulsos cada segundo) y de 32 que son el número de veces que debe detectar el haz de luz para determinar que el disco ha girado completamente, además este número represente la mínima resolución del encoder.

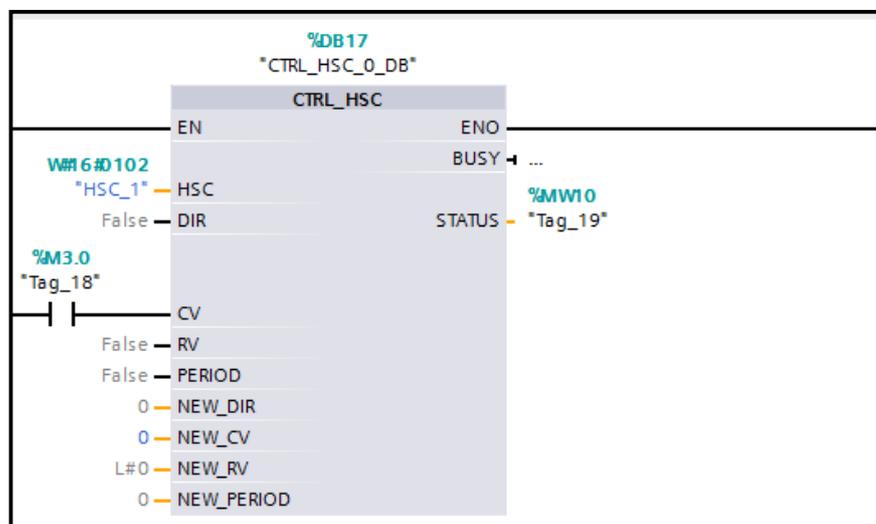
Para un proceso óptimo del módulo didáctico la velocidad de la banda debe estar en un valor aproximado de 6 cm/s, que en revoluciones por minuto representa 46 RPM, por lo tanto:

$$RPM = 25 * 1.875 = 46.85$$

El foto-interruptor tipo “slot”, debe contar 25 pulsos en un segundo para que la banda del módulo esté a la velocidad optima de trabajo.



en el microcontrolador, en el PLC se debe realizar la adquisición del número de pulsos detectados por el foto-interruptor por medio de un contador rápido (HSC); el cual a través de un “TIMER\_ON”, que está temporizado a un segundo, pueda ser reseteado en ese tiempo y de esa manera con el dato obtenido poderlo tratar con la ecuación [5-1], y así obtener las revoluciones por minuto.



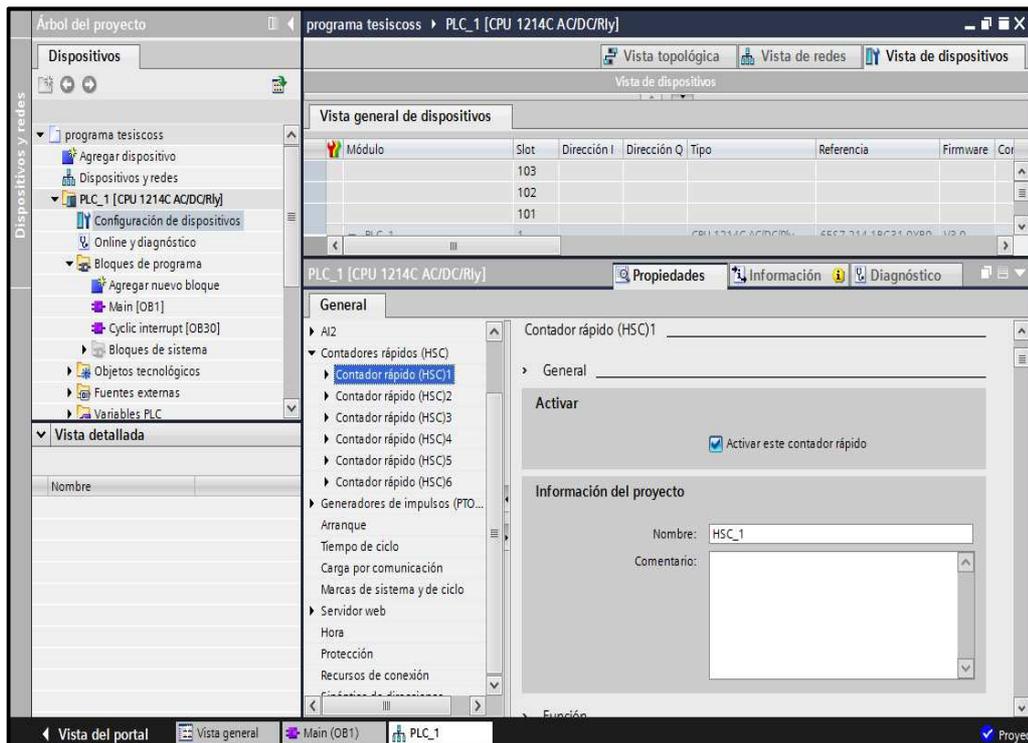
Fuente: Los autores

**Fig. 5.9** Contador rápido HSC del S7 1200.

Como su nombre lo dice es un contador de alta frecuencia, el cual está relacionada a la entrada física I0.0, y que a su vez será la entrada de los pulsos a contar, el número de pulsos se guarda en la memoria relacionada al “HSC\_1” que es la ID1000, es esta variable entera donde se almacenará el número de pulsos en un segundo, el cual se encuentra en la pestaña de “Tecnología” del programa “TIA Portal”, en la carpeta de contadores, y se coloca en el programa principal.

Dónde:

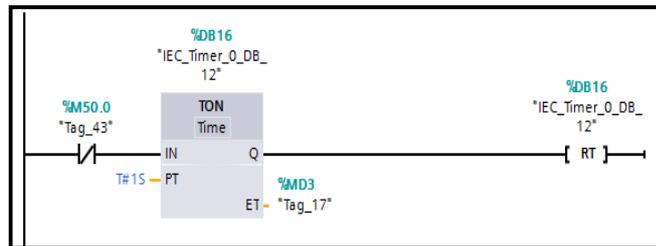
HSC\_1= Es el nombre del contador rápido que va a ser utilizado, ya que existen 6 contadores rápidos en total, y deben ser activados en la configuración del CPU S7-1200, como se puede ver en la siguiente imagen:



Fuente: Los autores

**Fig. 5.10** Activación de los contadores rápidos en la configuración del CPU del PLC S7 1200, en el Programa “TIA Portal”.

