

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

TÍTULO DEL PROYECTO

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE MÁQUINA
VENDING INVERSA PARA LA ACEPTACIÓN, COMPACTACIÓN
Y ALMACENAMIENTO DE BOTELLAS PET DE 250 A 3000cm³
PARA SERPRA CÍA. LTDA.”**

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

REALIZADO POR:

**RUBÉN EMILIANO ALBÁN NARANJO
PABLO ALEJANDRO DEL HIERRO CALVACHI**

DIRECTOR: ING. PEDRO MERCHÁN

CODIRECTOR: ING. ALEXANDER IBARRA

Sangolquí, 08 de Marzo de 2013

CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO

El proyecto “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE MÁQUINA VENDING INVERSA PARA LA ACEPTACIÓN, COMPACTACIÓN Y ALMACENAMIENTO DE BOTELLAS PET DE 250 A 3000cm³ PARA SERPRA CÍA. LTDA.” fue realizado en su totalidad por Rubén Emiliano Albán Naranjo y Pablo Alejandro Del Hierro Calvachi, como requerimiento parcial para la obtención del título de Ingeniero en Mecatrónica.

Ing. Pedro Merchán

DIRECTOR

Ing. Alexander Ibarra

CODIRECTOR

Sangolquí, 08 de Marzo de 2013

LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO

“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE MÁQUINA VENDING
INVERSA PARA LA ACEPTACIÓN, COMPACTACIÓN Y ALMACENAMIENTO
DE BOTELLAS PET DE 250 A 3000cm³ PARA SERPRA CÍA. LTDA.”

ELABORADO POR:

Rubén Emiliano Albán Naranjo

Pablo Alejandro Del Hierro Calvachi

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

Ing. Hernán Lara

Director de la Carrera de Ingeniería Mecatrónica

Sangolquí, 08 de Marzo de 2013

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

AUTORIZACIÓN

Nosotros: Rubén Emiliano Albán Naranjo y Pablo Alejandro Del Hierro Calvachi

Autorizamos a la Escuela Politécnica del Ejército la publicación, en la biblioteca virtual de la institución del proyecto de grado titulado: “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE MÁQUINA VENDING INVERSA PARA LA ACEPTACIÓN, COMPACTACIÓN Y ALMACENAMIENTO DE BOTELLAS PET DE 250 A 3000cm³ PARA SERPRA CÍA. LTDA.”, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Rubén Emiliano Albán Naranjo

Pablo Alejandro Del Hierro Calvachi

Sangolquí, 08 de Marzo de 2013

DEDICATORIA

El presente proyecto está dedicado a Dios, a mis padres, a mis hermanas y a toda mi familia por haberme brindado su apoyo incondicional para facilitar la finalización de mis estudios.

A ustedes, Pablo, Jeannette, Anita y Verónica.

En especial quiero dedicarle toda mi carrera de estudios y todos mis logros, triunfos, luchas y derrotas a la persona más valiosa, tierna, inteligente, honesta, humilde, visionaria y amorosa que he conocido en toda mi vida y quien ha sido y seguirá siendo mi inspiración y ejemplo en el mundo de la ingeniería.

A usted mi querido Papá Guillo.

PABLO ALEJANDRO DEL HIERRO CALVACHI.

DEDICATORIA

Por la compañía de su luz, desde la más tenue sombra hasta las más atroz de las oscuridades.

Por el abrazo amorosamente eterno que mi alma necesita y que jamás lo han negado.

Por su sabiduría nacida de luchas y sacrificios, alimento de las mías.

Por sus historias y cada memoria contada, recuerdos de jamás rendirse.

Por las primeras letras y versos, poesía de humanidad profunda, el nacimiento de mi sensibilidad.

Por enseñarme el amor a la ciencia, la que nos hace más humanos.

Por ser siempre mis amigos, compañeros y confidentes.

Porque todo lo que soy es una extensión de ustedes, mis más grandes maestros.

A ustedes, *Gardenia* y *Patricio*, mis padres.

RUBÉN EMILIANO ALBÁN NARANJO

“Seamos realistas y hagamos lo imposible”

Ernesto Che Guevara

AGRADECIMIENTOS

Al culminar mis estudios con el presente proyecto de grado quiero agradecer en primer lugar a Dios y a mis padres *Pablo y Jeanette*, a mis hermanas *Anita y Verónica*, a mi ñaño *Gustavo*, a mi primo *Andrés* y al *Miguelón* por haber confiado en mí y por brindarme su apoyo en todo sentido en el transcurso de mi carrera. Quiero agradecer a mis compañeros socios y amigos *Rubén y Jibán* por su apoyo en el desarrollo de éste proyecto al suplir muchas veces mis responsabilidades en nuestro "*Humilde Local*". También quiero agradecer a la gran familia de *APM* en especial a *Dianita* y a mi maestro, amigo y mentor *Fabián* por haberme enseñado mejor que cualquier profesor la magia, el respeto, la pasión y el agrado por la programación de microcontroladores. Agradezco inmensamente a *SERPRA CIA. LTDA*, en especial a Jorge, Andrés, Iván, Hernán, Eddy, Eduardo y a todos quienes la conforman por brindarme su confianza y apoyo en la realización de éste proyecto. Finalmente quiero agradecer a la mujer más inteligente, hermosa y valiosa que Dios me brindó la oportunidad de llegar a conocer y enamorarme la cual ha sido para mí una inspiración y un apoyo constante durante la culminación de éste proyecto de grado, gracias mi *Sara* preciosa.

PABLO ALEJANDRO DEL HIERRO CALVACHI.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, *Gardenia* y *Patricio* la más sincera e infinita de las gratitudes por la fe y esperanza que han depositado en mí, son la inspiración más grande que tengo pues el amor que me profesan es definitivamente inexplicable y no cabe en ningún otro corazón que no sea el de ustedes. Son seres nada comunes y valiosos desde cualquier punto de vista. Mis triunfos, aunque muy pocos, siempre serán suyos.

A mi hermano, *Carlos*, que con su singular filosofía, muchas de las veces antagónica a la mía, ha sido un pilar fundamental en mi formación académica y profesional pues he aprendido que la unidad no hace referencia a uno todo idéntico sino a reconocernos como a un todo colmado de diferencias en un mismo mundo para todos.

A ti *Anita* que has sido la compañera amiga que ha recorrido conmigo tantos difíciles caminos, fiel e incondicional en las derrotas y victorias. Gracias por tu cariño y el cariño de tu familia que me ha apoyado y me ha hecho sentir uno más de ustedes.

A mis compañeros, mis amigos de aula: *Alejo, Stalin, Oso, Jorgito, Mamadita, Miltiton, Haritold, Luchito, Diego, Patito, Llopito*, por las alegrías, las tristezas, la bohemia que compartimos en los desvelos universitarios.

A mis amigos APM, *Pablo* y *Jibán* por la oportunidad de ser parte del '*Humilde Local*' y compartir tantas experiencias profesionales y no tan profesionales.

A ti *Liz* que con el amor y apoyo que me brindas has hecho que todo sea más simple.

A *SERPRA CIA. LTDA* por creer en nosotros y darnos la oportunidad de desarrollar este proyecto. El éxito necesita alimentarse de paciencia.

A todos mis compañeros que caminaron conmigo en este proceso y que siempre tenían algo que enseñarme.

RUBÉN EMILIANO ALBÁN NARANJO

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE CONTENIDOS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
ÍNDICE DE TABLAS	xix
RESUMEN	xxii

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO I	1
1.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO	1
1.1.1. ANTECEDENTES	1
1.1.2. JUSTIFICACIÓN	2
1.1.3. OBJETIVOS	5
1.1.3.1. General	5
1.1.3.2. Específicos	5
1.1.4. ALCANCE DEL PROYECTO	6
1.2. MARCO TEÓRICO	6
1.2.1. MÁQUINAS VENDING	6
1.2.1.1. Reseña histórica	7
1.2.1.2. Tipos de máquinas <i>vending</i> y aplicaciones	8
1.2.1.3. Funcionamiento de una máquina <i>vending</i> inversa	9
1.2.2. PET	10
1.2.2.1. Aplicaciones	10
1.2.2.2. Características y Propiedades Básicas	11
1.2.3. VISIÓN ARTIFICIAL	13
1.2.3.1. Factores y componentes a considerar para la implementación de Visión Artificial	15
1.2.4. Software para la Inspección Automática de Productos NI <i>Vision Builder</i> ® AI 2009	16
1.3. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE DISEÑO MECATRÓNICO	18
1.3.1. IDENTIFICACIÓN DE LA NECESIDAD	20
1.3.2. ANÁLISIS DEL PROBLEMA	21
1.3.3. DETALLE DE ESPECIFICACIONES	21
1.3.4. POSIBLES SOLUCIONES	22
1.3.5. SELECCIÓN DE SOLUCIÓN	24

1.3.6.	CONSIDERACIONES FINALES PARA EL DISEÑO	27
CAPÍTULO II		28
2.1.	CONSIDERACIONES GENERALES DE DISEÑO.....	29
2.2.	DISEÑO DE LA ESTRUCTURA	30
2.2.1.	ANÁLISIS ESTRUCTURAL.....	31
2.2.2.	SELECCIÓN DE MATERIALES Y ACCESORIOS	32
2.3.	DISEÑO DEL MECANISMO DE ACEPTACIÓN DE BOTELLAS	34
2.3.1.	SELECCIÓN DEL MECANISMO	34
2.3.2.	ANÁLISIS CINEMÁTICO	35
2.3.3.	DISEÑO DE PARTES Y ELEMENTOS CONSTITUTIVOS	38
2.4.	DISEÑO DEL SISTEMA DE COMPACTACIÓN Y ALMACENAMIENTO DE BOTELLAS 39	
2.4.1.	ENSAYO DE COMPRESIÓN EN BOTELLAS PET	39
2.4.1.1.	Propiedades básicas de las botellas a ensayar	40
2.4.1.2.	Medición de la fuerza de compactación	41
2.4.1.3.	Cálculo de la fuerza máxima de compactación.....	45
2.4.2.	DISEÑO DEL CIRCUITO DE POTENCIA NEUMÁTICO PARA LA COMPACTACIÓN	47
2.4.3.	SELECCIÓN DE COMPONENTES.....	48
2.4.3.1.	Cilindro neumático para compactación	49
2.4.3.2.	Compresor	57
CAPÍTULO III		65
3.1.	ANÁLISIS DEL PROCESO DE AUTOMATIZACIÓN.....	66
3.1.1.	DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO	66
3.1.2.	IDENTIFICACIÓN DE ETAPAS Y ESPECIFICACIONES	67
3.1.2.1.	Etapa de identificación y transporte	68
3.1.2.2.	Etapa de compactación y almacenamiento	69
3.1.2.3.	Etapa del sistema de pago	69
3.2.	SELECCIÓN DE DISPOSITIVOS DE INSTRUMENTACIÓN	69
3.2.1.	DEFINICIÓN DE PARÁMETROS FÍSICOS A DETECTAR EN UNA BOTELLA PET 70	
3.2.2.	TRATAMIENTO DE SEÑALES Y FILTRAJE.....	71
3.2.2.1.	Fase de Detección de Presencia de Objetos	72
3.2.2.2.	Fase de Pesaje	78
3.2.2.3.	Fase de Validación de Forma	84
3.2.2.4.	Fase de transporte	93
3.3.	SISTEMAS DE CONTROL	94
3.3.1.	ETAPA DE IDENTIFICACIÓN Y TRANSPORTE.....	95
3.3.1.1.	Sistema de Identificación	95
3.3.1.2.	Sistema de Transporte	97
3.3.2.	ETAPA DE COMPACTACIÓN Y ALMACENAMIENTO	144
3.3.3.	ETAPA DEL SISTEMA DE PAGO	146

3.4.	<i>SELECCIÓN DEL DISPOSITIVO PRINCIPAL DE CONTROL</i>	147
3.4.1.	CRITERIOS DE SELECCIÓN	147
3.4.2.	PROGRAMACIÓN	151
3.4.3.	PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN	154
3.4.4.	SIMULACIONES	155
3.5.	<i>SELECCIÓN DE FUENTES DE ALIMENTACIÓN ELÉCTRICA</i>	158
3.5.1.	DETERMINACIÓN DE CONSUMO ENERGÉTICO	158
3.6.	<i>DISEÑO DE CIRCUITOS IMPRESOS</i>	161
3.6.1.	CONSIDERACIONES DE DISEÑO DE PCBs	161
3.6.2.	ESQUEMAS PCB FINALES	163
CAPITULO IV		164
4.1.	<i>DISEÑO CONCEPTUAL</i>	165
4.1.1.	REQUERIMIENTOS DE LA INTERFAZ.....	165
4.1.1.1.	Componentes Principales.....	166
4.1.1.2.	Lazos de Programación	166
4.1.1.3.	Selección de dispositivos adicionales.....	168
4.2.	<i>ANÁLISIS DE ENTORNOS DE PROGRAMACIÓN</i>	169
4.2.1.	SELECCIÓN DEL LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN.....	169
4.2.2.	DISEÑO DEL ENTORNO DE LA INTERFAZ.....	170
4.2.2.1.	Determinación de componentes de audio y video	170
4.3.	<i>DESARROLLO Y PROGRAMACIÓN</i>	170
4.3.1.	HERRAMIENTAS DE PROGRAMACIÓN UTILIZADAS	170
4.3.2.	PROGRAMACIÓN DE LA INTERFAZ.....	173
4.3.3.	FORMATOS DE AUDIO, VIDEO E IMÁGENES.....	178
4.3.4.	PROTOCOLOS Y CONECTIVIDAD CON DISPOSITIVOS DE CONTROL.....	179
4.3.4.1.	Conectividad y enlace con dispositivos periféricos auxiliares	179
CAPÍTULO V		181
5.1.	<i>PRUEBAS Y RESULTADOS DE LA ETAPA DE IDENTIFICACIÓN Y TRANSPORTE</i> .	182
5.1.1.	SISTEMA DE IDENTIFICACIÓN	182
5.1.1.1.	Fase De Detección De Objetos	183
5.1.1.2.	Fase de Pesaje	184
5.1.1.3.	Fase de Validación de Forma	188
5.1.2.	SISTEMA DE TRANSPORTE	194
5.1.2.1.	Pruebas de los controladores de posición:	194
5.1.2.2.	Resultados de los controladores de posición	203
5.2.	<i>PRUEBAS Y RESULTADOS DE LA ETAPA DE COMPACTACIÓN Y ALMACENAMIENTO</i>	208
5.3.	<i>PRUEBAS Y RESULTADOS DE LA ETAPA DEL SISTEMA DE PAGO</i>	211
5.4.	<i>DETERMINACIÓN DE FACTORES DE FAL</i>	212
5.5.	<i>LA</i>	212

CAPÍTULO VI	214
6.1. CONCLUSIONES.....	214
6.2. RECOMENDACIONES.....	215
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	216
GLOSARIO DE TÉRMINOS.....	218

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Máquina <i>vending</i> dispensadora de bebidas calientes.....	6
Figura 1.2 Vending machine mecánica de estampillas postales	7
Figura 1.3 Máquinas <i>vending</i> contemporáneas	8
Figura 1.4 <i>Reverse Vending Machine</i> de botellas PET	9
Figura 1.5 Inspección Visual de Medicamentos	13
Figura 1.6 Inspección de nivel de líquido y sellado de botellas utilizando software de Visión Artificial	14
Figura 1.7 Factores importantes del sistema de visión.	15
Figura 1.8 Pantalla Principal de NI <i>Vision Builder</i> ® AI 2009	17
Figura 1.9 Componentes principales de la Ingeniería Mecatrónica.....	18
Figura 1.10 Etapas Básicas de un diseño concurrente	19
Figura 1.11 Proceso del diseño Mecatrónico	20
Figura 1.12 Problemas a Resolver.....	21
Figura 1.13 Áreas del diseño Mecatrónico a considerar	27
Figura 1.14 Herramientas CAE a utilizar	27
Figura 1.15 Normas y Consideraciones a tomar en cuenta en el diseño	28
Figura 2.1 Estructura de la RVM.....	29
Figura 2.2 Mecanismo de Compactación.....	30
Figura 2.3 Estructura de la RVM.....	31
Figura 2.4 Estructura de la RVM – Toma Frontal.....	33
Figura 2.5 Estructura de la RVM – Toma Lateral con puertas de acceso	34
Figura 2.6 Sistema Piñón-Cremallera implementado.....	39
Figura 2.7 Muestras de botellas PET	40
Figura 2.8 Máquina de Ensayos Universales MTS TK/T5002.....	42

Figura 2.9 Celda de carga tipo “S”	42
Figura 2.10 Indicador Inteligente AFTI Quantrol	43
Figura 2.11 Ensayo de Compresión de botellas PET	43
Figura 2.12 Resultados del ensayo de compactación	45
Figura 2.13 Circuito de potencia neumático del sistema de compactación	48
Figura 2.14 Código estándar para los cilindros CHANTO normalizados ISO 15552	52
Figura 2.15 Diagrama de Pandeo	54
Figura 2.16 Montaje del Cilindro de Doble Efecto Seleccionado.....	56
Figura 2.17 Diagrama de Consumo de Aire	57
Figura 2.18 Compresor SUN FB-140/7	65
Figura 3.1 Diagrama de Flujo del Proceso de Automatización	66
Figura 3.2 Orden de adquisición de datos	71
Figura 3.3 Detección de interferencia en cavidad cilíndrica de ingreso	72
Figura 3.4 Detección de presencia válida de objeto ingresado correctamente.	73
Figura 3.5 Principio de Funcionamiento de un Sensor Infrarrojo Refractivo de Tipo Industrial	73
Figura 3.6 Sensor Infrarrojo OPTEX CRD-300P seleccionado	75
Figura 3.7 Circuito de Conexión Sensor Infrarrojo OPTEX CRD-300P	75
Figura 3.8 Divisor de Voltaje	76
Figura 3.9 Señal de Salida del Sensor CRD-300P en bajo utilizando el acondicionamiento de señal seleccionado.....	77
Figura 3.10 Señal de Salida del Sensor CRD-300P en alto utilizando el acondicionamiento de señal seleccionado.....	77
Figura 3.11 Sensor piezoeléctrico	78
Figura 3.12 Modelo eléctrico de un sensor piezoeléctrico	79
Figura 3.13 Acondicionamiento para la señal de un sensor piezoeléctrico	79
Figura 3.14 Medición de voltaje en terminales de salida del sensor piezoeléctrico sin acondicionamiento sujeto a la bandeja de pesaje vacía.	80
Figura 3.15 Medición de voltaje en terminales de salida del sensor piezoeléctrico sin acondicionamiento con un objeto pesado.....	81

Figura 3.16 Medición de voltaje en terminales de salida del sensor piezoeléctrico sin acondicionamiento con una botella PET de 3000cm ³ llena de líquido.....	81
Figura 3.17 Tendencia lineal del sensor piezoeléctrico sin acondicionamiento	82
Figura 3.18 Circuito de acondicionamiento de señal utilizado para la celda de carga de comportamiento piezoeléctrico.....	84
Figura 3.19 Envases de botellas PET válidas.....	85
Figura 3.20 Objetos no válidos con características similares a una botella PET.....	85
Figura 3.21 Dimensiones a considerar para el cálculo de la resolución.....	85
Figura 3.22 Cámara USB de video FaceCam3000.....	87
Figura 3.23 Elementos del Procesamiento Digital de Imágenes.....	88
Figura 3.24 Entorno Físico de trabajo destinado a la Etapa de Identificación. Cavidad de validación.....	89
Figura 3.25 Cavidad de validación acondicionada.....	90
Figura 3.26 Adquisición de imagen en <i>Vision Builder</i> ® AI 2009 de la cavidad de identificación acondicionada.....	90
Figura 3.27 Herramienta de Extracción de planos.....	91
Figura 3.28 Herramienta de Extracción de planos.....	91
Figura 3.29 Herramienta de búsqueda de patrones.....	91
Figura 3.30 Herramienta para Clasificación de Objetos.....	91
Figura 3.31 Herramientas de Comunicación de Resultados.....	92
Figura 3.32 Resultados Obtenidos en la Fase de Validación de Forma para una botella PET de 500cm ³ con <i>Vision Builder</i> ® AI 2009.....	92
Figura 3.33 Diagrama de Flujo del Proceso de Validación de Forma.....	93
Figura 3.34 Configuración de un codificador angular de posición (encoder) óptico.....	94
Figura 3.35 Partes de la Etapa de Identificación y Transporte.....	95
Figura 3.36 Componentes del Sistema de Identificación.....	96
Figura 3.37 Diagrama de Flujo del Sistema de Identificación.....	97
Figura 3.38 Movimiento Lineal que ejerce la Tolva de Aceptación.....	98
Figura 3.39 Sistema Piñón-Cremallera con Motor DC acoplado.....	98
Figura 3.40 Sistema de control con retroalimentación en lazo cerrado.....	99

Figura 3.41 Diagrama del sistema de control principal – desplazamiento angular	100
Figura 3.42 Sistema de control secundario – control de movimiento rotativo a lineal	100
Figura 3.43 Sistema final de control para el transporte de los objetos	101
Figura 3.44 Conversión de movimiento del sistema Piñón - Cremallera.....	102
Figura 3.45 Diagrama de bloques de la conversión de movimiento del sistema Piñón- Cremallera	103
Figura 3.46 Carga mecánica del Sistema Piñón – Cremallera transmitida al motor de corriente continua	104
Figura 3.47 Esquema mecánico y eléctrico del motor CC con carga	105
Figura 3.48 Esquema de un motor CC.....	110
Figura 3.49 Interfaz de usuario para la adquisición de datos	113
Figura 3.50 Cable de comunicación adaptador USB a RS232	114
Figura 3.51 Compilador mikroBASIC®	114
Figura 3.52 Visualización en la interfaz de la adquisición de datos del sistema transportador.....	115
Figura 3.53 Respuesta sistema de transporte a un escalón de 18V	116
Figura 3.54 Ícono exportar de la interfaz de adquisición de datos	116
Figura 3.55 Visualización de los datos guardados.	117
Figura 3.56 Datos exportados al <i>Workspace</i> de Matlab®	117
Figura 3.57 Apertura de la herramienta de identificación de sistemas.....	118
Figura 3.58 Herramienta de identificación de sistemas.....	118
Figura 3.59 Proceso de importación de datos a la herramienta de identificación de sistemas.....	119
Figura 3.60 Mapeo de los datos de entrada y salida en el sistema de identificación	120
Figura 3.61 Ventana de proceso de modelado de sistemas	120
Figura 3.62 Ventana de configuración de parámetros del modelado del sistema	121
Figura 3.63 Proceso de modelado de los sistemas de primer y segundo orden	122
Figura 3.64 Resultados de la modelación paramétrica de los sistemas.....	122
Figura 3.65 Datos del modelo del sistema de primer orden	123

Figura 3.66 Diagrama de bloques del sistema de transporte.....	123
Figura 3.67 Parámetros de desempeño en un sistema de segundo orden sin ceros	125
Figura 3.68 Respuesta al escalón del sistema en lazo abierto	127
Figura 3.69 Respuesta al escalón del sistema en lazo cerrado	128
Figura 3.70 Parámetros de desempeño del sistema en alzo cerrado sin controlador	128
Figura 3.71 Diagrama de Nyquist compensado	131
Figura 3.72 Traza de Bode de un controlador PID	132
Figura 3.73 Respuesta al escalón del sistema con un controlador P	135
Figura 3.74 Parámetros de desempeño obtenidos del sistema implementado con un controlador P	135
Figura 3.75 Respuesta al escalón del sistema con un controlador PD	137
Figura 3.76 Parámetros de desempeño obtenidos del sistema implementado con un controlador PD	137
Figura 3.77 Traza de Bode para un controlador PI	138
Figura 3.78 Traza de Bode con la búsqueda de parámetros necesarios del control PI.....	139
Figura 3.79 Respuesta al escalón del sistema con un controlador PI.....	141
Figura 3.80 Parámetros de desempeño obtenidos del sistema implementado con un controlador PI.....	141
Figura 3.81 Respuesta al escalón del sistema con un controlador PID	143
Figura 3.82 Parámetros de desempeño obtenidos del sistema implementado con un controlador PID	143
Figura 3.83 Componentes de la Etapa de Compactación y Almacenamiento	145
Figura 3.84 Lazos de Control de la Etapa de Compactación y Almacenamiento	146
Figura 3.85 Características principales del ATMEGA644.	150
Figura 3.86 Flujo Secuencial de Etapas programadas en el Controlador	151
Figura 3.87 Diagrama de Flujo del Algoritmo de Programación.....	152
Figura 3.88 Compilador a utilizar para la programación.....	153
Figura 3.89 Simulación Etapa de Identificación y Clasificación.....	155
Figura 3.90 Simulación de la señal de control PWM para el motor DC.....	156

Figura 3.91 Simulación del circuito de control para la Etapa de Compactación y Almacenamiento	156
Figura 3.92 Simulación de la Etapa del Sistema de Pago.	157
Figura 3.93 Simulación de la Visualización de Mensajes y Comunicación de datos a través del Terminal Virtual Serial.....	157
Figura 3.94 Fuente Switching WEI-YA Modelo P15CG2	160
Figura 3.95 Diagrama Esquemático del circuito conversor de RS232 Estándar a RS232 TTL diseñado en ISIS Profesional-Proteus	161
Figura 3.96 Diseño Esquemático de la Tarjeta de Control.	163
Figura 3.97 Visualización 3D del diseño de la Tarjeta de Control.	163
Figura 3.98 Diseño Esquemático de la Tarjeta de Comunicación con el software <i>Vision Builder</i> [®] AI 2009.	164
Figura 3.99 Visualización 3D de la Tarjeta de Comunicación con el software <i>Vision Builder</i> [®] AI 2009.	164
Figura 4.1 Lazos de programación.....	167
Figura 4.2 Ventana Principal del Compilador utilizado	169
Figura 4.3 Herramienta Timer o Temporizador de Eventos.	171
Figura 4.4 Herramienta de reproducción de video.	171
Figura 4.5 Barra de progreso de tareas.	171
Figura 4.6 Herramientas de etiquetas y texto e imágenes.	172
Figura 4.7 Herramienta de Comunicación Serial.....	172
Figura 4.8 Herramienta de impresión.....	172
Figura 4.9 Diagrama de Flujo de la Interfaz Visual.	173
Figura 4.10 Reproducción del Video Publicitario.....	174
Figura 4.11 Proceso de Detección del Objeto Ingresado	175
Figura 4.12 Impresión de Ticket o Ingreso de Objetos.....	176
Figura 4.13 Impresión de Ticket.....	176
Figura 4.14 Pantalla de Agradecimiento	177
Figura 4.15 Pantallas de Rechazo de Objetos	178
Figura 4.16 Impresora Térmica	180
Figura 4.17 Cable Conversor USB-Serial.	181
Figura 5.1 Disposición de Sensores Infrarrojos en Tolva de Ingreso	183
Figura 5.2 Condición de Detección de Interferencia en la Tolva de Ingreso ..	183

Figura 5.3 Condición de Detección de Presencia de Objeto Ingresado	
Correctamente	184
Figura 5.4 Imagen a Color de la Bandeja de Identificación Vacía sin ningún tipo de Filtraje	188
Figura 5.5 Imagen Filtrada de la Bandeja de Identificación Vacía	189
Figura 5.6 Imagen sin Filtrar de una Botella PET de 500cm ³	189
Figura 5.7 Imagen obtenida Extrayendo el Plano de Luminosidad en una Botella PET de 500cm ³	190
Figura 5.8 Imagen obtenida utilizando un Filtro Binario de Umbral en una Botella PET de 500cm ³	190
Figura 5.9 Imagen Finalmente Procesada y Almacenada con la herramienta de Clasificación de Objetos para validar la forma de una Botella PET de 500cm ³	190
Figura 5.10 Resultado de la Identificación de Forma Válido	191
Figura 5.11 Resultado de la Identificación de Forma determinado como No Válido o Incorrecto.	191
Figura 5.12 Interfaz de Usuario para las pruebas del sistema de transporte .	194
Figura 5.13 Sistema de transporte preparado para las pruebas	194
Figura 5.14 Despliegue de la ventana de monitoreo de la posición de la bandeja de aceptación.....	207
Figura 5.15 Objeto rechazado y transportado a la cámara de rechazo.....	208
Figura 5.16 Botella aceptada y transportada a la cámara de aceptación.....	208
Figura 5.17 Cesta de Almacenamiento de Botellas.	210
Figura 5.18 Botellas PET de 500 y 3000cm ³ compactadas a un tercio de su tamaño original.	210
Figura 5.19 Impresora Térmica Instalada en la RVM con Rollo de 80mm.	211
Figura 5.20 Accionamiento del pulsador de impresión.....	211
Figura 5.21 Ticket Impreso para tres botellas almacenadas.....	212
Figura 5.22 Posibles Factores y Condiciones de Falla de la RVM.....	213

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Propiedades principales del PET	12
Tabla 1.2 Especificaciones técnicas del modelo RVM a implementar	22
Tabla 1.3 Posibles Soluciones para el Mecanismo de Compactación	22
Tabla 1.4 Posibles Soluciones para el Sistema de Reconocimiento de Botellas PET de 250 – 3000cm ³	23
Tabla 1.5 Posibles Soluciones para el Desarrollo de la Interfaz Gráfica	23
Tabla 1.6 Factores involucrados en el problema a resolver	24
Tabla 1.7 Selección de solución para el Mecanismo de Compactación.....	24
Tabla 1.8 Selección de solución para el Sistema de Identificación de Botellas PET de 250 – 3000cm ³	25
Tabla 1.9 Selección de solución para el Desarrollo de la Interfaz.....	26
Tabla 2.1 Especificaciones Técnicas del Sistema Mecánico	30
Tabla 2.2 Selección de Materiales de la Estructura	32
Tabla 2.3 Dimensiones a Considerar - Mecanismo de Aceptación.....	35
Tabla 2.4 Propiedades básicas de botellas PET comerciales.....	40
Tabla 2.5 Características Máquina de Ensayos Universales MTS TK/T5002 ..	41
Tabla 2.6 Fuerzas de compactación experimentales para botellas PET vacías.	44
Tabla 2.7 Factores utilizados para determinar un factor de seguridad.....	46
Tabla 2.8 Elementos neumáticos del sistema de compactación	48
Tabla 2.9 Características de los cilindros normalizados ISO 15552	49
Tabla 2.10 Características constitutivas de los cilindros normalizados ISO 15552	50
Tabla 2.11 Especificaciones teóricas del cilindro	50
Tabla 2.12 Fuerzas de los cilindros de doble efecto	51
Tabla 2.13 Carreras de los cilindros de doble efecto	51
Tabla 2.14 Especificaciones reales del cilindro.....	52
Tabla 2.15 Factor de Montaje	55
Tabla 2.16 Factores de uso referenciales	58
Tabla 2.17 Factores de simultaneidad	59
Tabla 2.18 Presión atmosférica en relación a la altura sobre el nivel del mar .	63
Tabla 2.19 Compresores de Pistón sin lubricación	64

Tabla 3.1 Parámetros Físicos a Detectar	70
Tabla 3.2 Sensores y Señales del Sistema de Control	71
Tabla 3.3 Especificaciones Técnicas Sensores Infrarrojos Serie C	74
Tabla 3.4 Valores de Voltaje Utilizando la Ecuación de tendencia lineal del sensor piezoeléctrico sin acondicionamiento	83
Tabla 3.5 Especificaciones Técnicas FaceCam 3000	88
Tabla 3.6 Parámetros de desempeño obtenidos con los controladores PID..	144
Tabla 3.7 Criterios de Selección del Dispositivo de Control	147
Tabla 3.8 Señales de Entrada a procesar	148
Tabla 3.9 Señales de Salida a controlar	148
Tabla 3.10 Señales Adicionales a utilizar.....	149
Tabla 3.11 Resumen de cantidad de pines a utilizar.....	149
Tabla 3.12 Consumo Energético de los dispositivos utilizados	158
Tabla 3.13 Características Requeridas para la Selección de la Fuente de Poder	159
Tabla 3.14 Características Fuentes Switching WEI-YA Serie P15.....	159
Tabla 3.15 Consideraciones de fabricación.	162
Tabla 5.1 Pruebas de la Fase de Pesaje sin Acondicionamiento de Señal ...	185
Tabla 5.2 Pruebas de la Fase de Pesaje con Acondicionamiento de Señal ..	186
Tabla 5.3 Resultados de la Fase de Pesaje Con y Sin Acondicionamiento de Señal.....	187
Tabla 5.4 Tabla de Pruebas y Resultados de la Fase de Validación de Forma	192
Tabla 5.5 Prueba del sistema a una entrada escalón con un controlador P ..	195
Tabla 5.6 Prueba de seguimiento de referencia del sistema con un controlador P	196
Tabla 5.7 Prueba del sistema a una entrada escalón con un controlador PD	197
Tabla 5.8 Prueba de seguimiento de referencia del sistema con un controlador PD.....	198
Tabla 5.9 Prueba del sistema a una entrada escalón con un controlador PI .	199
Tabla 5.10 Prueba de seguimiento de referencia del sistema con un controlador Pi.....	200
Tabla 5.11 Prueba del sistema a una entrada escalón con un controlador PID	201

Tabla 5.12 Prueba de seguimiento de referencia del sistema con un controlador Pi.....	202
Tabla 5.13 Resultados de las pruebas del sistema con un controlador P	203
Tabla 5.14 Resultados de las pruebas del sistema con un controlador PD ...	204
Tabla 5.15 Resultados de las pruebas del sistema con un controlador PI	205
Tabla 5.16 Resultados de las pruebas del sistema con un controlador PID ..	206
Tabla 5.17 Pruebas y Resultados de la Etapa de Compactación y Almacenamiento	209

RESUMEN

El desarrollo del presente proyecto de grado corresponde al diseño y construcción de un prototipo de máquina *vending* inversa patrocinado por la empresa SERPRA CIA. LTDA. con el objetivo de realizar modificaciones conceptuales a partir de especificaciones y características de modelos similares construidos en la entidad auspiciante buscando obtener mejoras en el sistema de identificación y compactación en los cuales se detectaron condiciones no adecuadas de funcionamiento al validar y almacenar botellas vacías de plástico PET de volúmenes comprendidos entre los 250 a 3000cm³.

A partir de dichas especificaciones y requerimientos técnicos que la empresa auspiciante brinda se inicia el diseño del prototipo a desarrollar con la identificación de posibles soluciones a los problemas presentados.