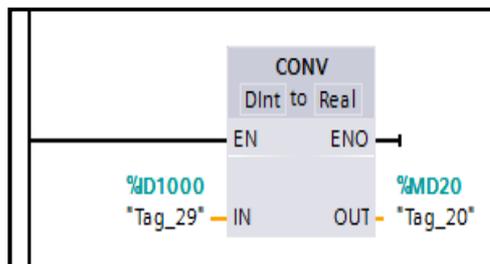
CV= Es la entrada en la cual si se encuentra activa resetea el valor del contador rápido y coloca en él, el valor actual que se ubica en la variable “NEW\_CV”, este reseteo viene dado cada segundo por medio del temporizador “TIMER\_ON”.



Fuente: Los autores

**Fig. 5.11** “TIMER\_ON” de reseteo del valor de conteo del HSC contador rápido a cada segundo.

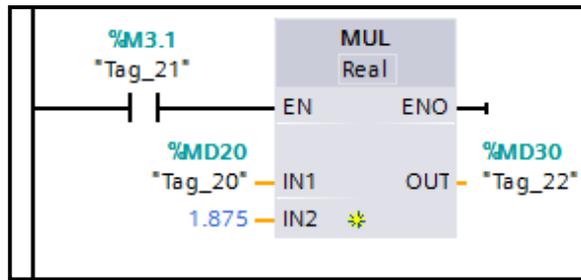
Una vez obtenida el conteo de los pulsos por segundo, debe ser tratada igualmente como en el microcontrolador, para por medio de la ecuación [5-1], transfórmalos a RPM. Una vez obtenido el conteo por segundo en la variable ID1000, esta debe ser transformada a dato tipo real, para su posterior tratamiento por medio del siguiente bloque:



Fuente: Los autores

**Fig. 5.12** Conversión de la variable ID1000 a formato de variable tipo “Real”, para posterior tratamiento.

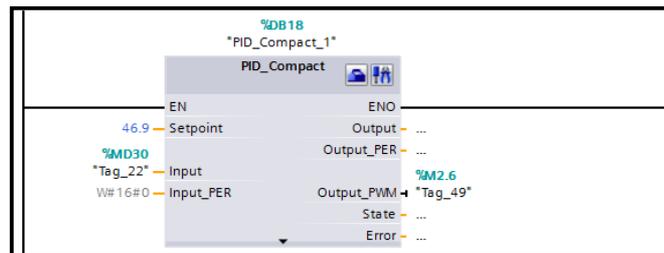
Para la implementación de la ecuación [5-1], se utilizara el bloque “MUL”, que multiplicará el valor real del conteo por la constante 1.875 anteriormente descrita, como se muestra a continuación:



Fuente: Los autores

**Fig. 5.13** Multiplicación de la variable de conteo tipo real por la constante.

Una vez obtenido el dato de revoluciones por minuto, este será ingresado al bloque de control PID, el cual será el dato de entrada para comparar con el “Set Point”, que está a 46.9 revoluciones por minuto.

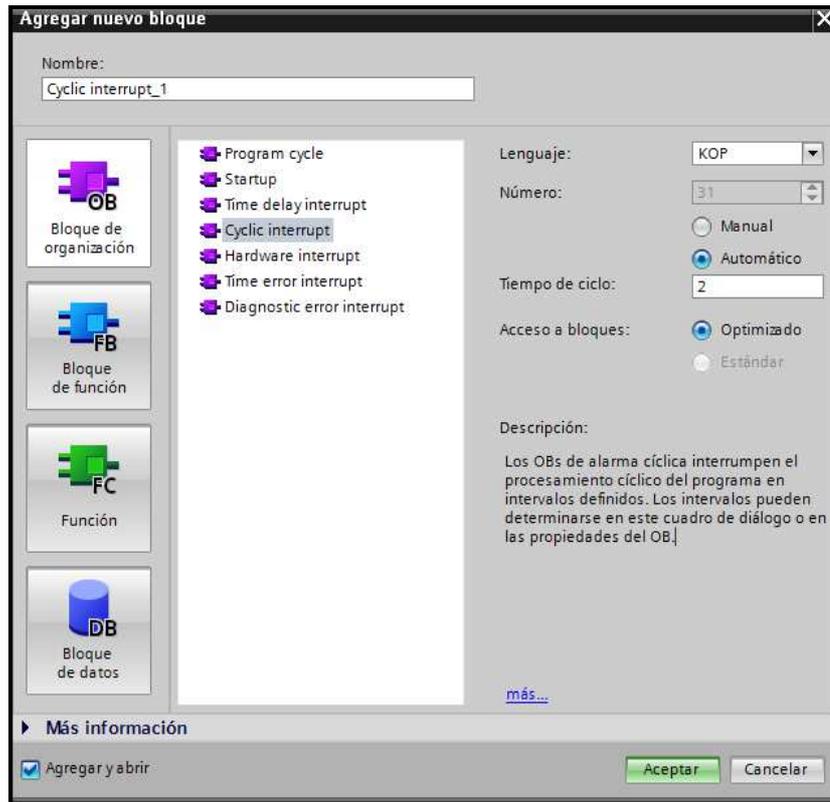


Fuente: Los autores

**Fig. 5.14** Bloque de programación PID.

Para obtener el bloque PID y programarlo, se debe seguir algunos pasos.

Primero se crea una interrupción cíclica (Cyclic interrupt) dentro del programa, para lo cual en la pantalla principal del programa “TIA Portal”, se da doble clic en “Agregar nuevo bloque” que se encuentra en el “Árbol de proyectos”, se escoge un “Bloque de organización”, dentro se selecciona “Cyclic interrupt”, y se coloca el mínimo tiempo de ciclo permitido que para este tipo de CPU es de 2 segundos.

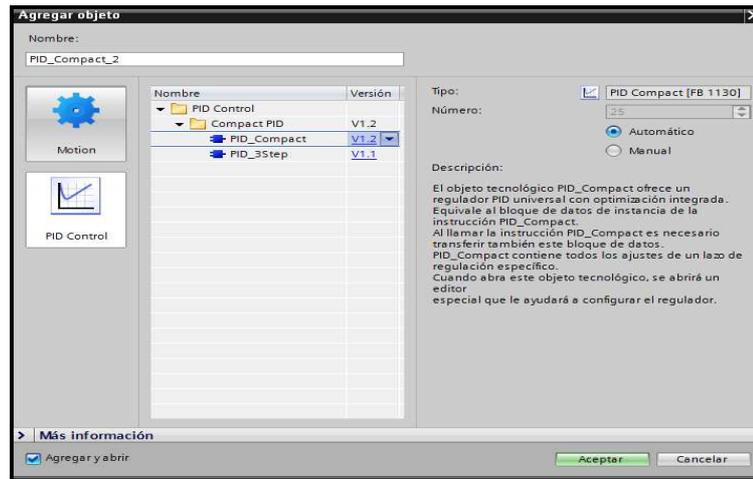


Fuente: Los autores

**Fig. 5.15** Cuadro de diálogo de programación del “Cyclic interrupt”.

Una vez creado un nuevo “Cyclic Interrup”, se lo abre y dentro de él se realiza la programación del bloque de control PID.