Gracias al proceso de diseño mecatrónico se identifican las posibles mejoras al sistema de identificación y transporte, implementando un software de prueba dedicado a la inspección de objetos a través de la aplicación de visión artificial y un controlador de posición, y las mejoras respectivas para el sistema de compactación mediante la aplicación del diseño y construcción de un sistema neumático.

Por otra parte se implementa una interfaz visual interactiva de fácil modificación la cual muestra las diferentes etapas del proceso de validación de botellas PET de manera agradable y de fácil comprensión para el usuario el cual recibe un ticket impreso a manera de incentivo económico por el reciclaje de sus envases vacíos los cuales no fueron desechados inapropiadamente.

Finalmente se establecen las respectivas pruebas de funcionamiento y se evalúan los resultados obtenidos en el diseño del prototipo identificando las posibles condiciones de falla.

CAPÍTULO I

1. GENERALIDADES

En el presente capítulo se describen los términos generales del proyecto de titulación. Como primera parte se detalla los antecedentes que la empresa auspiciante SERPRA CÍA. LTDA. presenta en su marco constitutivo así como el interés presentado, debidamente justificado, por el desarrollo de una nueva línea de *vending machines*. En segundo lugar, se presentan los objetivos y el alcance del proyecto, estipulando los primeros requerimientos y especificaciones técnicas del prototipo de máquina a diseñar y construir. Posteriormente se realiza una breve descripción del concepto de una *vending machine* o máquina expendedora y sus diferentes aplicaciones en el mundo actual. Finalmente se establece la metodología del proceso de diseño mecatrónico que se desarrolla de manera específica en los siguientes capítulos.

1.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO

1.1.1. ANTECEDENTES

La empresa SERPRA CIA. LTDA. desde su creación se ha dedicado a la fabricación de máquinas *vending* orientadas al suministro de una variada gama de productos que comprende desde paquetes de papel higiénico hasta tarjetas de recargas electrónicas de las operadoras de telefonía celular vigentes como Telefónica-Movistar. Dichas máquinas expendedoras de productos ofrecen servicios prácticos a los usuarios en lugares públicos.

Con el objetivo de buscar innovación y mejoramiento continuo de las máquinas expendedoras y mantenerse pioneros en el desarrollo de éste tipo de máquinas, SERPRA decidió incorporar una nueva línea de *vending machines* enfocados al reciclaje de envases desechables fáciles de procesar. De ésta manera, SERPRA decide implementar una línea de investigación dedicada a la construcción y desarrollo de máquinas RVM (*Reverse Vending Machine*).

Gracias a la eficiencia alcanzada en las diferentes líneas de *vending machines* que SERPRA CÍA. LTDA. ha logrado posicionar en el mercado nacional, el Ministerio del Ambiente de la República del Ecuador – MAE contacta a SERPRA para la cotización de un prototipo de RVM para el reciclaje de botellas de plástico no retornables de material PET de bebidas comúnmente consumidas por los ciudadanos en el mercado nacional para ser instaladas en lugares turísticos como parques nacionales y áreas protegidas como un plan piloto del programa de gestión de desechos del MAE.

Por ésta razón, el departamento de desarrollo de la empresa decide incurrir en el desarrollo de un sistema mecatrónico robusto el cual pueda cumplir con eficiencia éste tipo una solución tecnológica la cual podrá contribuir notablemente con el reciclaje de envases de plástico, favoreciendo así con el cuidado del medio ambiente gracias a un proceso de incentivos económicos a los usuarios a cambio de botellas plásticas transparentes las cuales son por lo general desechadas a la basura sin ningún proceso de reciclaje.

1.1.2. JUSTIFICACIÓN

En la actualidad existen empresas extranjeras fabricantes de máquinas *vending* inversas cuyos costos son bastante elevados los cuales desmotivan a entidades estatales o privadas a realizar una inversión directa en éste tipo de maquinaria. Lamentablemente también, el reciclaje y el tratamiento de desechos no son todavía actividades económicamente rentables en nuestro país por lo que no es justificable realizar una inversión en éste tipo de maquinaria. Sin embargo, dentro del marco legal vigente en la constitución

política de nuestro país, el desarrollo de tecnologías amigables y favorables al medio ambiente es una de las líneas de acción del gobierno actual y de todas las entidades públicas o privadas relacionadas al cuidado del mismo. La principal entidad pública enfocada en éste tema es sin duda el Ministerio del Ambiente y sus dependencias, las cuales ven viable una solución tecnológica que pueda aportar con el tema del reciclaje y tratamiento de desechos. Se conoce que hoy en día en el Ecuador se fabrican 1.400 millones de botellas y apenas el 39% se recicla porque los empresarios que se dedican al reciclaje afirman que los precios de la materia prima frente al material reciclado no es del todo convincente.

En el país se está reciclando por año cerca de 80.000 toneladas de materiales elaborados con polietileno y PET. Paradójicamente poco se conoce sobre dónde llevar estos plásticos para su tratamiento. Es así que mediante el nuevo modelo de desarrollo del “Buen Vivir”, adoptado por el estado ecuatoriano, nos está mostrando una perspectiva que nos ayuda a entender al mundo con una visión que se centra en el ser humano como parte de un entorno natural y que condiciona las relaciones entre ambos en base a una serie de principios y valores básicos para una convivencia mucho más armónica y llevadera, en tal virtud el estado ha implementado una medida ambiental conocida como el “impuesto verde” que propone la recuperación de \$0,02 por cada botella PET que se recupere a través del reciclaje.

Negar la obligación intrínseca con el medio ambiente es negar nuestra condición de seres racionales pues estaríamos contribuyendo con la construcción de un futuro poco prometedor. Aquí es donde nuestros valores humanos y profesionales entran en juego y nos inspiran en el diseño y construcción de un prototipo de máquina *vending* que permita la compactación y el almacenamiento de botellas PET que sirva como punto de inflexión en la cultura de reciclaje que en la actualidad tenemos en el país y que ha sido poco cultivada y promovida en el pasado. El reciclaje se está volviendo una necesidad inmediata que forma parte de una nueva cultura de convivencia humana que contribuye inminentemente a mejorar la prospectiva que el país debe construir y llevar a cabo para mejorar las condiciones de vida.

Por otra parte, el gobierno de turno, mediante la legislación vigente, pretende promover el desarrollo de tecnologías dentro del país y disminuir o incluso eliminar toda la importación de dicha tecnología para el reciclaje incentivar y acelerar nuestro desarrollo tecnológico. Es por esto que SERPRA CIA. LTDA. siendo una empresa ecuatoriana se ve en la obligación de contribuir con una entidad estatal la cual requiere una solución que permita crear una conciencia ciudadana. Es muy probable que para muchos la importancia de desarrollar maquinaria orientada a los procesos de reciclaje no sea válida a corto plazo pero es hora de dejar de pensar en lo inmediato y ampliar nuestra visión de lo que es mejorar la calidad de vida y las relaciones con nuestro mundo.

Mediante la aplicación de la Ingeniería Mecatrónica se pretende diseñar y construir un sistema automático de detección de botellas de plástico tipo PET las cuales sean compactadas para su almacenamiento.

La máquina a diseñar y construir aporta positivamente en las siguientes áreas de la empresa SERPRA Cía. Ltda.:

- **A la comercialización:** Se crea una nueva línea de maquinaria que se oferta a sus clientes a nivel nacional e internacional.
- **A la reducción del impacto ambiental:** Se contribuye notablemente con el medio ambiente gracias a la implementación de una máquina capaz de aceptar botellas de plástico que comúnmente son desechadas a la basura y almacenarlas para su posterior reciclaje. De esta manera los usuarios están motivados a reciclar sus envases plásticos puesto que reciben a cambio un tipo de incentivo económico directo.
- **A los procesos de reciclaje y tratamiento de desechos:** Los envases reciclados recolectados en la máquina son transportados a las plantas de procesamiento de plástico de manera fácil y sencilla

1.1.3. OBJETIVOS

1.1.3.1. General

Diseñar y construir un prototipo de máquina *vending* inversa que sea capaz de aceptar únicamente envases vacíos de botellas plásticas tipo PET de 250cm³ hasta 3000cm³ para proceder a compactarlas mediante un mecanismo que permita el fácil almacenamiento de las mismas brindando al usuario la facilidad de seguir las instrucciones de uso de la máquina mediante una interfaz visual y auditiva.

1.1.3.2. Específicos

- Crear un prototipo de RVM desarrollado en la empresa SERPRA CÍA. LTDA. basado en especificaciones y requerimientos técnicos de versiones previas desarrolladas por la empresa auspiciante, para de ésta manera incorporar una nueva línea de máquinas *vending* que pueden ser ofertadas a nivel nacional e internacional en un plazo máximo de seis meses a partir de la aprobación del proyecto.
- Aportar una solución tecnológica a una entidad estatal interesada en generar una concientización ciudadana respecto al tratamiento de desechos sólidos de plástico comúnmente eliminados de manera inadecuada mediante la entrega de un ticket impreso canjeable por incentivos representativos a cambio de la acción de reciclaje de envases vacíos de botellas tipo PET de volúmenes comerciales.
- Implementar un sistema electrónico de instrumentación que garantice el reconocimiento de envases vacíos de botellas tipo PET, de volúmenes comprendidos entre 250 a 3000cm³, en base a las características físicas de éste tipo de polímero, capaz de ser detectadas por sensores comercialmente asequibles.
- Desarrollar una interfaz visual y auditiva propia que facilite al usuario la utilización de la RVM la cual sea programada en un lenguaje de desarrollo actual y que a su vez se cumplan con los requerimientos de compatibilidad y flexibilidad de configuración que la empresa auspiciante establece.

1.1.4. ALCANCE DEL PROYECTO

El alcance del presente proyecto es diseñar y construir un prototipo de máquina *vending* inversa (*Reverse Vending Machine* - RVM), acorde a las especificaciones y requerimientos de la empresa auspiciante, que sea capaz de identificar exclusivamente botellas plásticas vacías de material PET de volúmenes comprendidos entre 250 hasta 3000cm³. Dicho prototipo de RVM contará con una interfaz visual y auditiva que brindará soporte al usuario acerca del uso de la máquina además de disponer un sistema expendedor tickets.

1.2. MARCO TEÓRICO

1.2.1. MÁQUINAS VENDING

Una máquina *vending*, en español - máquina expendedora, es un dispositivo mecatrónico que oferta un determinado producto comercial por un determinado valor monetario. Éste tipo de máquinas se las encuentra principalmente en lugares de alta concurrencia de público en donde se necesita establecer un protocolo de comercio simplificado, eficaz y eficiente.



Figura 1.1 Máquina *vending* dispensadora de bebidas calientes

1.2.1.1. Reseña histórica

Las primera *vending machine* fue diseñada por Herón de Alejandría en el antiguo Egipto cerca del 215 A.C. para dispensar agua bendita en los templos de Tebas¹. Posteriormente con el auge de la Revolución Industrial por el año 1888, *The Thomas Adams Gum Company* en Estados Unidos instala *vending machines* en las estaciones del metro de New York para vender chicles a los usuarios y transeúntes. Cerca del año 1926 se crean las primeras máquinas *vending* que dispensaban bebidas gaseosas frías en vasos desechables.



Figura 1.2 Vending machine mecánica de estampillas postales

En 1960, las máquinas *vending* sufren un rotundo cambio en su funcionamiento pues comienzan a utilizar dispositivos electrónicos para la validación y aceptación de monedas y billetes. Cerca de la década de 1990 comienza la utilización de dispositivos de pago mediante tarjetas de crédito y de débito. Hoy en día se pueden encontrar éste tipo de máquinas desde las más simples como lo son las dispensadoras de golosinas hasta las modernas máquinas *vending* inversas o RVM para el reciclaje de desperdicios sólidos.

¹ <http://www.gumballs.com/history.html> "History of the Vending Machine"



Figura 1.3 Máquinas *vending* contemporáneas

1.2.1.2. Tipos de máquinas *vending* y aplicaciones

Los tipos de máquinas *vending* que actualmente existen pueden ser de los siguientes tipos:

- ✓ Mecánicas
- ✓ Electrónicas
- ✓ Mecatrónicas
- ✓ Con enlace informático de monitoreo y gestión de datos

Las aplicaciones actuales que se dan a los diferentes tipos de *vending machines* se las encuentran en:

- Sistema de pago y recarga de tickets de transporte.
- Compra de bebidas gaseosas, calientes y golosinas.
- Dispensación de preservativos y medicamentos.
- Compra de regalos.
- Máquinas de juegos de azar.
- Dispensación de prensa escrita.

- Pagos vía internet de servicios básicos.
- Recargas electrónicas de telefonía celular.
- *Reverse Vending Machines* para el reciclaje de desechos sólidos.

1.2.1.3. Funcionamiento de una máquina *vending* inversa

Un tipo especial de las máquinas expendedoras son las RVM (*Reverse Vending Machine*) o máquinas *vending* inversas. Éste tipo de máquinas realizan una acción contraria o inversa al funcionamiento normal de una *vending machine* puesto que el usuario no adquiere un determinado producto a cambio de un sistema de pago definido. Una RVM receipta el producto que debe ser validado para posteriormente entregar el pago respectivo por el producto ingresado.

Dada la tendencia ambiental por gestionar el reciclaje de ciertos productos, las máquinas *vending* comenzaron a invertir su funcionamiento buscando motivar el mejor manejo de los desechos sólidos más utilizados por los seres humanos que permiten un fácil proceso de reciclaje como lo son:

- Papel y Cartón
- Envases de aluminio y latas
- Envases de botellas PET



Figura 1.4 *Reverse Vending Machine* de botellas PET

1.2.2. PET

El PET (denominado técnicamente como Polietilén Tereftalato o Politereftalato de Etileno) perteneciente al grupo de los materiales sintéticos denominados poliésteres, fue descubierto por los científicos británicos Whinfield y Dickson, en el año 1941, quienes lo patentaron como polímero para la fabricación de fibras. Se debe recordar que su país estaba en plena guerra y existía una apremiante necesidad de buscar sustitutos para el algodón proveniente de Egipto. Recién a partir de 1946 se lo empezó a utilizar industrialmente como fibra y su uso textil ha proseguido hasta el presente. En 1952 se lo comenzó a emplear en forma de film para el envasado de alimentos. Pero la aplicación que le significó su principal mercado fue en envases rígidos, a partir de 1976; pudo abrirse camino gracias a su particular aptitud para el embotellado de bebidas carbonatadas.

En general, el PET, se caracteriza por su elevada pureza, alta resistencia y tenacidad. De acuerdo a su orientación presenta propiedades de transparencia, resistencia química; esta resina es aceptada por la *Food and Drugs Administration* (FDA). Existen diferentes grados de PET, los cuales se diferencian por su peso molecular y cristalinidad. Los que presentan menor peso molecular se denominan grado fibra, los de peso molecular medio, grado película y, de mayor peso molecular, grado ingeniería.

1.2.2.1. Aplicaciones

En la actualidad se están abriendo cada vez más nuevos campos de aplicación y se desarrollan botellas PET de alta calidad y reducido peso, entre sus aplicaciones más importantes dentro de los siguientes sectores:

a) *Envase y Empaque:* Las firmas de maquinaria han contribuido en gran medida a impulsar la evolución de manera rápida de los envases, por lo que hoy se encuentran disponibles envases para llenado a temperaturas normales y para llenado en caliente; también se desarrollan envases muy pequeños desde 10 mililitros hasta garrafones de 19 litros. Los tarros de

boca ancha son utilizados en el envasado de conservas alimenticias. La participación del PET dentro de este mercado es en:

- ✓ Bebidas Carbonatadas
- ✓ Agua Purificada
- ✓ Aceite y Conservas
- ✓ Cosméticos.
- ✓ Detergentes y Productos Químicos
- ✓ Productos Farmacéuticos

b) *Electro-electrónico:* Este segmento abarca diversos tipos de películas y aplicaciones desde las películas ultra delgadas para capacitores de un micrómetro o menos hasta de 0.5 mm, utilizadas para aislamiento de motores. Los capacitores tienen material dieléctrico una película PET empleada para telecomunicaciones, aparatos electrónicos entre otros.

c) *Fibras (telas tejidas, cordeles, etc.):* En la industria textil, la fibra de poliéster sirve para confeccionar gran variedad de telas y prendas de vestir. Debido a su resistencia, el PET se emplea en telas tejidas y cuerdas, partes para cinturones, hilos de costura y refuerzo de llantas. Su baja elongación y alta tenacidad se aprovechan en refuerzos para mangueras. Su resistencia química permite aplicarla en cerdas de brochas para pinturas y cepillos industriales.

1.2.2.2. Características y Propiedades Básicas

Las características constitutivas más relevantes del PET tomadas en cuenta para las múltiples aplicaciones en las que se lo usa son principalmente las siguientes:

- ✓ Procesable por soplado, inyección, extrusión. Apto para producir frascos, botellas, películas, láminas, planchas y piezas.
- ✓ Transparencia y brillo con efecto lupa.
- ✓ Excelentes propiedades mecánicas (módulo de elasticidad, resistencia a la tracción, resistencia al impacto).
- ✓ Barrera contra sustancias gaseosas.
- ✓ Bio orientable-cristalizable.
- ✓ Esterilizable por gamma y óxido de etileno.
- ✓ Costo/rendimiento.
- ✓ Es un material reciclable.
- ✓ Liviano.

Por otra parte las propiedades físicas, mecánicas y térmicas del PET facilitan su selección al momento de generar un nuevo producto o envase dentro de las líneas alimentarias de bebidas dado que son propiedades que aportan positivamente a la producción sistematizada de números productos. Algunas de las propiedades más relevantes del PET son listadas a continuación en la siguiente tabla.

Tabla 1.1 Propiedades principales del PET

PROPIEDADES FÍSICAS	
Densidad [g/cm ³]	1.3 – 1.4
Índice Refractivo	1.58 – 1.64
Inflamabilidad	HB
PROPIEDADES MECÁNICAS	
Coefficiente de fricción	0.2 -0.4
Dureza (Rockwell M)	94 -101
Módulo de Elasticidad [GPa]	2 – 4
Resistencia a la tracción [Mpa]	80, 190 – 260 (film)
Resistencia al impacto [J/m]	13 – 35
PROPIEDADES TÉRMICAS	
Calor específico [J/(K.kg)]	1200 – 1350
Conductividad térmica [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	0.15 – 0.4
Temperatura máxima de utilización [°C]	115 – 170
Temperatura mínima de utilización [°C]	-40 a -60

Fuente: "Enciclopedia del Plástico 2000"; Centro Empresarial del Plástico.

1.2.3. VISIÓN ARTIFICIAL

Hoy en día se puede encontrar una alta variedad de productos tecnológicos que son fabricados cada segundo los cuales deben cumplir ciertos requisitos como normas de calidad ISO y un sin número de estándares que garantizan la fiabilidad y el desempeño adecuado de los mismos. Para llegar a cumplir con las normas y estándares de calidad se requiere un sin número de inspecciones en cada uno de los productos que una determinada fábrica produce en cada una de sus etapas de producción. Por ejemplo, se necesitaría invertir mucho tiempo verificar los tamaños adecuados de los empaquetados de un medicamento con 8 cápsulas en una fábrica farmacéutica.



Figura 1.5 Inspección Visual de Medicamentos

Es fácil imaginar la cantidad de tiempo que un operario necesita para utilizar herramientas de medición para elaborar la tarea de inspección del empaquetado y verificar a su vez que la cantidad de medicamentos sea la correcta, sin considerar los posibles errores humanos debido a condiciones ambientales de trabajo o de cansancio físico-mental que la jornada diaria de trabajo produce.

Dadas las necesidades de la industria moderna en incrementar volúmenes de producción, disminuir tiempos en los controles de calidad y disminuir errores en las líneas de producción, la implementación de los sistemas de Visión Artificial actualmente se ha consolidado como la primera opción en los controles de calidad de productos en la industria mundial.

A continuación se listan algunas de las múltiples aplicaciones que utilizan esta tecnología alrededor del mundo:

- Control de dimensiones en aros y llantas.
- Comprobación de soldaduras y empaquetados de circuitos electrónicos.
- Comprobación en fechas de caducidad de medicamentos.
- Inspección de nivel de líquido en bebidas.
- Comprobación de defectos en azulejos en la industria de la cerámica y de la metalurgia.



Figura 1.6 Inspección de nivel de líquido y sellado de botellas utilizando software de Visión Artificial²

En conclusión se puede definir a la visión por computadora o visión artificial como una de las ramas de la inteligencia artificial la cual obtiene información del mundo real en base a videos o imágenes por medio de una cámara las cuales son procesadas a través de un computador que realiza operaciones de extracción y filtraje de imágenes las cuales son segmentadas y analizadas para su posterior interpretación o reconocimiento.

² (TECNALIA, 2013)

1.2.3.1. Factores y componentes a considerar para la implementación de Visión Artificial

Para proceder a identificar correctamente los elementos que se necesitan para el procesamiento digital de imágenes a implementar, es necesario primero entender los factores que determinan adquisición de imágenes. Los factores a tomar en cuenta para la adquisición imágenes más preponderantes son:

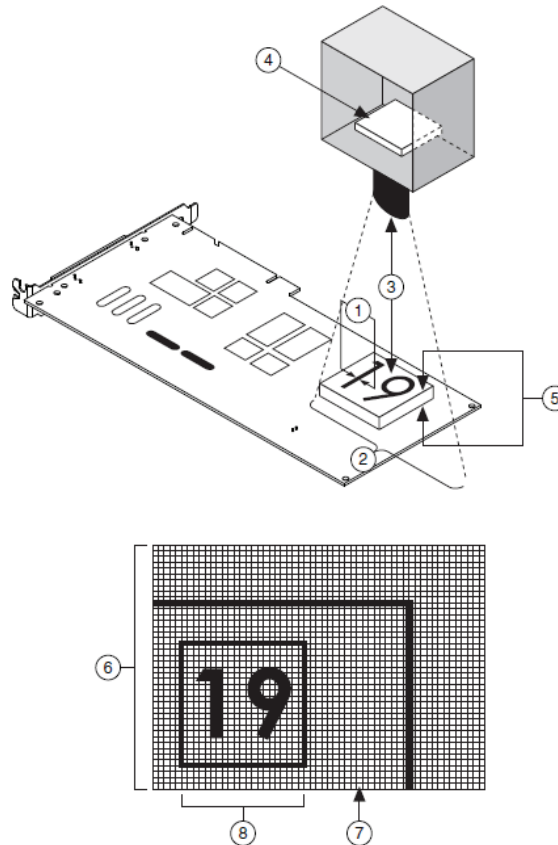


Figura 1.7 Factores importantes del sistema de visión³.

1. **Resolución:** Es el tamaño de la más mínima característica de un objeto que el sistema de visión puede distinguir.
2. **Campo de Visión:** Es el área de trabajo destinada en un objeto bajo inspección que la cámara puede captar.
3. **Distancia de Trabajo:** Es la distancia perpendicular considerada entre el lente de la cámara al objeto bajo inspección.
4. **Tamaño del Sensor:** Es el tamaño del sensor de imagen incorporado en la cámara a utilizar.

³ (National Instruments Corporation, 2012)

5. **Profundidad de la imagen:** Es la profundidad máxima del objeto que permanece en el enfoque.
6. **Imagen:** La imagen 2D del objeto bajo inspección.
7. **Pixel:** La división más pequeña que conforma una imagen digital.
8. **Resolución de Píxeles:** La cantidad mínima de píxeles necesarios para representar un objeto bajo inspección.

1.2.4. Software para la Inspección Automática de Productos NI *Vision Builder*® AI 2009

Uno de los principales desarrolladores de software y hardware orientando a la inspección automática de productos utilizando visión artificial es *National Instruments*, empresa que se ha mantenido como una de las compañías líderes en el mercado de la automatización y control de procesos gracias a su mejora continua, innovación y fiabilidad de sus productos. Dentro de las múltiples líneas de dicha compañía, se encuentra la línea dedicada a la visión artificial y al procesamiento digital de imágenes. Uno de los paquetes computacionales que oferta NI enfocado a la inspección automática de productos es *Vision Builder*® AI 2009 el cual brinda todas las herramientas necesarias para llevar a cabo una detección de forma bastante eficiente aplicando las herramientas orientadas a la visión artificial. Las herramientas más relevantes del software mencionado permiten:

- ✓ Utilizar diferentes dispositivos para la adquisición de imágenes compatibles con Gigabit Ethernet, IEEE1394, USB, o cámaras IP.
- ✓ Filtrar imágenes a color o en escala de grises.
- ✓ Extraer planos de color RGB o HSL.
- ✓ Identificar patrones de forma, color y caracteres.
- ✓ Medir objetos en base a proyecciones geométricas y pixelación.
- ✓ Extraer muestras para el aprendizaje de patrones que se guardan en bases de datos.
- ✓ Realizar operaciones matemáticas y booleanas con los resultados obtenidos.

- ✓ Comunicar resultados mediante la utilización de protocolos industriales como Ethernet, Serial o por medio de entradas/salidas digitales.
- ✓ Programar en base a la utilización de bloques visuales fáciles de configurar.
- ✓ Realizar modificaciones rápidas en la programación.
- ✓ Enfocar la aplicación únicamente a la inspección automática de productos sin utilizar demasiados recursos del sistema.
- ✓ Realizar una estadística acerca de los objetos inspeccionados.
- ✓ Monitorear todo el proceso dinámicamente.



Figura 1.8 Pantalla Principal de NI *Vision Builder*® AI 2009⁴

La aplicación del software de inspección *Vision Builder*® AI 2009 en su versión de prueba está destinada a contribuir en la fase de validación de forma y clasificación de los diferentes objetos a ser analizados en la cavidad de ingreso de la RVM, etapa que será detallada posteriormente en el capítulo 3.

⁴ (National Instruments, 2010)

1.3. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE DISEÑO MECATRÓNICO

Hoy en día, los procesos mecánicos y físicos con el nivel de desarrollo computacional y los componentes electrónicos se hallan integrados entre sí con el fin de lograr un óptimo desenvolvimiento de los procesos industriales o el correcto funcionamiento de los múltiples dispositivos electrónicos que nos ayudan en nuestras tareas diarias.

De esta manera, una de las modernas ramas de la ingeniería, la Mecatrónica, logra proporcionar soluciones de diseño integrales donde los componentes físicos como mecanismos, trenes de engranajes, motores y demás, son monitoreados en interfaces computacionales modernas mediante sensores electrónicos para así poder medir magnitudes físicas importantes en los diversos procesos y brindar acciones de control propicias para el apto desempeño del proceso automatizado que se requiera ejecutar.

En la siguiente figura se puede observar con detalle el nivel de integración de un sistema mecatrónico actual.



Figura 1.9 Componentes principales de la Ingeniería Mecatrónica

La Ingeniería Mecatrónica ofrece una visión mucho más global de todo el funcionamiento de una máquina integrando la parte mecánica y la parte electrónica para así poderlo plasmar en un diseño integral que brinde soluciones mucho más óptimas basadas en la utilización de las diferentes herramientas CAE, las cuales son necesarias para la elaboración de un diseño físico previo (CAD) que se lo puede simular en las condiciones de trabajo normal, posteriormente dicho diseño CAD se lo puede traducir a un lenguaje de manufactura donde un software (CAM) de manufactura pueda controlar la manufactura del mismo.

A continuación se detalla las etapas básicas de un diseño concurrente⁵ de maquinaria o dispositivos.



Figura 1.10 Etapas Básicas de un diseño concurrente

De la misma manera, se detalla a continuación a manera de flujo grama el proceso de diseño Mecatrónico⁶

⁵ (Riba, 2002, págs. 72-77)

⁶ (Bagad, 2008, págs. 15-17)

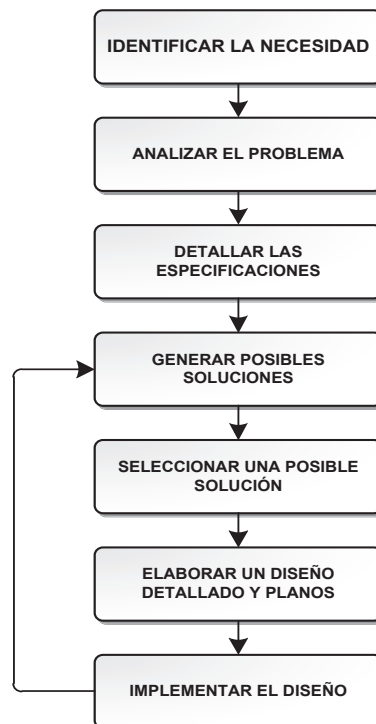


Figura 1.11 Proceso del diseño Mecatrónico

1.3.1. IDENTIFICACIÓN DE LA NECESIDAD

Como se mencionó en los antecedentes y generalidades del proyecto, SERPRA CÍA. LTDA. fue contactada por el MAE (Ministerio del Ambiente del Ecuador) con el objetivo de adquirir un determinado tipo de máquina *vending* inversa para ser utilizado en el programa de gestión de desechos sólidos de dicha entidad estatal. Dada la línea de producción e interés de SERPRA, se decidió implementar una nueva línea de máquinas *vending* orientada al reciclaje de envases vacíos de botellas PET de volúmenes comprendidos entre los 250 a 3000cm³.

Por otra parte, dada la tendencia del gobierno actual por motivar la soberanía tecnológica y favorecer la producción nacional, SERPRA gana el concurso de compras públicas y contratación presentado por el INCOP para desarrollar un prototipo de máquina *vending* inversa que facilite el reciclaje de botellas tipo PET. Es por ésta razón, que la empresa auspiciante del presente proyecto se ve en la necesidad de crear un prototipo mejorado de RVM desarrollado en el Ecuador para cumplir con el contrato adquirido con el Estado.

1.3.2. ANÁLISIS DEL PROBLEMA

A continuación se detalla un análisis del problema estipulando las necesidades y características que SERPRA CÍA. LTDA. destaca como relevantes para la selección adecuada de la solución a la necesidad presentada anteriormente.

- ✓ Factor de Económico
- ✓ Factor Tecnológico
- ✓ Factor Empresarial

Identificados los factores que deben ser tomados en cuenta, se determinan a continuación los problemas, que mediante la aplicación de la Ingeniería Mecatrónica, se pretenden solventar:



Figura 1.12 Problemas a Resolver

1.3.3. DETALLE DE ESPECIFICACIONES

En base a las especificaciones técnicas de ciertos modelos de máquinas vending inversas y en función de las características de modelos de RVM desarrollados en la empresa auspiciante, el departamento de desarrollo tecnológico de SERPRA CÍA. LTDA. establece la siguiente tabla de especificaciones técnicas del nuevo modelo prototipo de la RVM a diseñar y construir.

Tabla 1.2 Especificaciones técnicas del modelo RVM a implementar

ESPECIFICACIÓN	DETALLE
Dimensiones Máx. Estructura (X/Y/Z)	800/900/1800 mm
Peso Máx.	250 kg.
Material de la estructura	Acero -Perfil Estructural
Material de la cubierta	Acero Inoxidable
Tipo de mecanismo de aceptación	Desplazamiento Lineal
Tipo de mecanismo de compactación	Compactador Longitudinal
Volúmenes de botellas PET vacías a ser identificadas como válidas	Mínimo: 250cm ³ Máximo: 3000cm ³
Capacidad de almacenamiento máximo con mecanismo de compactación	600 botellas de 500cm ³
Características físicas de PET a detectar	Presencia - Peso – Forma
Tipo de sensores a utilizar	Análogos – Digitales - Visión
Interfaz con el usuario	Visual / Auditiva (Español/Inglés) compatible con Microsoft®- Windows
Desarrollo de la interfaz	Propietario y modificable por SERPRA CIA. LTDA.
Tipo de Actuadores a utilizar	Eléctricos / Neumáticos
Tiempo máx. de identificación, compactación, almacenamiento de botellas plásticas PET válidas	9 segundos
Sistema de pago	Ticket impreso en papel térmico de 80mm
Fuente de Alimentación	Eléctrica Monofásica con protección a tierra

Fuente: SERPRA CÍA. LTDA.

1.3.4. POSIBLES SOLUCIONES

Considerando las especificaciones técnicas requeridas por SERPRA CÍA. LTDA. para la implementación del prototipo se determinará a continuación las posibles soluciones a cada uno de los problemas a resolver anteriormente identificados en la Figura 1.8. A continuación se analiza las posibles soluciones para el mecanismo de compactación de las botellas PET.

Tabla 1.3 Posibles Soluciones para el Mecanismo de Compactación

SOLUCIÓN	ALIMENTACIÓN ENERGÉTICA	LONGITUD FINAL DE COMPACTACIÓN	DIMENSIONES	GRADO DE MANTENIMIENTO
Compactador tipo molino	Eléctrica	Fibras de 8mm	800 x 350 x 300 mm	Alto
Compactador Longitudinal	Neumática	5mm	1500 x 480 x 200 mm	Bajo
Compactador Manivela-Corredera	Eléctrica	90mm	680 x 400 x 400 mm	Medio

Fuente: Propia

Dentro de las posibles soluciones consideradas se determinó que la posible solución para reconocer los envases vacíos de botellas PET de 250 a 3000cm³ sea capaz de garantizar un reconocimiento del factor de selección de botellas más preponderante como lo es el factor de forma de las botellas. Exclusivamente se estableció el reconocimiento de forma como parámetro de selección más preponderante dada la complejidad del proceso. Por esta razón, se escogió soluciones que brinden un sistema de detección con sensores de visión o que implementen algoritmos de visión artificial.

Tabla 1.4 Posibles Soluciones para el Sistema de Reconocimiento de Botellas PET de 250 – 3000cm³

SOLUCIÓN	SOFTWARE A UTILIZAR	VELOCIDAD DE IDENTIFICACIÓN	INVERSIÓN ESTIMADA	CONFIABILIDAD
Sistema de Inspección Automatizada	NI Vision Builder®- (Versión a Prueba)	2 segundos	Ninguna	Alta
Implementación de Sensores Comerciales Visión - TTL	Ninguno- (Integrado en el Diseño)	4 segundos	\$2800	Baja
Sistema True Vision System®	No definido	2 .6 Segundos	\$9500	Alta

Fuente: Propia

Como soluciones para el desarrollo de la interfaz gráfica se consideran las siguientes:

Tabla 1.5 Posibles Soluciones para el Desarrollo de la Interfaz Gráfica

SOLUCIÓN	SOFTWARE A UTILIZAR	COSTO LICENCIA	COMPATIBILIDAD SISTEMAS OPERATIVOS
Programación en JAVA	Netbeans® IDE	Gratis	Windows-GNU Linux
Programación Lenguaje VB	Visual Studio® Express	Gratis	Windows
Programación Visual-Bloques	NI-LabVIEW®	\$5000	Windows

Fuente: Propia

1.3.5. SELECCIÓN DE SOLUCIÓN

Una vez detalladas las posibles soluciones a los problemas presentados, se procederá a ponderar cada uno de ellos en función de los factores involucrados que a la empresa auspiciante le interesan, los cuales son detallados individualmente en la siguiente tabla.