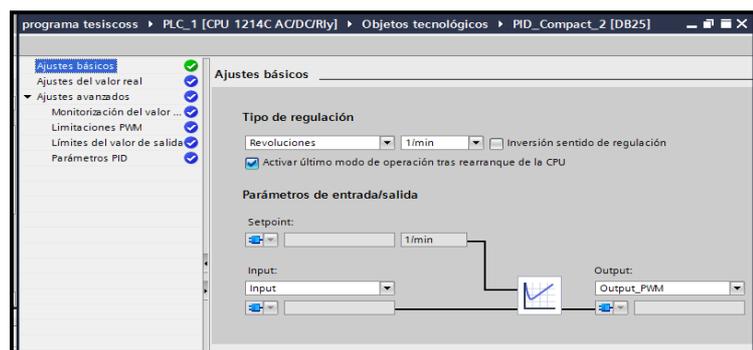
Para realizar la programación del bloque PID, primero se tiene que crear un nuevo “Objeto tecnológico”, para lo cual se debe dirigir a la carpeta “Objetos tecnológicos” del “árbol de proyecto” y se da doble clic en “Agregar un nuevo objeto tecnológico” y se escoge “PID Control”, una vez ahí se da doble clic en “PID\_Compact”, como se observa en la siguiente imagen:



Fuente: Los autores

**Fig. 5.16** Cuadro de dialogo para escoger el tipo de control PID.

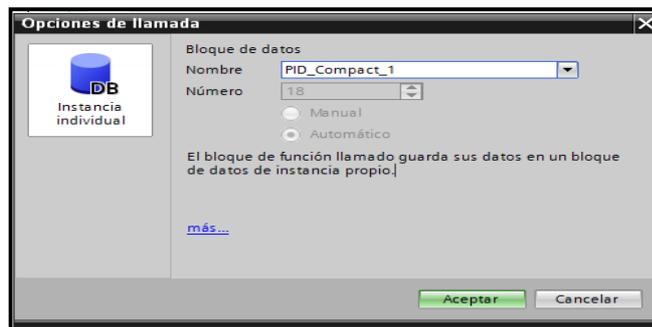
Una vez realizado esto se debe dar las condiciones en las cuales va a trabajar el controlador PID; por tanto el “tipo de regulación” en este caso debe ser de revoluciones por minuto, dentro de la variable entrada se coloca “Input”, y la salida del control PID tiene que ser de tipo PWM para con ello controlar la velocidad del motor DC de la banda, es así que se coloca la opción “Output\_PWM”.



Fuente: Los autores

**Fig. 5.17** Cuadro de dialogo para escoger el tipo regulación y parámetros de entrada y salida del bloque PID.

Una vez hecho esto se regresa al “Cyclic Interrupt”, en el cual se va insertar el bloque PID de la carpeta “PID Control” en la pestaña “Tecnología”, y se escoge “PID\_Compact”, y se la arrastra al “Cyclic Interrupt”, en el cual se muestra el siguiente cuadro de dialogo y se selecciona la opción “PID\_Compact\_1”.



Fuente: Los autores

**Fig. 5.18** Cuadro de dialogo para escoger la instancia en donde va a trabajar el PID.

Una vez colocado se debe ingresar el valor del “Set Point”, y las direcciones de la variable de entrada y salida, como se muestra en la figura 5.14.

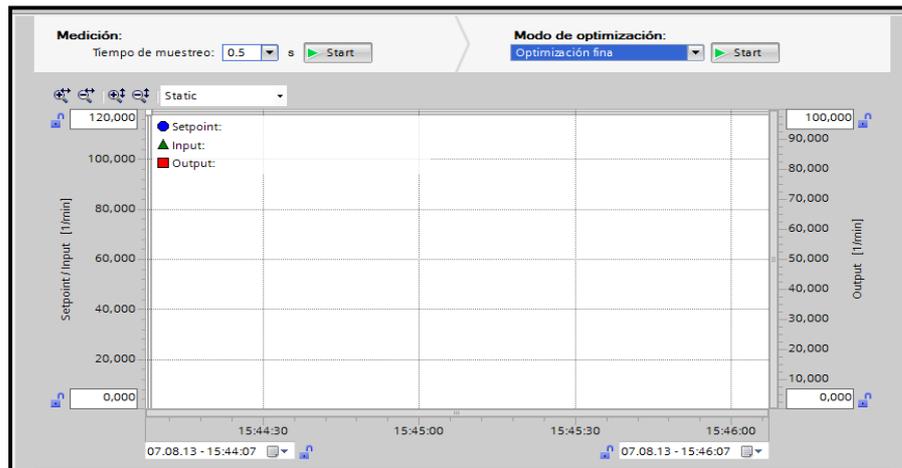
Posteriormente realizado esto se procede a la sintonización del módulo para el control de revoluciones de la banda, para lo cual se da clic en el botón de la esquina superior derecha del bloque PID.



Fuente: Los autores

**Fig. 5.19** Botón de puesta en servicio del bloque PID.

Una vez que se abre la pantalla de puesta en servicio (sintonización) del bloque PID, se procede a la realización de una “Optimización fina” la que se escoge en la pestaña de “Modo de optimización”, y a continuación se da clic en “Start”.



Fuente: Los autores

**Fig. 5.20** Ventana de puesta en servicio del bloque PID.

Se espera a que el estado de la optimización llegue a su fin para comprobar si la misma hace que la velocidad de la banda esté alrededor del “Set Point”, de ser necesario se debe realizar este proceso de optimización varias veces hasta obtener un resultado de acuerdo a las necesidades requeridas, con la finalidad que el valor de la velocidad se acerque lo más posible al valor del “Set Point”.

Una vez que por medio de la optimización se obtiene los resultados deseados, se da clic en el botón “Carga parámetros PID”, que se encuentra en la parte inferior de la ventana de puesta en servicio, por ultimo “Deshacemos la conexión online” y se carga el programa al PLC, y con eso se ha realizado la

sintonización PID de las revoluciones por minuto de la banda transportadora, para que trabaje a la velocidad óptima para el proceso.

Toda la programación que se implementa en el PLC se encuentra disponible en el anexo 5-3.