Tabla 1.6 Factores involucrados en el problema a resolver

Factor Económico	Factor Tecnológico	Factor Empresarial
<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Inversión Mínima para el desarrollo del prototipo. <input type="checkbox"/> Aquisición de componentes y partes en distribuidores y proveedores locales. <input type="checkbox"/> Adecuaciones y costos reducidos en mantenimientos preventivos o correctivos <p>PONDERACIÓN: 0.33</p>	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Desarrollar un nuevo prototipo basándose en la estructura y el funcionamiento de modelos anteriores de RVM desarrollados en SERRA CIA. LTDA. <input type="checkbox"/> Implementar un sistema propio de identificación flexible y un sistema de compactación de botellas PET confiable. <p>PONDERACIÓN: 0.34</p>	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Ofertar un nuevo modelo más eficiente de RVM y mejorar su fiabilidad. <input type="checkbox"/> Desarrollar tecnología de maquinaria hecha en Ecuador. <input type="checkbox"/> Aportar con una solución tecnológica a una entidad estatal contribuyendo a la responsabilidad social <p>PONDERACIÓN: 0.33</p>

Fuente: Propia

Se considerará un valor de ponderación observando las características individuales de las opciones tomadas en cuenta y valorándolas sobre el valor de ponderación establecido anteriormente. En primer lugar se evaluará las posibles soluciones brindadas para el mecanismo de compactación de las botellas comparando sus características y evaluándolas a su vez en función de los factores involucrados con su respectiva ponderación.

Tabla 1.7 Selección de solución para el Mecanismo de Compactación

SOLUCIÓN	FACTOR ECONÓMICO (0.33)	FACTOR TECNOLÓGICO (0.34)	FACTOR EMPRESARIAL (0.33)	TOTAL (1)
Compactador tipo molino	0.15	0.10	0.33	0.58
Compactador Lineal Neumático	0.30	0.30	0.33	0.93
Compactador Manivela-Corredera	0.15	0.20	0.33	0.68

Fuente: Propia

Por lo tanto se escoge el diseño y la implementación de un compactador lineal neumático impulsado por un cilindro estándar asequible en el mercado nacional como la solución al problema presentado para el sistema de compactación dado que los costos de los posibles mantenimientos preventivos y correctivos se ven reducidos gracias a las características de diseño del compactador neumático que no dispone de una cantidad elevada de componentes mecánicos sujetos a movimientos rotacionales que ocasionan grandes desgastes como sería en el caso de los mecanismos de molino o manivela-corredera sugeridos como posibles soluciones. Por otra parte, se escoge dicho mecanismo de compactación dada la acción simplificada de trabajo que poseen los cilindros neumáticos y su alta eficiencia si es dimensionado correctamente. Dicho dimensionamiento se lo llevará a cabo con detenimiento en el capítulo 2.

A continuación se realiza la ponderación de las posibles soluciones para el sistema de identificación y reconocimiento de las botellas PET el cual debe garantizar una acertada discriminación de todos los posibles objetos que un usuario puede ingresar en la RVM. Es por esta razón que se escoge como soluciones la aplicación de software orientado a la visión artificial para garantizar un análisis de la forma de todos los objetos que se puedan ingresar los cuales deberán ser inspeccionados individualmente. A continuación se indica la selección de la solución para el sistema de identificación de botellas PET.

Tabla 1.8 Selección de solución para el Sistema de Identificación de Botellas PET de 250 – 3000cm³

SOLUCIÓN	FACTOR ECONÓMICO (0.33)	FACTOR TECNOLÓGICO (0.34)	FACTOR EMPRESARIAL (0.33)	TOTAL (1)
Sistema de Inspección Automatizada	0.33	0.30	0.30	0.93
Implementación de Sensores Comerciales Visión - TTL	0.25	0.20	0.33	0.78
Sistema True Vision System	0.15	0.3	0.30	0.75

Fuente: Propia

Como solución al problema de la identificación de botellas PET se escoge al software de inspección basado en componentes de visión artificial utilizando a manera de desarrollo la versión de prueba de treinta días del software NI *Vision Builder*® AI 2009 gracias a sus múltiples herramientas de fácil utilización y su alto grado de conectividad con dispositivos de control externos.

En la siguiente tabla se muestra la ponderación respectiva para la selección de la solución en el desarrollo de la interfaz computacional que estará mostrada en la RVM.

Tabla 1.9 Selección de solución para el Desarrollo de la Interfaz

SOLUCIÓN	FACTOR ECONÓMICO (0.33)	FACTOR TECNOLÓGICO (0.34)	FACTOR EMPRESARIAL (0.33)	TOTAL (1)
Programación en JAVA	0.33	0.30	0.32	0.95
Programación Lenguaje VB	0.33	0.34	0.32	0.99
Programación Visual-Bloques	0.05	0.2	0.1	0.35

Fuente: Propia

De la ponderación adquirida para la selección de la solución en el desarrollo de la interfaz computacional, se destaca que la programación en JAVA es bastante considerable como para ser tomada en cuenta.

Sin embargo, se escoge como solución a la programación en Lenguaje Visual Basic para el desarrollo de la interfaz computacional por la compatibilidad con el sistema operativo a utilizar por la empresa auspiciante. Todo el desarrollo de la programación para la interfaz humano-máquina (HMI) o interfaz visual interactiva con el usuario será detallada paso a paso en el capítulo 4.

1.3.6. CONSIDERACIONES FINALES PARA EL DISEÑO

Tomando en cuenta que las soluciones escogidas para los diferentes problemas podemos definir las consideraciones de diseño y las herramientas CAE a tomar en consideración como parte fundamental del diseño Mecatrónico. Las áreas específicas a considerar en el diseño son las siguientes:

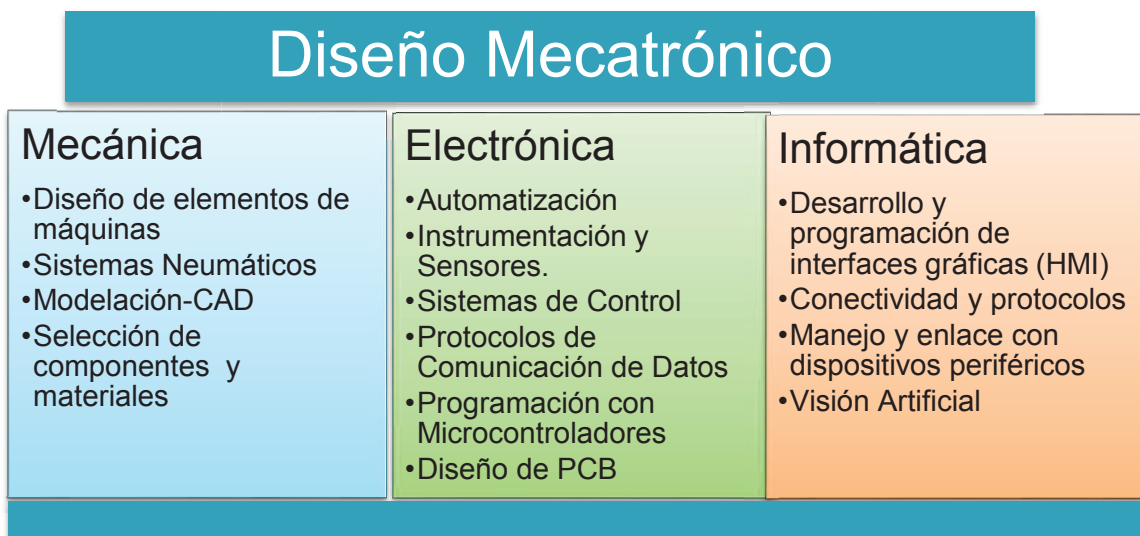


Figura 1.13 Áreas del diseño Mecatrónico a considerar

Las herramientas computacionales CAE a considerar son las siguientes:

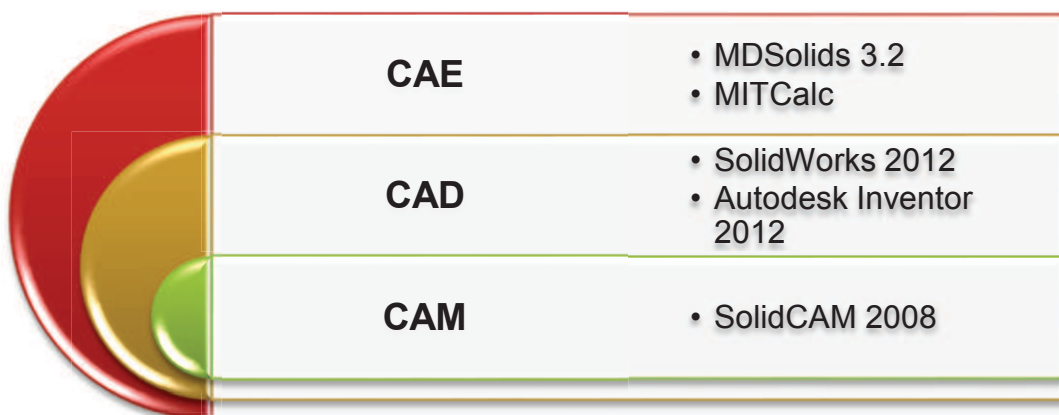


Figura 1.14 Herramientas CAE a utilizar

Adicionalmente, las normas y consideraciones de diseño que se tomarán en cuenta son las siguientes:

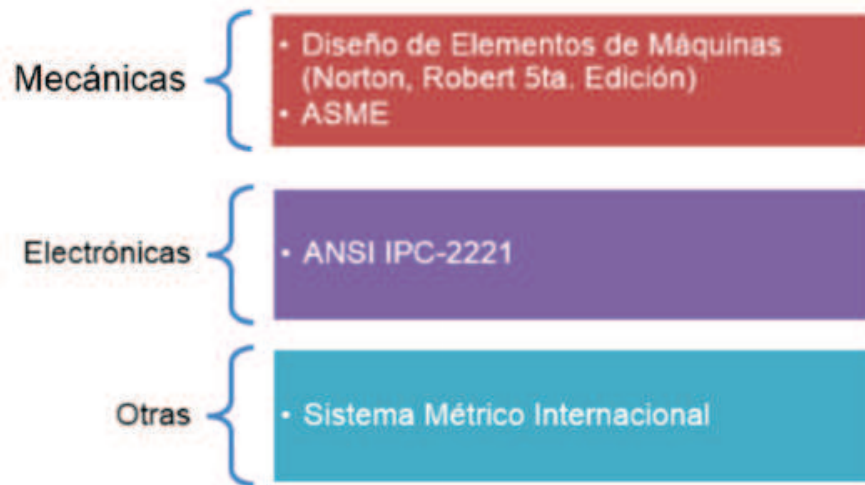


Figura 1.15 Normas y Consideraciones a tomar en cuenta en el diseño

CAPÍTULO II

2. DISEÑO MECÁNICO

En el presente capítulo se plantea el diseño mecánico de la estructura, mecanismos y partes constitutivas que darán forma al prototipo de máquina *vending*. En primer lugar, se determina la forma estructural de la RVM en base a los requerimientos de la empresa auspiciante que buscan mantener la estructura física de modelos diseñados y construidos anteriormente en la empresa para así modificar la menor cantidad de partes y piezas si se llegara a adoptar las modificaciones realizadas en el funcionamiento del presente prototipo de RVM a desarrollar. En segundo lugar se escoge el mecanismo de transporte de las botellas que han sido identificadas como válidas y que son aptas para ser compactadas. Por último, en base a ensayos de compactación, se establece el valor de la fuerza necesaria para la compactar envases vacíos de botellas PET con el cual se diseña el mecanismo de compactación y almacenamiento de la RVM a implementar.

2.1. CONSIDERACIONES GENERALES DE DISEÑO

El sistema mecánico de la RVM a diseñar y construir consta de dos etapas las cuales se encontrarán físicamente dispuestas dentro de la estructura. A continuación se detalla cada uno de ellos:

Etapas de identificación y Transporte: Tiene como objetivo principal la discriminación de los elementos que sean introducidos en la plataforma de identificación y aceptación de botellas. En caso de que el objeto ingresado sea reconocido como una botella PET de volumen comercial se procede a desplazar linealmente la botella a la cavidad de compactación. Caso contrario, si el objeto ingresado a la máquina no es un válido, la plataforma de desplazamiento traslada el objeto a la cavidad de rechazo de la máquina.

El movimiento lineal de la plataforma de aceptación está basado en un mecanismo de transmisión de potencia piñón-cremallera.

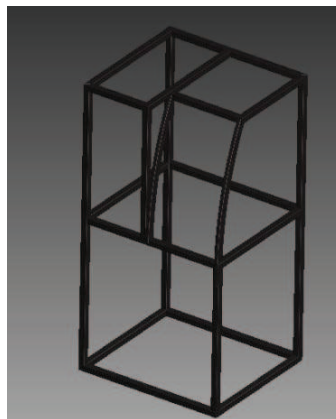


Figura 2.1 Estructura de la RVM

Etapas de Compactación y Almacenamiento: El objetivo principal de esta etapa es optimizar el espacio físico de la cesta de almacenamiento de botellas PET validadas, las cuales serán compactadas transversalmente. La fuerza de compactación será proporcionada por una prensa neumática dispuesta de manera horizontal.

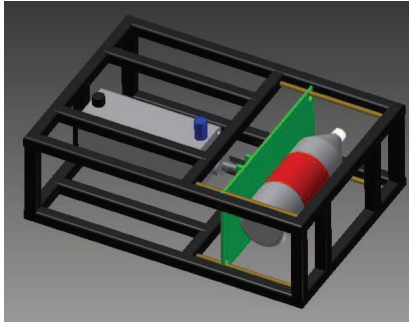


Figura 2.2 Mecanismo de Compactación

Tabla 2.1 Especificaciones Técnicas del Sistema Mecánico

Dimensiones Máx. Estructura (X/Y/Z)	800mm/900mm/1800mm
Peso Máximo Aproximado.	250 kg.
Material de la estructura	Acero -Perfil Estructural
Material de la cubierta	Acero Inoxidable
Tipo de mecanismo de aceptación	Desplazamiento Lineal - Piñón Cremallera
Tipo de mecanismo de compactación	Compactador Transversal Neumático
Capacidad de almacenamiento máximo sin compactación	200 botellas de 500cm ³ .
Capacidad de almacenamiento máximo con mecanismo de compactación	600 botellas de 500cm ³ .

Fuente: SERPRA CÍA. LTDA.

2.2. DISEÑO DE LA ESTRUCTURA

En base a las especificaciones técnicas brindadas por SERPRA CÍA. LTDA. se pretende mantener la forma física externa y ciertas prestaciones de los modelos construidos anteriormente en la empresa auspiciante los cuales presentan una forma prismática con las siguientes dimensiones: 800mmx900mmx1800mm. Las prestaciones de la estructura de la RVM garantizan los siguientes aspectos:

- ✓ Alberga a todos los componentes y partes dentro de su estructura para garantizar un blindaje total a los equipos.
- ✓ Dispone físicamente de tres espacios marcados uno de ellos exclusivamente para el almacenamiento de las botellas compactadas y otro para los demás componentes y partes constitutivas.
- ✓ Brinda la facilidad de cambiar el rollo de papel térmico de la impresora mediante un acceso mediante una puerta.

- ✓ Cuenta con una puerta principal para realizar mantenimiento e instalación de partes y componentes.
- ✓ Dispone de una puerta para retirar las botellas almacenadas.
- ✓ Posee con un espacio exclusivamente para la instalación de la pantalla de reproducción de las animaciones y video de la interfaz computacional.
- ✓ Contiene con un compartimento para el almacenamiento de cualquier objeto ingresado que no sea una botella PET vacía de 250 a 3000cm³.

2.2.1. ANÁLISIS ESTRUCTURAL

Manteniendo el tamaño y la forma de modelos previos construidos en la empresa auspiciante se dispone que se deban albergar en el interior de la RVM las siguientes partes principales:

- ✓ Cavidad de almacenamiento.
- ✓ Espacio para el proceso de identificación y compactación
- ✓ Espacio de instalación de los componentes principales de control (computador y tarjeta electrónica de control).

La forma seleccionada para tomar en cuenta es una de forma prismática rectangular como se muestra en la siguiente figura donde se visualizan las tres cavidades principales.

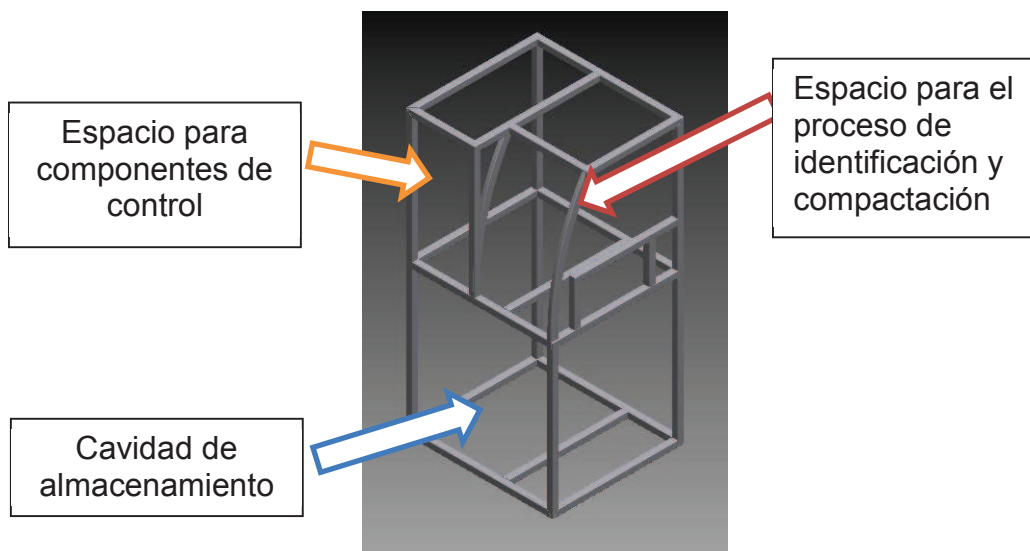


Figura 2.3 Estructura de la RVM

2.2.2. SELECCIÓN DE MATERIALES Y ACCESORIOS

Los materiales a ser utilizados son escogidos en función de las prestaciones y el lugar físico en donde va a ser instalada considerando aspectos como:

- ✓ Exposición a condiciones de humedad.
- ✓ Exposición a ambientes con presencia de temperaturas altas y bajas.
- ✓ Instalación en lugares que no disponen de seguridad privada.
- ✓ Presentación exterior impecable y libre de corrosión o manchas.

Conocidas las prestaciones y las condiciones en donde va a ser instalada la máquina pues se establece la utilización de un material resistente a la corrosión y a la oxidación para cubierta exterior. Los materiales seleccionados para brindar las prestaciones mencionadas se detallan en la siguiente tabla considerando los tratamientos especiales que disponen.

Tabla 2.2 Selección de Materiales de la Estructura

MATERIAL	ESPESOR [mm]	TRATAMIENTO	INSTALACIÓN
Plancha Acero Inoxidable	0.5	Ninguno	Cubierta Externa
Perfil Estructural	2	Pintura Antioxidante	Estructura
Plancha Tol Negro	1	Pintura Antioxidante	Cubierta Externa
Acero Maquinado	2	Niquelado	Accesorios

Fuente: SERPRA CÍA. LTDA.

Los accesorios que visualmente la RVM dispone en su parte exterior y que son visibles al usuario son los siguientes:

- Máscara de protección de la pantalla de reproducción
- Máscara de protección de la impresora.
- Manga de acceso al mecanismo de aceptación de botellas.

- Manga de acceso al compartimento de rechazo.
- Puertas de acceso al compartimento de control, almacenamiento e impresión.
- Pulsador de emisión de tickets.
- Publicidad iluminada

A continuación se muestran las fotografías de la estructura de la RVM con todas las partes requeridas por la empresa auspiciante utilizando los materiales sugeridos en la tabla anterior. De igual forma se muestran las puertas de acceso al área de impresión, la cesta de almacenamiento y la puerta para el acceso al compartimento de control.



Figura 2.4 Estructura de la RVM – Toma Frontal



Figura 2.5 Estructura de la RVM – Toma Lateral con puertas de acceso

2.3. DISEÑO DEL MECANISMO DE ACEPTACIÓN DE BOTELLAS

2.3.1. SELECCIÓN DEL MECANISMO

Dadas las especificaciones técnicas dotadas por la empresa se debe diseñar un sistema de desplazamiento lineal piñón cremallera para el realizar la acción de validación o rechazo del objeto ingresado al recinto de recepción de botellas. Para iniciar el diseño del mecanismo de desplazamiento lineal se considera las siguientes dimensiones cuatro de las botellas vacías tipo PET comunes a ser validadas comprendidas entre los volúmenes de 250 hasta 3000cm³ con sus respectivas magnitudes físicas tabuladas a continuación.

Tabla 2.3 Dimensiones a Considerar - Mecanismo de Aceptación

ENVASE VACÍO	DIÁMETRO [mm]	LONGITUD [mm]	PESO [gr]
Coca Cola 250cm ³	54	175	16
Agua Tesalia 500cm ³	68	194	20
Sprite 1350cm ³	80	327	30
Coca Cola 3000cm³	115	365	42

Fuente: Propia

2.3.2. ANÁLISIS CINEMÁTICO

Dentro del análisis cinemático del mecanismo el desplazamiento de la cremallera guarda directa relación con la posición angular del piñón motriz en donde la primera consideración a tomar en cuenta para el diseño es el desplazamiento lineal total que tendrá el mecanismo. Para se considera que la distancia recorrida total será mayor al diámetro de la botella de mayor volumen a ser ingresada, en este caso son 115 mm de la botella de 3000 cm³, por lo tanto se considerará un factor de seguridad de 1,25.

$$Dist. Desplazamiento = \text{Diámetro botella} * FS \quad \text{Ecuación 2.1}$$

$$Dist. Desplazamiento = 115mm * 1.25 = 143.75mm \approx 144mm$$

Una vez establecida la distancia de desplazamiento se debe considerar que dicha distancia se la realiza en una sola dirección, por lo tanto se debe tomar que si el objeto ingresado es una botella vacía PET entre los 250 a los 3000cm³ pues se desplazará hacia el lado derecho mientras que si es rechazado el objeto ingresado se desplazará hacia el lado izquierdo de la bandeja de ingreso.

Por lo tanto el recorrido deberá ser realizado en las dos direcciones tomando en cuenta que la bandeja deberá partir de una posición inicial central en donde la bandeja de aceptación tendrá un orificio del tamaño del diámetro de la botella de mayor volumen. Por lo tanto la distancia total a recorrer por el mecanismo, desplazándose hacia la izquierda para aceptar las botellas válidas y hacia la derecha para rechazar un objeto no válido, será determinada de la siguiente manera.

$$Dist. Desplazamiento Total = Dist. Desplazamiento + \left(\frac{\text{Diámetro botella}}{2} \right) * FS$$

Ecuación 2.2

$$Dist. Desplazamiento Total = 144mm + \left(\frac{115mm}{2} \right) * 1.25 = 215.88mm$$

$$Dist. Desplazamiento Total \approx 216mm$$

Establecida la distancia de desplazamiento hacia cada lado se puede determinar la longitud de la cremallera a utilizar.

$$Longitud Cremallera = Dist. Desplazamiento Total * 2 \quad \text{Ecuación 2.3}$$

$$Longitud Cremallera = 216 * 2 = 432mm$$

Por otra parte una vez determinada la longitud de la cremallera se establece el diámetro del piñón que transmitirá el movimiento. La ecuación que relaciona la longitud recorrida por la cremallera con las dimensiones del piñón es la siguiente:

$$L = \theta * R \quad \text{Ecuación 2.4}$$

Donde:

θ : Posición Angular del Piñón.

L : Longitud Recorrida.

R : Radio del Piñón.

Si se conoce la distancia a recorrer por la tolva de aceptación y además se establece que el piñón complete una vuelta completa para transmitir el movimiento de los 216mm que se debe recorrer para mover la botella desde la posición central hasta la bandeja de rechazo o al conducto del mecanismo de compactación pues el radio para el piñón será:

$$R = \frac{L}{2\pi}$$
$$R = \frac{216mm}{2\pi} = 34.38mm \approx 35mm$$

Por lo tanto aproximando al inmediato superior el valor obtenido el diámetro del piñón a diseñar será de 70mm. Determinadas las relaciones de movimiento del mecanismo de aceptación se debe conocer los factores de velocidad y aceleración angular. Para encontrar la velocidad angular se determinará que el traslado de cada botella desde la posición central hasta uno de los extremos será de 1,5 segundos.

Por lo tanto:

$$Velocidad\ Lineal = \frac{Dist.Recorrida}{Tiempo\ de\ desplazamiento} \quad \text{Ecuación 2.5}$$

$$Velocidad\ Lineal = \frac{0.216[m]}{1.5 [s]} = 0.144 \left[\frac{m}{s} \right]$$

Utilizando la relación de la velocidad tangencial con el movimiento rotacional del piñón se establece la velocidad angular de la siguiente manera:

$$V_{tg} = \omega * R \quad \text{Ecuación 2.6}$$

Donde:

ω : Velocidad Angular del Piñón.

V_{tg} : Velocidad tangencial.

R : Radio del Piñón.

Entonces se establece que la velocidad lineal encontrada anteriormente es igual a la velocidad tangencial por lo tanto se tiene que:

$$\omega = \frac{\text{Velocidad Lineal}}{R} = \frac{0.144 \left[\frac{m}{s} \right]}{0.035[m]}$$

$$\omega = 4.11 \left[\frac{rad}{s} \right]$$

$$\omega = 4.11 \left[\frac{rad}{s} \right] * \left[\frac{1 Rev}{2\pi rad} \right] * \left[\frac{60s}{1min} \right] = 39.27 [RPM]$$

2.3.3. DISEÑO DE PARTES Y ELEMENTOS CONSTITUTIVOS

Para el diseño de las partes y elementos constitutivos del sistema de aceptación se debe conocer el peso de las partes que deberá trasladar. En este caso los pesos de los elementos conocidos son los siguientes:

Bandeja de traslado:	$1.5[kg] * 9.81 \left[\frac{m}{s^2} \right]$	$= 14.72 [N]$
Accesorios Iluminación:	$0.5[kg] * 9.81 \left[\frac{m}{s^2} \right]$	$= 4.91 [N]$
*Botella 3000cm ³ Llena:	$3[kg] * 9.81 \left[\frac{m}{s^2} \right]$	$= 29.43 [N]$

$$\text{Peso Conocido} \approx 50 [N]$$

*Se considera como factor de seguridad el peso de una botella de 3000cm³ completamente llena de líquido.

Para determinar un factor de seguridad apropiado se considera que el tipo de carga sea uniforme en un tiempo de trabajo de 8 a 10 horas diarias se toma el valor de 2. Por lo tanto la fuerza a ejercer por los dientes de la cremallera será determinada por la siguiente ecuación.

$$F_{tg} = \text{Peso Conocido} * FS = 50[N] * 2 = 100 [N] \quad \text{Ecuación 2.7}$$

A continuación se muestra el sistema piñón-cremallera implementado en la RVM para el sistema de transporte de la recámara de identificación.

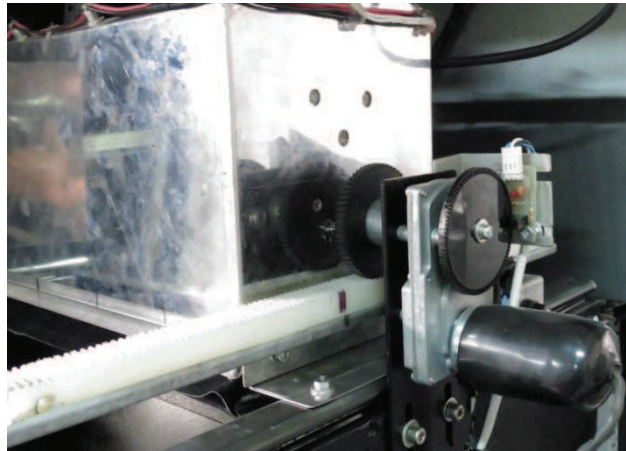


Figura 2.6 Sistema Piñón-Cremallera implementado

2.4. DISEÑO DEL SISTEMA DE COMPACTACIÓN Y ALMACENAMIENTO DE BOTELLAS

En la *Sección 1.3.5* se determinó que un Compactador Lineal Neumático es la solución óptima para el sistema de compactación. De manera general lo que se pretende es diseñar una prensa neumática que compacte transversalmente las botellas PET optimizando así el espacio destinado al almacenamiento.

El diseño del sistema de compactación que a continuación se presenta comprende desde los ensayos de compresión en las botellas PET de consumo masivo, la determinación de la fuerza de compactación y la selección adecuada de los componentes del sistema.

2.4.1. ENSAYO DE COMPRESIÓN EN BOTELLAS PET

El consumo de bebidas envasadas en botellas PET en nuestro país es vasto lo que implica que la variedad de formas y densidades del PET utilizado en la manufactura de esas botellas es extenso por lo que nos hemos visto en la

necesidad de recolectar la mayor cantidad de botellas PET existentes en el mercado nacional con la finalidad de asegurar la fiabilidad del ensayo de compresión y determinar la máxima fuerza necesaria para compactar transversalmente cualquier tipo de botella.

2.4.1.1. Propiedades básicas de las botellas a ensayar

Para desarrollar el ensayo de compresión se recolectaron muestras de botellas PET de diferentes bebidas, marcas y volúmenes. En la siguiente figura se puede observar claramente los ejemplares a considerar para el ensayo cuyas características son detalladas en la siguiente tabla.



Figura 2.7 Muestras de botellas PET

Tabla 2.4 Propiedades básicas de botellas PET comerciales.

TIPO DE BEBIDA	MARCA	VOLUMEN [cm ³]	LONGITUD [mm]	DIÁMETRO [mm]
Agua	Gütig	500	250	66
	Dasanni	500	214	66
	Vivant	500	228	68
	All Natural	500	215	61
	Manantial Con Gas	500	235	65
	Manantial Sin Gas	500	235	62
	Tesalia	500	195	67
	Ovit	500	235	65
Gaseosa	Pepsi	400	215	61
	Fanta	410	215	64
	Coca-Cola	250	176	53
	Coca-Cola	410	220	64
	Coca-Cola	500	250	65
	Coca-Cola	1350	335	80
	Coca-Cola	3000	367	115
	Fruit	500	240	66

	Fanta	500	245	67
	Orangine	500	220	68
Hidratante	Profit	500	250	64
	Gatorade	591	247	69
Jugo	Tesalia Ice	500	230	65
	Cifut Tropical Punch	500	240	65
Jugo	Tampico Citrus Punch	500	225	67
Té	Nestea	330	220	65
	FuzeTea	400	198	58
	Nestea	500	224	66

Fuente: Propia

2.4.1.2. Medición de la fuerza de compactación

La fuerza de compactación se obtuvo mediante mediciones experimentales realizadas en pruebas de compresión desarrolladas en una Máquina de Ensayos Universales MTS TK/T5002 (Figura 2.8) ubicada en el Laboratorio de Resistencia de Materiales del Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica.

Las características principales de la máquina se tabulan a continuación:

Tabla 2.5 Características Máquina de Ensayos Universales MTS TK/T5002

Código	RM-14
Manual	MRM-14
Marca	MTS
Modelo	TK/T5002
Voltaje	110/120 V
Fases	1
Ciclos	60 Hz
Peso	300 kg
Capacidad Máxima	5000 N
Velocidad Máxima de Avance	8.5 mm/s

Fuente: Hoja de Datos Laboratorio de Resistencia de Materiales.



Figura 2.8 Máquina de Ensayos Universales MTS TK/T5002

La máquina MTS TK/T5002 tiene acoplada una celda de carga tipo “S” (Figura 2.9) conectada a un indicador inteligente AFTI Quantrol (Figura 2.10) para medir y visualizar la fuerza de compresión en el ensayo.



Figura 2.9 Celda de carga tipo “S”



Figura 2.10 Indicador Inteligente AFTI Quantrol

En el ensayo de compresión se colocó la botella como se muestra en la Figura 2.11 y a una velocidad de 4mm/s se ejecuta la compactación. Este proceso se repite tres veces por cada tipo de botella recolectada procurando repetitividad en los resultados del ensayo.



Figura 2.11 Ensayo de Compresión de botellas PET

De la toma de datos en el ensayo se obtuvo la siguiente tabla:

Tabla 2.6 Fuerzas de compactación experimentales para botellas PET vacías.

TIPO DE BEBIDA	MARCA	VOLUMEN [cm ³]	F ₁ [N]	F ₂ [N]	F ₃ [N]	F [N]
Agua	Güitig	500	1272	1884	1530	1562
	Dasanni	500	1820	1836	1733	1796
	Vivant	500	573	640	752	655
	All Natural	500	1016	1058	1035	1036
	Manantial Con Gas	500	811	743	763	772
	Manantial Sin Gas	500	1156	1172	1244	1191
	Tesalia	500	589	661	751	667
	Ovit	500	946	1007	1032	995
Gaseosa	Pepsi	400	1016	1032	1032	1027
	Fanta	410	1690	1820	1650	1720
	Coca-Cola	410	1668	1644	1613	1642
	Coca-Cola	500	1620	1635	1606	1620
	Coca-Cola	3000	1790	1725	1750	1755
	Fruit	500	1331	1326	1342	1333
	Fanta	500	1853	1832	1843	1843
	Orangine	500	1521	1600	1548	1556
Hidratante	Profit	500	1200	1382	1195	1259
	Gatorade	591	1850	1801	1815	1822
Jugo	Tesalia Ice	500	721	775	695	730
	Cifut Tropical Punch	500	689	625	633	649
	Tampico Citrus Punch	500	699	634	646	660
Té	FuzeTea	400	1571	1541	1579	1564
	Nestea	500	560	596	546	567

Fuente: Propia

Revisando la Tabla 2.6 observamos que la botella PET que requiere de la mayor fuerza de compactación corresponde a la marca Gatorade de 591cm³ y asciende a 1822 N, este valor es trascendente pues de éste depende la selección de los componentes.



Figura 2.12 Resultados del ensayo de compactación

Del ensayo realizado se pudo obtener la característica de compactación de las botellas PET dando como resultado la reducción de su dimensión diametral a un tercio de su tamaño original, lo que conlleva a garantizar la reducción del volumen de almacenamiento en igual proporción cumpliendo así los requerimientos de la empresa auspiciante.