## CAPÍTULO 6

### IMPLEMENTACIÓN Y PRUEBAS DEL SISTEMA

#### 6.1 SISTEMA MECÁNICO

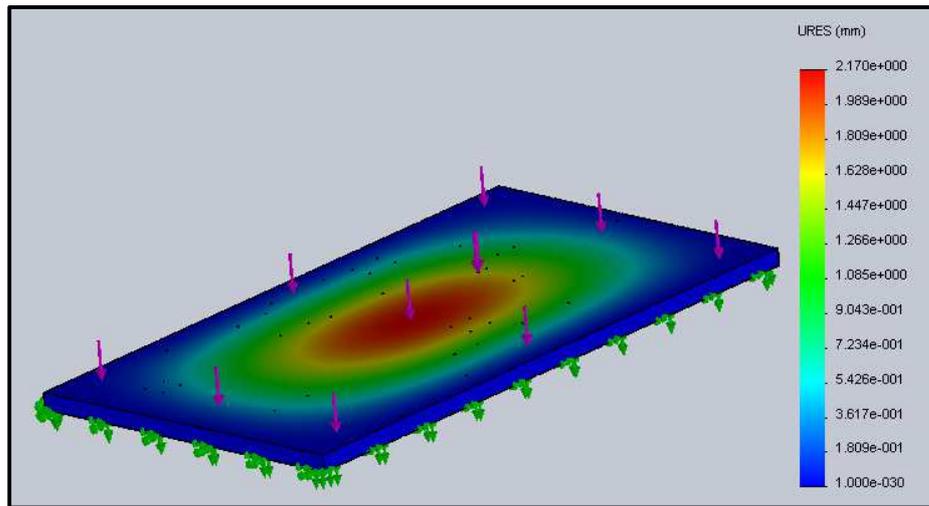
La implementación del sistema mecánico consta de tres partes que se consideran importantes dentro de todo el sistema general como son la estructura de bancada, la banda transportadora y el dispensador de tapas.

Para esto se utiliza materiales y elementos que poseen características apropiadas para cumplir la función establecida, que son seleccionados previo a un conjunto de análisis, pruebas y simulaciones.

##### 6.1.1 ESTRUCTURA GENERAL

Dentro de la estructura se encuentra la base general que es la que soporta todo el peso de los elementos que componen el sistema automático didáctico el cual es de 80 N aproximadamente.

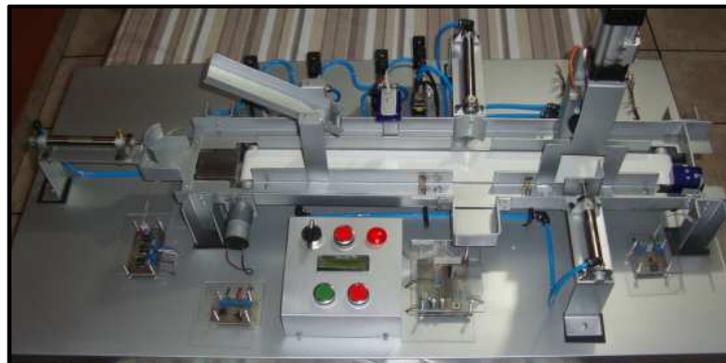
Está conformado por acero galvanizado de 0.75 mm de espesor, el cual es ampliamente utilizado en el área industrial para la fabricación de estructuras de maquinaria.



Fuente: Los autores

**Fig. 6.1** Simulación de deformación de la base general.

Al colocar sobre la base el resto del sistema se determina que la misma no presenta deformación ya sea en estado estático así como al momento de entrar en funcionamiento, por lo que se concluye que es apropiada para dicha función.

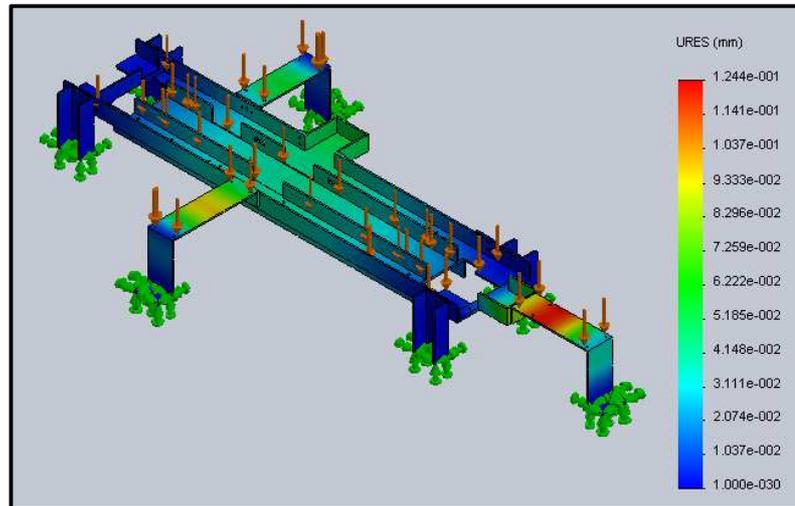


Fuente: Los autores

**Fig. 6.2** Implementación del sistema automático sobre la base general.

Así también se implementa la estructura de bancada que es sobre la cual se encuentra los cilindros neumáticos, los sensores, el dispensador, los motores y la banda transportadora; estos elementos generan un peso máximo aproximado

de 30 N. Está formado de aluminio 6061 de 3 mm de espesor el mismo que es utilizado para estructuras de sistemas didácticos.



Fuente: Los autores

**Fig. 6.3** Análisis de deformación sobre la estructura de bancada.

De manera similar al implementar la estructura no presenta deformaciones en ningún momento en especial al instante que se acciona la etapa de roscado que se considera la más crítica, y por tal razón también se concluye que es apropiada para la función asignada.



Fuente: Los autores

**Fig. 6.4** Implementación de la estructura de bancada.

### 6.1.2 BANDA TRANSPORTADORA

Esta parte se la considera importante dentro del funcionamiento de todo el proceso ya que es la encargada de trasladar los envases por todo el sistema. Con las pruebas realizadas se determina que la cinta debe tener una tensión adecuada para que mantenga un buen desplazamiento y actúe correctamente frente a la acción del controlador PID.

Para este propósito se utiliza los tornillos tensadores acoplados al rodillo secundario, los cuales permiten estirar hasta 15 mm más la cinta; las pruebas permiten determinar que con 10 mm la banda adquiere una tensión suficiente para el trabajo requerido. Otro aspecto a considerar es la fricción que existe entre la cinta de PVC y la placa de galvanizado que se encuentra bajo ella (0.42), donde se determina que dicho parámetro no afecta el desplazamiento de la cinta transportadora.



Fuente: Los autores

**Fig. 6.5** Tornillo tensador para la banda transportadora.

Además se toma en cuenta la altura que posee la cinta respecto a la salida de los envases en caso de ser separados, ya que de no encontrarse colineales puede ocasionar la caída de los mismos. Sin embargo durante las pruebas se observa que la salida de las botellas es correcta, esto debido también a que no existe separación entre la cinta y la base de la banda transportadora.



Fuente: Los autores

**Fig. 6.6** Salida de botellas defectuosas.

### **6.1.3 DISPENSADOR DE TAPAS**

Como se mencionó en el capítulo tres según el criterio de diseño de tolvas de obtuvo el valor del ángulo de inclinación ( $30^\circ$ ) necesario para que las tapas salgan y se coloquen sobre los envases sin ningún problema. Para este propósito se diseñó dos tipos de dispensadores de acero galvanizado con un coeficiente de fricción bajo (entre acero y PVC de 0.42) que permite un buen deslizamiento de las tapas; el primero tiene un depósito vertical con forma cuadrada en donde se colocan las tapas antes de su salida, y una pequeña mesa inclinada.



Fuente: Los autores

**Fig. 6.7** Opción uno para dispensador.

El problema con este diseño es que se genera un atascamiento de la tapa que pasa del depósito a la parte inclinada impidiendo la salida de las demás; esto se debe a que dicho depósito tiene la longitud de sus lados más grande que el diámetro de las tapas, haciendo que no se coloquen verticalmente una encima de otra. La segunda opción es una mesa inclinada con capacidad para 5 tapas la cual tiene a su salida dos acoples de caucho que ayudan a sostener la tapa hasta que sea retirada por la botella; además tiene una placa de contrapeso que permite colocar la tapa alineada al cuello o pico del envase.



Fuente: Los autores

**Fig. 6.8** Opción dos para dispensador.

Por lo tanto las pruebas realizadas con este tipo de dispensador ayudan a seleccionar a la misma como la opción más apropiada y eficiente, ya que el deslizamiento y colocación de las tapas es correcta.

## 6.2 SISTEMA NEUMÁTICO

El sistema consta de elementos básicos como son cuatro cilindros neumáticos que se los consideran pilares fundamentales dentro del accionar del sistema, ya que son los encargados de suministrar, separar, sujetar y desplazar el motor de roscado para tapar los envases plásticos el momento que se requiera.

**Tabla 6.1** Descripción general de los cilindros neumáticos.

| Cilindro           | Elemento de accionamiento      | Función   |
|--------------------|--------------------------------|---|
| <b>Abastecedor</b> | Electroválvula 3/2 monoestable | Coloca las botellas sobre la balanza y la banda transportadora.                           |
| <b>Separador</b>   | Electroválvula 3/2 monoestable | En función al sistema de control de calidad separa las botellas consideradas defectuosas. |
| <b>Sujetador</b>   | Electroválvula 3/2 monoestable | Sostiene fijamente el envase para que se enrosque la tapa.                                |
| <b>De roscado</b>  | Electroválvula 5/2 biestable   | Desplaza verticalmente el motor de roscado que realiza el roscado de la tapa.             |

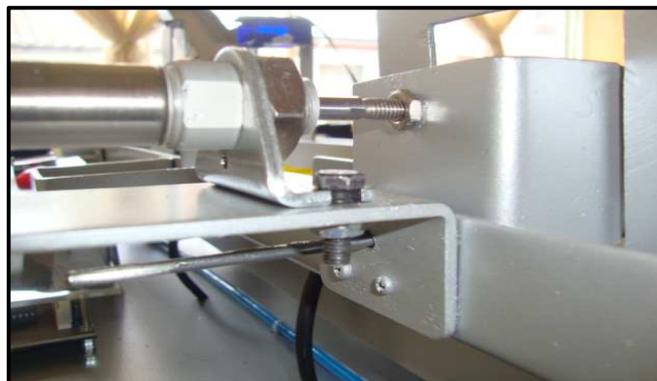
Fuente: Los autores

El laboratorio posee un compresor de 4 bares que mediante los cálculos realizados en el capítulo tres ayudan a determinar que el mismo es apropiado

para alimentar el sistema, donde sus elementos están conectados con manguera flexible de  $\frac{1}{4}$  de pulgada.

Las pruebas realizadas a este sistema muestran que tanto los pistones de ingreso y de separación en su primer accionamiento tienen mayor fuerza de salida de la requerida, motivo por el cual los envases son golpeados bruscamente provocando su caída; por tal motivo para evitar este inconveniente se colocan las botellas a partir de la segunda salida de los dos cilindros.

Así también aplicada la alimentación neumática se observa una desventaja en los cilindros la cual es que el vástago de cada uno gira sobre su propio eje haciendo que las placas acopladas también giren, ocasionando un problema como es la salida total y el retorno parcial del vástago. Por tal razón se acopla de manera adicional una guía para la placa tipo U paralela al vástago del pistón de separación con la finalidad de eliminar el giro indebido de la placa; de igual manera se utiliza una guía para la placa tipo L paralela al vástago del pistón de sujeción.



Fuente: Los autores

**Fig. 6.9** Guía acoplada al cilindro de sujeción.

## 6.3 SISTEMA ELÉCTRICO-ELECTRÓNICO

El sistema consiste en un conjunto de elementos como sensores, motores, circuitos eléctricos, y un panel de control; conectados entre sí mediante cable eléctrico de instrumentación 5X20 que soporta una corriente de 1.6 A, ideal para el trabajo en el que se utiliza el sistema.

### 6.3.1 SENSORES

El sensor de la balanza electrónica es el primero en ser implementado dentro del sistema, está formada por una celda de carga tipo monoplato y cuatro galgas extensiométricas en configuración de puente completo.

Durante las pruebas se tienen inconvenientes como es el caso de que el dato presenta una gran variación al momento de colocarse un envase sobre la balanza, dicha variación oscila aproximadamente entre los  $\pm 15$  gramos por lo que resulta muy inestable.



Fuente: Los autores

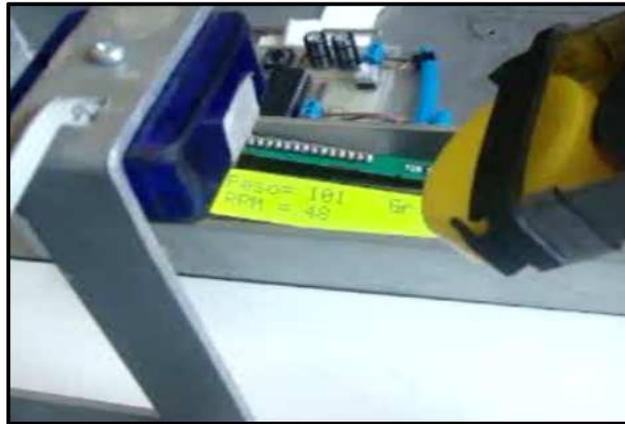
**Fig. 6.10** Pruebas de funcionamiento dato inestable del peso.