2.4.1.3. Cálculo de la fuerza máxima de compactación

Como diseñadores de este sistema de compactación nos vemos en la obligación de cuantificar razonablemente la incertidumbre inherente al modelo experimental aplicado en las mediciones por lo que recurrimos a una selección adecuada de un factor de seguridad N basados en tres factores relacionados con la calidad de información disponible.

Generalmente un factor de seguridad para materiales dúctiles no debe ser seleccionado con más de un punto decimal de precisión y está determinado por la ecuación:

$$N = \text{MAX}(f_1, f_2, f_3) \quad \text{Ecuación 2.8}$$

Para determinar los factores f_1 , f_2 y f_3 aplicamos los conceptos sintetizados en la tabla que sigue:

Tabla 2.7 Factores utilizados para determinar un factor de seguridad

Información	Calidad de la información	Factor
		<u>f1</u>
Datos del material disponibles de pruebas	El material realmente utilizado fue probado	1,3
	Datos representativos del material disponibles a partir de pruebas	2
	Datos suficientemente representativos del material disponible a partir de pruebas	3
	Datos poco representativos del material disponibles a partir de pruebas	5+
		<u>f2</u>
Condiciones del entorno en el cual se utilizará	Idénticas a las condiciones de prueba del material	1,3
	Esencialmente en un entorno de ambiente de habitación	2
	Entorno moderadamente agresivo	3
	Entorno extremadamente agresivo	5+
		<u>f3</u>
Modelos analíticos para carga y esfuerzos	Los modelos han sido probados contra experimentos	1,3
	Los modelos representan al sistema con precisión	2
	Los modelos representan al sistema con aproximadamente	3
	Los modelos son una burda aproximación	5+

Fuente: "Diseño de máquinas". Primera Edición. Robert L. Norton

Selección factor f_1 : El material realmente fue probado en el ensayo de compresión por lo que corresponde $f_1=1.3$.

Selección factor f_2 : Las condiciones del entorno en el cual se utilizará el sistema son en esencia las de un entorno de ambiente de habitación pues serán instaladas en lugares cerrados y cubiertos por motivos de seguridad e integridad de la máquina, entonces $f_2=2$.

Selección factor f_3 : El modelo de análisis de representan son aproximados pues equipo usado fue la máquina de ensayos universales MTS y no un cilindro neumático específicamente en consecuencia: $f_3=3$.

Aplicando la Ecuación 2.8:

$$N = \text{MAX}(1.3, 2, 3) \Rightarrow N = 3$$

En la sección 2.4.1.2 se determinó que la fuerza de compresión requerida para la compactación era:

$$F_c = 1822 \text{ [N]}$$

Se tiene que:

$$F_{c_{m\acute{a}x}} = N \cdot F_c \quad \text{Ecuación 2.9}$$

Entonces:

$$F_{c_{m\acute{a}x}} = 5466 \text{ [N]}$$

Por lo tanto esa fuerza es la que determinará la selección de los componentes en la sección correspondiente.

2.4.2. DISEÑO DEL CIRCUITO DE POTENCIA NEUMÁTICO PARA LA COMPACTACIÓN

El diseño del circuito de potencia neumático es trascendental en este punto del desarrollo del sistema de compactación pues así determinaremos los componentes necesarios para la instalación.

El proceso de compactación corresponde a la manipulación de un cilindro de doble efecto sobre el cual se tendrá el control de caudal mediante una válvula antiretorno estranguladora para regular la velocidad de desplazamiento del vástago. Además se dispondrá de una fuente de aire comprimido (compresor) con su respectivo depósito de almacenamiento y la unidad de mantenimiento.

La Figura 2.13 y la Tabla 2.8 muestran con claridad los elementos neumáticos utilizar.

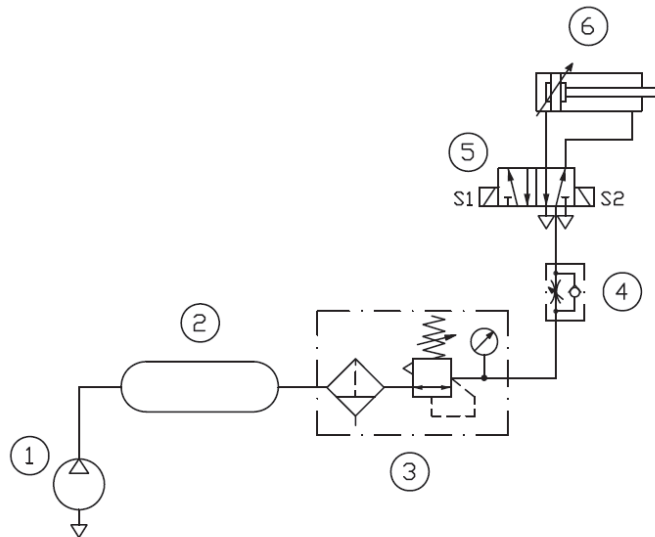


Figura 2.13 Circuito de potencia neumático del sistema de compactación

Tabla 2.8 Elementos neumáticos del sistema de compactación

Numeración	Elemento
1	Compresor de Pistón
2	Depósito de Almacenamiento
3	Unidad de Mantenimiento
4	Válvula Antiretorno Estranguladora
5	Válvula 5/2 con accionamiento eléctrico (solenóide)
6	Cilindro de doble efecto

Fuente: Propia

2.4.3. SELECCIÓN DE COMPONENTES

Los elementos numerados en la Tabla 2.8 serán seleccionados en esta sección partiendo del dimensionamiento del cilindro compactador normalizado de doble efecto capaz de comprimir las botellas con una fuerza $F_{C_{máx}} = 5466 \text{ [N]}$, presión de trabajo de 0.7 [MPa] (7 [bar]) y una carrera máxima de 150 [mm].

De la selección del cilindro dependerá el consumo de aire y en consecuencia de la capacidad del compresor y la unidad de almacenamiento. Cabe mencionar que la selección de los componentes en su mayoría será realizada por catálogo pues la información que se presenta en ellos es bastante precisa y confiable además que cumplimos con normas importantes dentro de lo que es el proceso de diseño y es la forma más práctica y real de escogerlos

2.4.3.1. Cilindro neumático para compactación

El actuador escogido para la compactación fue un cilindro de doble efecto normalizado ISO 15552. Se usará el catálogo de la empresa SMC para cilindros Serie C95 y el de la empresa PARKER Serie P1D ya que en estos están disponibles las tablas que poseen información respecto a la fuerza que pueden generar los cilindros para luego escoger el modelo comercial, que después de investigar en el mercado, teniendo presente disponibilidad y costos, hemos escogido la marca CHANTO y su catálogo de cilindros neumáticos normalizados Serie AQ para seleccionar el actuador para la compra.

Norma ISO 15552

La norma ISO 15552 hace referencia a la construcción y dimensionamiento de los cilindros de doble efecto. Esta norma corresponde a las anteriores ISO 6431, DIN ISO 6431, VDMA 24562, NF E 49 003.1 y UNI 10290.

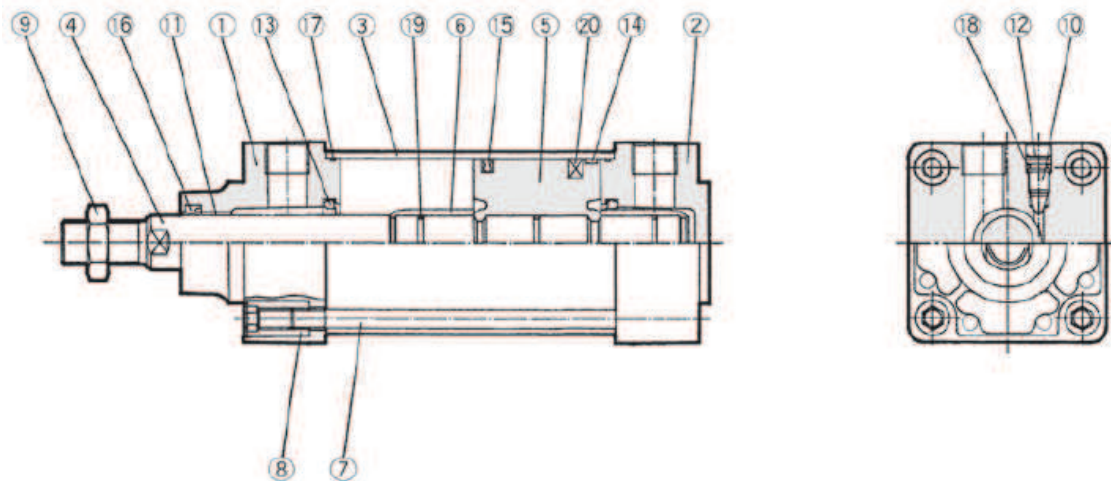
En las siguientes tablas se muestran las características básicas de trabajo y construcción.

Tabla 2.9 Características de los cilindros normalizados ISO 15552

Diámetro	ø32	ø40	ø50	ø63	ø80	ø100
Funcionamiento	Doble efecto					
Fluido	Aire comprimido					
Presión de prueba	1.5MPa					
Presión máx. de trabajo	1.0MPa					
Presión mín. de trabajo	0.05MPa					
Temperatura ambiente y de fluido	Sin imán -10 a 70°C (sin congelación)					
	Con imán -10 a 60°C (sin congelación)					
Lubricación	No necesaria (Sin lubricación)					
Velocidad del émbolo	50 a 1000mm/s					
Tolerancia de carrera admisible	a 250: ${}^{+1.0}_0$, 251 a 1000: ${}^{+1.4}_0$, 1001 a 1500: ${}^{+1.8}_0$					
Amortiguación	Ambos extremos (Amortiguación neumática)					
Tamaño de conexión	G1/8	G1/4	G1/4	G3/8	G3/8	G1/2
Montaje	Modelo básico, escuadra, brida delantera, brida trasera, junta flotante fijación oscilante macho, fijación oscilante hembra, muñón oscilante, rótula, horquilla hembra					

Fuente: SMC, Catálogo de cilindros serie C95 (2011)

Tabla 2.10 Características constitutivas de los cilindros normalizados ISO 15552



Nº	Descripción	Material	Nota
①	Culata anterior	Aleación de aluminio	
②	Culata posterior	Aleación de aluminio	
③	Tubo del cilindro	Aleación de aluminio	(Anodizado duro)
④	Vástago	Acero C45	(Cromado duro)
⑤	Émbolo	Aleación de aluminio	(Cromado)
⑥	Anillo amortiguación	Latón	
⑦	Tirante	Acero	(Cincado)
⑧	Tuerca del tirante	Acero	(Cincado)
⑨	Tuerca del vástago	Acero	(Cincado)
⑩	Tornillo de reg. de amort.	Acero	
⑪	Casquillo	Cojinete acero	
⑫	Arandela de sellado	Acero	
⑬	Junta de amortiguación	PUR	

Nº	Descripción	Material	Nota
⑭	Anillo guía	PTFE	
⑮	Junta del émbolo	NBR	
⑯	Junta del vástago/junta de sellado	NBR	
⑰	Junta estanq. tubo cilindro	NBR	
⑱	Junta de tornillo de amort.	NBR	
⑲	Junta estanqueidad émbolo	NBR	
⑳	Aro magnético		

Fuente: SMC, Catálogo de cilindros serie C95 (2011)

Selección por catálogo

Debemos seleccionar el cilindro que cumpla con las especificaciones establecidas en la Secciones 2.4.1.3 y 2.4.3 y que se tabulan a continuación:

Tabla 2.11 Especificaciones teóricas del cilindro

Presión de trabajo	0.7 [MPa]
Fuerza en la carrera de salida	5466 [N]
Carrera	150 [mm]

Fuente: Propia

Ahora recurrimos al catálogo de cilindros neumáticos PARKER de donde extrajimos la Tabla 2.12 que hace referencia a las fuerzas de los cilindros de doble efecto.

Tabla 2.12 Fuerzas de los cilindros de doble efecto

Diám. cil. vástago mm	Carrera	Área piston cm ²	Max. fuerza teórica en N (bar)									
			1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0
32/12	+	8,0	80	161	241	322	402	483	563	643	724	804
	-	6,9	69	138	207	276	346	415	484	553	622	691
40/16	+	12,6	126	251	377	503	628	754	880	1005	1131	1257
	-	10,6	106	212	318	424	530	636	742	848	954	1060
50/20	+	19,6	196	393	589	785	982	1178	1374	1571	1767	1963
	-	16,5	165	330	495	660	825	990	1155	1319	1484	1649
63/20	+	31,2	312	623	935	1247	1559	1870	2182	2494	2806	3117
	-	28,0	280	561	841	1121	1402	1682	1962	2242	2523	2803
80/25	+	50,3	503	1005	1508	2011	2513	3016	3519	4021	4524	5027
	-	45,4	454	907	1361	1814	2268	2721	3175	3629	4082	4536
100/25	+	78,5	785	1571	2356	3142	3927	4712	5498	6283	7069	7854
	-	73,6	736	1473	2209	2945	3682	4418	5154	5890	6627	7363
125/32	+	122,7	1227	2454	3682	4909	6136	7363	8590	9817	11045	12272
	-	114,7	1147	2294	3440	4587	5734	6881	8027	9174	10321	11468

+ = Carrera de salida
- = Carrera de entrada

Fuente: PARKER, Catálogo de cilindros neumáticos – mayo 2010

Ahora en base a la columna de presión de trabajo buscamos la fuerza teórica para la carrera de salida e intersecamos el diámetro del cilindro y el vástago, obteniendo un diámetro de cilindro de 100 [mm].

Del catálogo de cilindros neumáticos normalizados CHANTO Serie AQ extraemos la tabla de carreras:

Tabla 2.13 Carreras de los cilindros de doble efecto

Stroke \ Bore	25	50	75	100	125	150	175	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900	950	1000
Ø32	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Ø40	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Ø50	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Ø63	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Ø80	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Ø100	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Ø125	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●

Fuente: CHANTO, Catálogo de cilindros normalizados serie AQ, 2012.

Buscamos el diámetro obtenido de 100 [mm] y buscamos si está disponible una carrera teórica que se especificó.

Ahora debemos determinar el código de cilindro seleccionado para realizar el pedido y para ello recurrimos a la Figura 2.14.

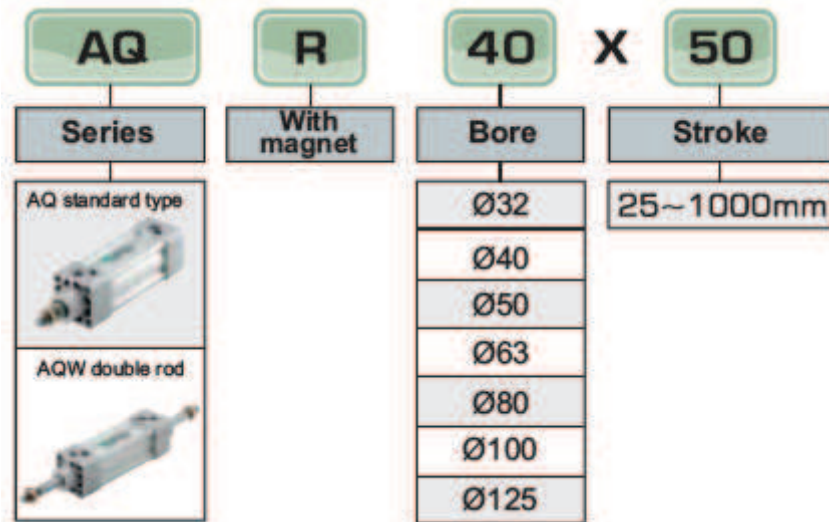


Figura 2.14 Código estándar para los cilindros CHANTO normalizados ISO 15552

Por lo tanto el código para el pedido sería AQR100X150. De las selecciones anteriores obtenemos las especificaciones reales del cilindro, tabuladas a continuación:

Tabla 2.14 Especificaciones reales del cilindro

Código de Pedido	AQR100X150
Presión de trabajo	0.7 [MPa]
Diámetro del cilindro	100 [mm]
Diámetro del vástago	25 [mm]
Fuerza en la carrera de salida	5498 [N]
Fuerza en la carrera de entrada	5154 [N]
Carrera	150 [mm]
Rosca de conexión	G1/2"

Fuente: Propia

Análisis de pandeo

Para asegurar el buen funcionamiento del sistema compactador es imprescindible comprobar que el fenómeno de pandeo no se presente pues limitaría la elección del cilindro debido a que el vástago está sometido a compresión y es en ese tipo de sollicitaciones que dicho fenómeno aparece.

El objetivo de esta sección es evitar que el vástago se flexione lateralmente y genere esfuerzos radiales sobre los bujes y la camisa del cilindro, acortando la vida útil o la rotura completa del cilindro.

Para evitar pandeo en el cilindro debe verificarse que:

$$K \cdot L < L_{m\acute{a}x} \quad \text{Ecuación 2.10}$$

Donde:

L: Carrera

$L_{m\acute{a}x}$: Carrea máxima por pandeo

K: Factor de corrección de montaje

Con las especificaciones de trabajo del sistema: fuerza $F_{C_{m\acute{a}x}} = 5466 \text{ [N]}$ y diámetro 100 mm ingresamos al diagrama de la figura 2.15 para obtener la carrera máxima pandeo.