El problema se genera por dos factores, uno el ruido que se introduce en la señal de las galgas y otro las vibraciones ocasionadas por el motor de la banda transportadora. Para lo tanto se procede de la siguiente manera:

- Aislamiento de las tierras.- Este método consiste en separar o aislar las tierras una de otra; de las electroválvulas, de los sensores, de la placa del microcontrolador y utilizar una fuente adicional para los dos motores. Esto debido a que dichos motores provocan ruido que entra por la tierra y también por el cambio de los valores de análogo a digital, ya que las galgas presentan gran sensibilidad.
- Circuito de filtrado.- Este circuito ayuda a reducir de manera considerable la variación en la señal amplificada de las galgas cuyo dato se visualiza en el LCD, y se coloca entre los circuitos de acondicionamiento de la balanza y del microcontrolador.
- Mesa para balanza.- Inicialmente la mesa era de aluminio la cual se sujetaba en la estructura de bancada, sin embargo para reducir los inconvenientes por vibración se cambia la base tanto de posición como de material, es decir ahora está sujeta a la base general y es de acrílico de 3 milímetros de espesor.

Con estos cambios se observa un mejoramiento considerable en la toma del dato de la masa es decir ahora la variación se encuentra en el rango de  $\pm 1$  gramo; tomando en cuenta también que la dosificación de las botellas es de

manera manual, lo que no garantiza un peso ideal de 100 gramos. Además esta señal acondicionada es tomada por el PLC para la etapa de control de calidad.

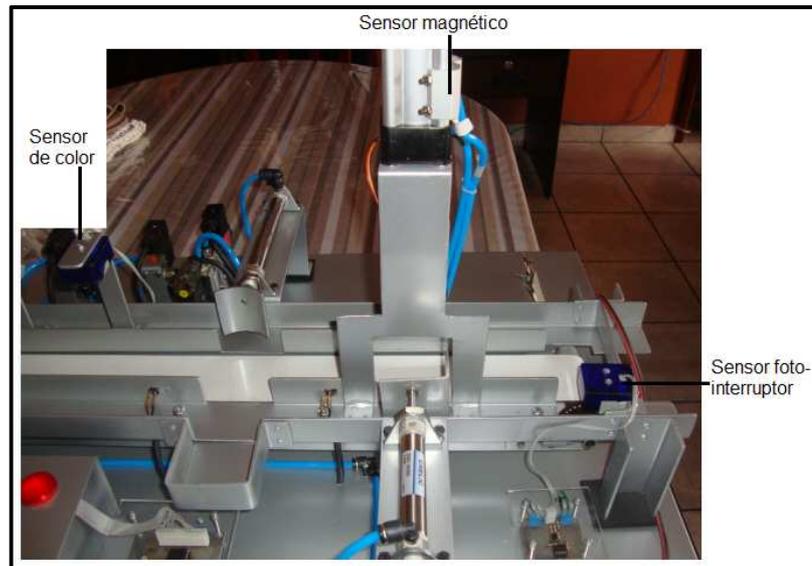


Fuente: Los autores

**Fig. 6.11** Dato del peso luego de los cambios propuestos.

El segundo sensor implementado es el de color óptico reflexivo, que se encuentra sobre un soporte vertical con una altura de 132 mm respecto a la banda transportadora para poder sensor las tapas colocadas sobre las botellas; el sensor tiene un alcance de 5 mm, y mediante las pruebas de funcionamiento realizadas se determina que la distancia es suficiente para poder realizar su función.

También se implementa un sensor magnético en el pistón de roscado para activar la electroválvula biestable y permita el retorno del vástago. Y finalmente se acopla el sensor foto-interruptor (tipo slot) sobre el disco encoder para que permita obtener las revoluciones del rodillo; estos dos sensores durante las pruebas no presentan ningún inconveniente.



Fuente: Los autores

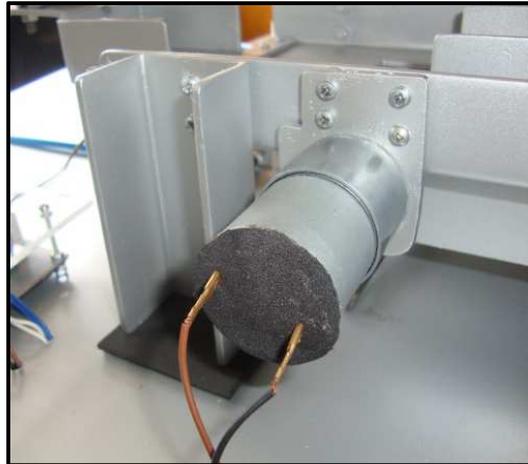
**Fig. 6.12** Sensor óptico reflexivo, magnético y foto-interruptor.

### 6.3.2 MOTORES ELÉCTRICOS

Es importante recordar que para los dos motores se utiliza una fuente independiente del resto con el fin de evitar que la señal que genera la balanza sea alterada especialmente por el ruido.

#### 6.3.2.1 Motor para banda transportadora

El motor se acopla a la banda mediante un matrimonio que lo une al rodillo motriz y a su vez se sujeta a la estructura mediante una placa de aluminio. Con el motor en marcha se observa que posee el torque necesario para mover la banda y que no existe influencia alguna del peso de los envases sobre la velocidad de la cinta.



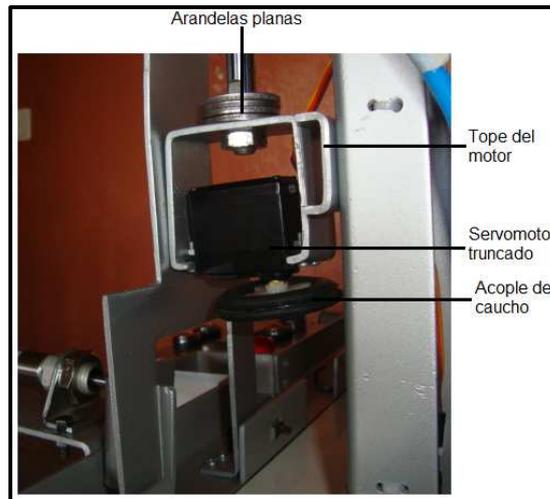
Fuente: Los autores

**Fig. 6.13** Motor eléctrico implementado en el sistema.

### **6.3.2.2 Motor para roscado de tapas**

El servomotor truncado está sujeto al vástago del cilindro de roscado para que de esta manera suba, baje y pueda enroscar las tapas; además mediante arandelas planas se puede manipular la altura del motor para de esta forma evitar que el envase sea aplastado.

Con las pruebas realizadas se observa que es necesario un empuje previo sobre la tapa ya que existe casos en que se coloca de manera inclinada debido al hilo de rosca propio de los envases; por tal motivo el motor realiza dos movimientos en cada etapa de roscado: el primero para ubicar correctamente las tapas y el segundo para ejecutar el roscado de las mismas con la ayuda de un acople de caucho que se implementa en su eje; de esta manera se consigue que el proceso sea correcto.



Fuente: Los autores

**Fig. 6.14** Motor eléctrico de roscado y sus elementos.

## 6.4 CIRCUITOS ELECTRÓNICOS

El sistema general utiliza un número de siete circuitos con funciones específicas como amplificación, acondicionamiento, filtrado, entre otras. Dentro de estos dispositivos los circuitos de amplificación para los sensores óptico y foto-interruptor responden adecuadamente de tal manera que la señal enviada por estos al PLC es reconocida sin problema permitiendo utilizarla para la etapa de control.

Para las galgas se utiliza dos circuitos uno de amplificación y acondicionamiento de la señal, ya que esta se encuentra en el rango de los milivoltios y a su vez se realiza un pre-filtrado a la entrada de la señal al circuito utilizando un puente pasa bajo.

Mientras que el segundo circuito permite filtrar nuevamente la señal antes de ser tomada por el microcontrolador y reducir la variación del dato que se

visualiza en el LCD; luego de varias pruebas realizadas se tiene como resultado una reducción considerable de dicho cambio, de un rango inicial de  $\pm 15$  gramos a  $\pm 1$  gramo, considerando también que la dosificación de los envases es manual.

Para verificar los datos del peso y revoluciones se implementa un circuito que tiene como elemento principal el microcontrolador 16F877A, que durante su funcionamiento permite visualizar el valor de las variables mencionadas de manera inmediata.

Así también se utiliza otro circuito para el motor eléctrico de la banda transportadora que permite separar la parte de control (el PWM) de la parte de potencia.



Fuente: Los autores

**Fig. 6.15** Circuito implementado para el motor de la banda.

Finalmente se implementa un circuito general a donde llega todo el cableado del sistema, para ser conectado tanto a las fuentes de alimentación como al PLC a través de un cable estructurado 20 AWG con conector DB-25, cuyo funcionamiento es idóneo.

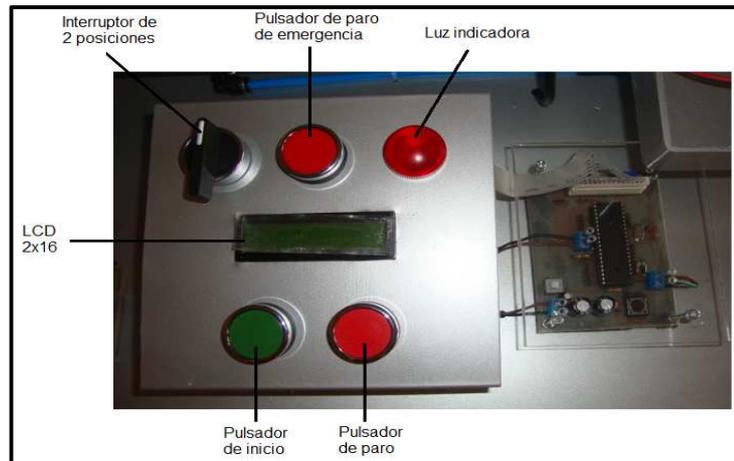
**Tabla 6.2** Descripción de las borneras de la placa general.

| BORNERA    | DESCRIPCIÓN                 | BORNERA    | DESCRIPCIÓN                       |
|------------|-----------------------------|------------|-----------------------------------|
| <b>J2</b>  | Interruptor 1 y 2           | <b>J12</b> | Electroválvula de separado        |
| <b>J3</b>  | Alimentación 24 V           | <b>J13</b> | Electroválvula de roscado entrada |
| <b>J4</b>  | Alimentación 5 V para PIC   | <b>J14</b> | Electroválvula de roscado salida  |
| <b>J5</b>  | Sensor de color             | <b>J15</b> | Motor de roscado                  |
| <b>J6</b>  | Sensor para encoder         | <b>J16</b> | Luz indicadora del panel          |
| <b>J7</b>  | Sensor magnético            | <b>J17</b> | PWM Motor de la banda             |
| <b>J8</b>  | Pulsador Paro de emergencia | <b>J18</b> | Pulsador de inicio                |
| <b>J9</b>  | Pulsador de Paro            | <b>J19</b> | Interruptor del panel             |
| <b>J10</b> | Electroválvula de Ingreso   | <b>J20</b> | Balanza electrónica               |
| <b>J11</b> | Electroválvula de sujeción  | <b>J21</b> | Alimentación para balanza         |

Fuente: Los autores

## 6.5 PANEL DE CONTROL

Un sistema automático debe poseer un método de interfaz (HMI) ya sea virtual o físico. En este caso la máquina tiene un tablero de control que permite la interfaz con el operario de manera directa. Así también mediante pruebas se determina que el funcionamiento del mismo es correcto y responde de manera inmediata.



Fuente: Los autores

**Fig. 6.16** Tablero de control del sistema didáctico.

**Tabla 6.3** Descripción del panel de control.

| ELEMENTO                            | CANTIDAD | DESCRIPCIÓN  |
|-------------------------------------|----------|--|
| <b>Interruptor de 2 posiciones</b>  | 1        | Permite activar los pulsadores del panel de control, así también alimentar con 24 V los elementos que lo requieren como sensores de color, encoder y electroválvulas.                    |
| <b>Pulsador normalmente abierto</b> | 1        | Se utiliza como un botón de encendido ya que permite iniciar el funcionamiento del sistema.  |
| <b>Pulsador normalmente cerrado</b> | 2        | El primero se utiliza como botón para detener el sistema luego que un envase sea retirado o tapado, mientras que el segundo actúa como paro de emergencia en caso de cualquier percance. |
| <b>Luz indicadora</b>               | 1        | Se utiliza como referencia para indicar si el envase cumple el control de calidad.   |
| <b>LCD 2x16</b>                     | 1        | Ayuda a visualizar los datos tanto del peso del envase así como de las revoluciones por minuto de la banda.  |

Fuente: los autores.

## 6.6 SISTEMA DE CONTROL

En este punto al sistema de control se lo considera ya como el funcionamiento completo de toda la planta, por tanto las pruebas a este sistema se realizan mediante la implementación del programa en el PLC; es decir verificar el trabajo total del equipo y que permita analizar el comportamiento tanto individual como conjunto de cada etapa.

### 6.6.1 CONTROL DE CALIDAD

Mediante las pruebas realizadas se determina que el funcionamiento de esta etapa es correcto, ya que sus dos sub etapas trabajan de manera coordinada es decir que si el peso se encuentra en los 100 gramos y la tapa previamente colocada por el dispensador es de color amarillo el cilindro de separación no actúa permitiendo que el envase pase a la fase de tapado; caso contrario de no poseer uno o los dos parámetros establecidos el pistón retira el envase de la banda transportadora.



Fuente: Los autores

**Fig. 6.17** Tapa colocada sobre el envase.

### 6.6.2 TAPADO DE BOTELLAS

Accionado por el interruptor 2 los tres elementos que conforman esta etapa también trabajan coordinadamente, en base a las pruebas realizadas con el programa elaborado el pistón de sujeción mantiene estable al envase mientras el cilindro de roscado realiza dos movimientos, el primero para presionar la tapa sobre el envase mientras que el segundo para el proceso de roscado con el servomotor accionado.



Fuente: Los autores

**Fig. 6.18** Proceso de roscado.

### 6.6.3 CONTROLADOR PID

Se implementa en el PLC y permite controlar la velocidad de la banda transportadora con la ayuda del disco encoder y del sensor foto-interruptor (tipo slot), al momento que se realizan las pruebas el mismo logra establecerse aproximadamente a 48 RPM en cinco segundos. La velocidad constante con la

que se desplaza la cinta es muy importante al momento de elaborar y ejecutar el programa, ya que en función a esta se consideran varios tiempos de accionamiento como es el caso del pistón de separado y de los pistones de la etapa de roscado, los cuales actúan un segundo después que los interruptores son presionados garantizando un manejo apropiado de cada envase.

#### **6.6.4 CONTROL CON EL PANEL**

De igual manera con el programa elaborado se puede activar los pulsadores del panel que permiten controlar el sistema, como es el caso del pulsador de inicio que permite ejecutar el programa, el pulsador de paro que desactiva la ejecución del programa luego de que un envase sea retirado o roscado y el pulsador de paro de emergencia.

A continuación se encuentra una tabla donde se muestran los resultados obtenidos en función a la realización de pruebas de funcionamiento donde todos los envases se dirigen hacia la etapa de roscado (sin control de calidad), para verificar el funcionamiento del mismo.

## CAPÍTULO 7

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### CONCLUSIONES

1. El proceso es un sistema integrado donde existen varios elementos con diferentes características de funcionamiento que trabajan al mismo tiempo, esto hace que el ruido eléctrico sea un factor importante a tomar en cuenta, en especial para elementos sensibles a este tipo de señales que se producen durante el proceso.
2. El control de velocidad de la banda transportadora es un parámetro importante dentro del funcionamiento del equipo, ya que permite sincronizar el accionamiento del sistema neumático y así garantizar que el ciclo de trabajo se cumpla.
3. Dentro de los procesos de abastecimiento y roscado de tapas, el hilo de rosca es un elemento que influye en el posicionamiento de las mismas sobre los envases; por tal motivo la placa de contrapeso en el abastecedor y el doble movimiento del pistón de roscado alinean la tapa sobre la botella.
4. Se utiliza dos tipos de controladores uno robusto de uso industrial como es el PLC y otro de tipo encapsulado como es el microcontrolador PIC, esto se justifica debido a que es un módulo didáctico de aprendizaje donde es importante manejar varios tipos de controladores lo que

conlleva el uso de diferentes tipos de programación. En aplicaciones industriales se debe utilizar únicamente un PLC.

## RECOMENDACIONES

1. Ya que existen varios elementos que producen ruido eléctrico que va desde la propia fuente de alimentación hasta elementos críticos como el motor de la banda, se recomienda que la calibración de la celda de carga se realice con el sistema operando.
2. Para usos industriales se recomienda la atención en el sistema de tapado pues en el módulo didáctico se detectó un pequeño porcentaje de errores.
3. Dentro del funcionamiento del sistema se recomienda utilizar envases con un peso mínimo de 90 gramos, esto con la finalidad de evitar problemas al momento de la colocación de una tapa ya que cada botella recoge una de estas por medio del impulso proporcionado por la banda transportadora y también gracias a su peso que le brinda estabilidad.
4. Debido a que el funcionamiento del sistema depende de la velocidad de la banda transportadora y de temporizadores para la sincronización de las diferentes etapas, se recomienda la implementación de sensores adicionales dentro del sistema que ayuden a reducir esta dependencia.

## REFERENCIAS

Creus, A. (1997). *Instrumentación Industrial*. Barcelona: Marcombo S. A.

Mànuel, A. y Biel, D. (2002). *Instrumentación virtual*. México D. F.: Alfaomega

Dumm, W. (2005). *Fundamentals of industrial instrumentation and process control*. New York: McGraw Hill

Balcells, J. y Romeral, J. (1997). *Autómatas Programables*. Barcelona: Marcombo S. A.

Guillén, A. (1993). *Introducción a la neumática*. Barcelona: Marcombo S.A.

Mandano, E. y Mandano, Y. (2008). *Sistemas electrónicos digitales*. Barcelona: Marcombo S. A.

Angulo, J. y Angulo, I. (2003). *Microcontroladores PIC diseño práctico de aplicaciones*. Madrid: McGraw Hill

Cembranos, F. (2007). *Automatismos eléctricos neumáticos e hidráulicos*. Madrid: Paraninfo

Álvarez, M. (2012). *Electroimanes*. San Vicente: Club Universitario

Lladonosa, V. (1997). *Circuitos básicos de electroneumática*. Barcelona: Marcombo S. A.

Roldán, J. (2012). *Tecnología y circuitos de aplicación de neumática, hidráulica y electricidad*. Madrid: Paraninfo

Bolton, W. (2001). *Mecatrónica Sistemas de control electrónico en Ingeniería Mecánica y Eléctrica*. México D. F.: Alfaomega

Lewis, P. y Yang, C. (1999). *Sistemas de control en Ingeniería*. Madrid: Prentice Hall

Elias, X. y Jurado, L. (2012). *Los plásticos residuales y sus posibilidades de valoración*. Madrid: Díaz de Santos

Smith, W. y Hashemi, J. (2006). *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*. México D.F.: McGraw Hill

Mott, R. (2006). *Diseño de Elementos de Máquinas*. México D.F.: Pearson Educación

Budynas, R. y Nisbett J. (2012). *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley*. México D.F.: McGraw Hill

Norton, R. (1999). *Diseño de Máquinas*. México D.F.: Prentice Hall Hispanoamérica S.A.

Creus, A. (2011). *Neumática e Hidráulica*. Barcelona: Marcombo S.A.

Millan, S. (1995). *Automatización neumática y electroneumática*. Barcelona: Marcombo S.A.

# ANEXOS