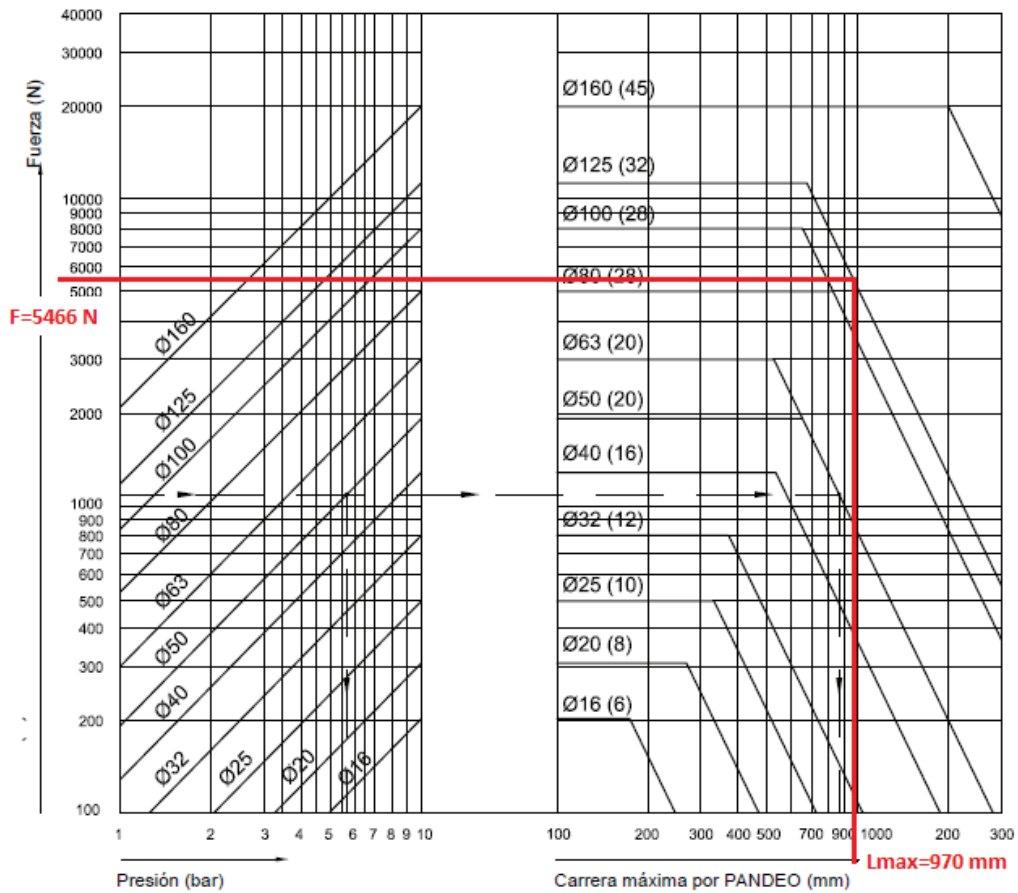


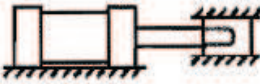
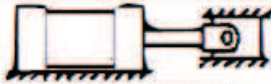

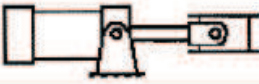


Figura 2.15 Diagrama de Pandeo

Del diagrama de pandeo establecemos que la carrera máxima por pandeo es: $L_{m\acute{a}x} = 970 \text{ [mm]}$.

Ahora bien, los factores constructivos no son los únicos que influyen en la limitación de la carrera. Hay causas que están ligadas a las condiciones de montaje a las que se le somete al cilindro.

En la Tabla 2.15 se ilustran los tipos de carga a los que pueden estar sometidos los cilindros siendo estos:

Tabla 2.15 Factor de Montaje

Tipos de montaje	Conexión del extremo del vástago	Tipo de conexión	Factor de pandeo
Grupos 1 o 3 - Los cilindros de gran longitud de carrera deben montarse usando en un extremo una base rígida y alineada para soportar la fuerza principal y en el extremo opuesto un soporte parecido. Se aconseja un soporte intermedio para el caso de carreras muy largas	Fijo y guiado rígido	I 	0,5
	Pivote y guiado rígido	II 	0,7
	Soporte sin guiado rígido	III 	2
Grupo 2	Pivote y guiado rígido	IV 	1
	Pivote y guiado rígido	V 	1,5
	Pivote y guiado rígido	VI 	2

Fuente: CREUS SOLÉ ANTONIO, Hidráulica y Neumática. Primera Edición.

De la Tabla 2.15 determinamos que las condiciones de montaje para nuestro sistema de compactación son congruentes con el caso 4 por lo que el factor de corrección será $K = 0.5$.

Aplicando la Ecuación 2.10 tenemos:

$$75 [mm] < 975 [mm]$$

Por lo tanto se concluye que el fenómeno de pandeo no se presentará en el cilindro compactador.

En la siguiente imagen se muestra claramente la disposición física y el montaje del cilindro de doble efecto previamente seleccionado.

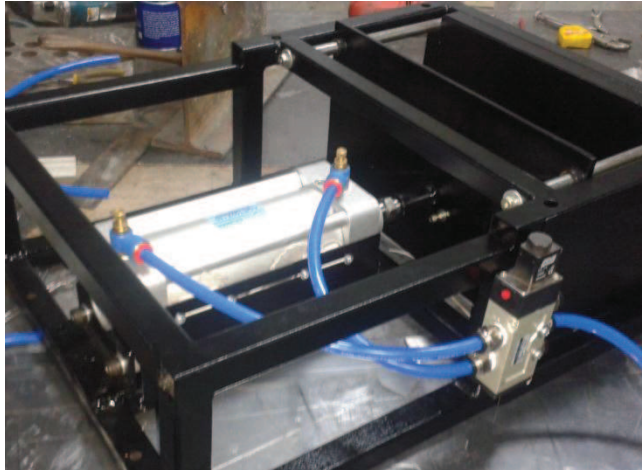


Figura 2.16 Montaje del Cilindro de Doble Efecto Seleccionado

Consumo de aire

Para el cálculo del consumo de aire para el cilindro compactador aplicaremos la siguiente expresión:

$$Q = C \cdot L \cdot N \cdot nc \quad \text{Ecuación 2.11}$$

Donde:

C: Consumo de aire $\left[\frac{l}{\text{ciclos} \cdot \text{mm de carrera}} \right]$

L: Carrera del cilindro $[mm]$

N: Número de efectos del cilindro $[U]$

nc: Número de ciclos $\left[\frac{\text{ciclos}}{\text{min}} \right]$

Para determinar el valor numérico del consumo de aire expresado en l/mm de carrera “C” vamos a recurrir a la Figura 2.17, obteniendo un coeficiente

$C = 0,067 \left[\frac{l}{\text{ciclo} \cdot \text{mm de carrera}} \right]$ además ya se ha especificado una carrera

$L = 100 [mm]$.

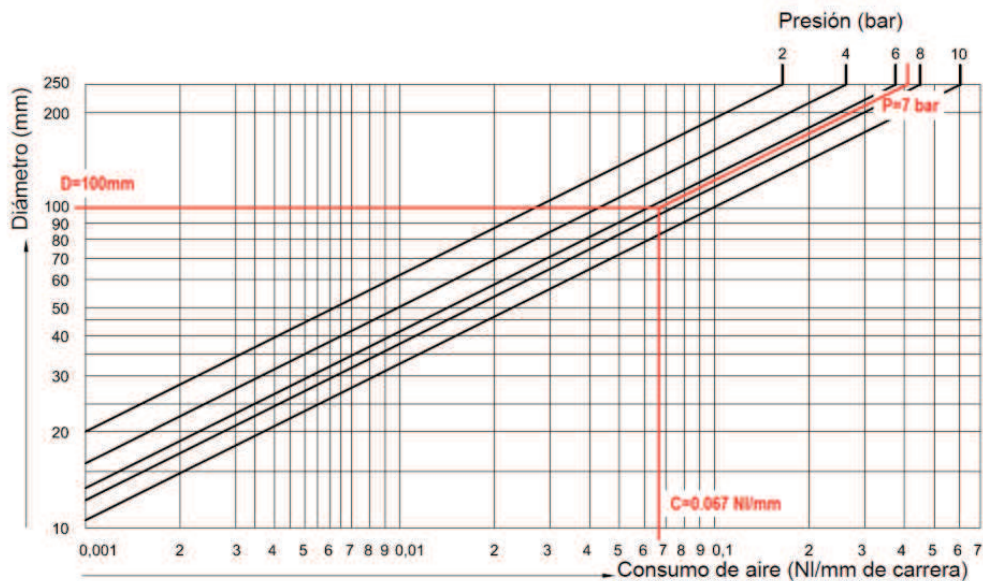


Figura 2.17 Diagrama de Consumo de Aire

Respecto al número de efectos del cilindro $N=2$. Para el número de ciclos supondremos que se comprimirán un número máximo de 6 botellas por minutos equivalente a $nc = 6 \left[\frac{\text{ciclos}}{\text{min}} \right]$.

Aplicando el valor de cada coeficiente en la Ecuación 2.11 obtenemos que el consumo de aire requerido por el cilindro es $Q = 80,4 \left[\frac{l}{\text{min}} \right]$ que a su vez representa el consumo total de aire del sistema.

2.4.3.2. Compresor

Hipótesis de consumo

Para dimensionar eficientemente la red neumática debe tenerse en cuenta que el compresor debe suministrar tanto aire como el que el cilindro compactador consume de manera intermitente. Lo normal es que dicho cilindro tenga tiempos muertos pues dentro de cada ciclo de reciclaje el sistema está ocupado en el proceso de aceptación o imprimiendo el comprobante al final de

un ciclo exitoso y en estos tiempos muertos el compresor tendrá tiempo para cargar a presión el depósito o la red de aire comprimido⁷.

Factor de uso (f_u)

El tiempo en que la máquina está consumiendo aire, es decir la duración de la conexión se denomina factor de uso, que es propio de tipo de máquina y que está determinado por la forma en que esta trabaja. Estos coeficientes se han determinado mediante cronometraje e diversos trabajos realizados en varias fábricas⁸.

En la siguiente tabla se detallan algunos valores referenciales para diversas unidades consumidoras:

Tabla 2.16 Factores de uso referenciales

Unidad Consumidora	Duración de conexión
Taladradora	30%
Lijadora	40%
Martillo cincelador	30%
Mortero	15%
Moldeadora	20%
Pistola neumática	10%
Máquina para alimentar piezas	80%

Fuente: HESSE STEFAN. Aire comprimido, fuente de energía. FESTO 2002.

Factor de simultaneidad (f_s)

El factor de simultaneidad es también un valor empírico. Las máquinas que no funcionan de modo continuo suelen conectarse en diversos momentos, con lo que no todas funcionan al mismo tiempo⁹.

A continuación se detalla una tabla con factores que se pueden aplicar:

⁷ (Solé, 2007, pág. 144)

⁸ (Solé, 2007, pág. 145)

⁹ (Hesse, 2002, pág. 65)

Tabla 2.17 Factores de simultaneidad

Cantidad de unidades consumidoras	Factor de simultaneidad	Cantidad de unidades consumidoras	Factor de simultaneidad
1	1	9	0,73
2	0,94	10	0,71
3	0,89	11	0,69
4	0,86	12	0,68
5	0,83	13	0,67
6	0,80	14	0,67
7	0,77	15	0,65
8	0,75	100	0,20

Fuente: HESSE STEFAN. Aire comprimido, fuente de energía. FESTO 2002.

Cálculo del consumo de la red neumática

Para determinar el consumo de la red neumática se aplicarán dos factores que han sido determinados empíricamente por las industrias: factor de uso y factor de simultaneidad, ambas involucradas en la siguiente expresión:

$$Q_C = \sum_{i=1}^n \left(a \cdot Q_i \cdot \frac{f_u}{100} \cdot f_s \right) \quad \text{Ecuación 2.12}$$

Donde:

a : Número de unidades de consumo

Q_i : Consumo por cada unidad neumática en $\left[\frac{l}{\text{min}} \right]$

f_u : Factor de uso en [%]

f_s : Factor de simultaneidad [U]

Evidentemente para la compresión de las botellas se ha establecido que un solo cilindro es suficiente por lo que $a = 1$ e $i = 1$ entonces la Ecuación 2.12 quedaría de la forma que sigue para una sola unidad neumática de consumo:

$$Q_C = Q \cdot \frac{f_u}{100} \cdot f_s \quad \text{Ecuación 2.13}$$

En la Sección 2.4.3.1.4 se estableció un consumo de aire $Q = 80,4 \left[\frac{l}{\text{min}} \right]$. En base a la Tabla 2.16 supondremos un factor de uso del 90% pensando en condiciones extrema de utilización. Y para terminar tomamos el valor $f_s = 1$ de la Tabla 2.17 por utilizar solo una unidad de consumo. Reemplazando dichos valores en la Ecuación 2.13 obtenemos que el consumo de la red neumática se ha determinado con $Q_C = 72,36 \left[\frac{l}{\text{min}} \right]$.

Corrección del consumo de la red neumática

El valor obtenido Q_C debe ser corregido mediante tres factores más que predicen posibles ampliaciones, compensan fugas y picos de consumo, dicho factores se describirán en las secciones subsecuentes.

Factor de reserva para posibles ampliaciones posteriores (f_r)

Hay que considerar que las redes de aire comprimido pueden ser usadas durante periodos de tiempo considerablemente largos por lo que se recomienda prever el montaje posterior de unidades consumidoras adicionales y disponer de las correspondientes reservas de aire¹⁰.

Es típico determinar la reserva para posibles ampliaciones en un valor de 35% lo que representa numéricamente un valor para este factor de 1,35.

Factor de consideración de posibles fugas (f_f)

Las fugas en una red neumática están relacionadas directamente con la calidad del montaje de la instalación y el mantenimiento que se realice sobre la red. Para cuantificar un montaje de instalación y mantenimiento de alta calidad se supone un factor de consideración de posibles fugas de 1,1.

¹⁰ (Hesse, 2002, pág. 66)

Factor de compensación de los picos de consumo (f_{pc})

Usualmente para compensar los picos de consumo (que superan el consumo medio) éste factor toma el valor de 2 (duplican el caudal de consumo) pues por experiencia se sabe que el consumo medio de aire es entre un 20 y un 60 por ciento del consumo máximo de aire¹¹.

Cálculo del consumo de aire corregido

Para determinar el consumo final de aire comprimido utilizaremos la siguiente expresión:

$$Q_F = f_r \cdot f_f \cdot f_{pc} \cdot Q_C \quad \text{Ecuación 2.14}$$

Donde:

f_r : factor de reserva para posibles ampliaciones

f_f : factor de consideración de posibles fugas

f_{pc} : factor de compensación de los picos de consumo

Para el cálculo del consumo se tomarán las siguientes consideraciones de diseño:

- $f_r = 1$: No se tiene planificado ampliar la red neumática pues el sistema no lo requiere debido a su simplicidad.
- $f_f = 1,1$: Montaje de instalación y mantenimiento de alta calidad.
- $f_{pc} = 2$: Criterio de diseño conservador, se pretende evitar desabastecimientos de aire en la red.
- $Q_C = 72,36 \left[\frac{l}{\text{min}} \right]$: Este consumo fue calculado en la Sección 2.4.3.2.1.3.

Remplazando f_r , f_f , f_{pc} y Q_C en la Ecuación 2.14 obtenemos que el consumo corregido de aire es:

$$Q_F = 159,2 \left[\frac{l}{\text{min}} \right]$$

¹¹ (Hesse, 2002, pág. 66)

Depósito de almacenamiento de aire comprimido

Son varias las funciones que un depósito de almacenamiento de aire comprimido debe cumplir, el más trascendental es suministrar aire a la presión deseada de manera inmediata sin tener que poner en marcha el compresor. Otra de sus funciones es abastecer las necesidades de aire en los picos de consumo de la red y amortiguar las pulsaciones que usualmente se producen en los compresores, en su mayoría en los alternativos¹².

Selección del depósito en función de la frecuencia de conexión

Para compresores que no funcionen de modo continuo, es decir, que se pone en marcha solo cuando la presión del depósito disminuye hasta un nivel de presión previamente definido, entonces debe tenerse en cuenta la cantidad de operaciones de conexión y desconexión del motor. Para evitar un desgaste prematuro el motor sólo debe ponerse en marcha entre 6 y 10 veces por hora¹³. Para calcular el volumen del depósito, deberá aplicarse la siguiente ecuación:

$$V_{DEP} = \frac{15 \cdot Q_F \cdot P_{ATM}}{Z_S \cdot \Delta P} \quad \text{Ecuación 2.15}$$

Donde:

Q_F : Consumo corregido de aire en $\left[\frac{l}{\text{min}} \right]$

P_{ATM} : Presión atmosférica del entorno en $[bar]$

Z_S : Frecuencia de conexión en $[h^{-1}]$

ΔP : Diferencia de la presión en conexión en $[bar]$

¹² (Navarra, 2008, pág. 12)

¹³ (Hesse, 2002, pág. 103)

Influencia de la altitud en el proceso de compresión

Los cambios en las condiciones ambientales también deben tenerse en cuenta a la hora de dimensionar una red neumática. Tanto la presión del entorno como la temperatura disminuyen con la altitud sobre el nivel del mar. Esta presión de entrada más baja afecta la relación de presiones tanto para los compresores como a las unidades de consumo lo que en la práctica refleja un significativo impacto en el consumo de aire y energía. A mayor altitud la potencia de los motores eléctricos y de combustión interna también se ve afectada¹⁴. En la siguiente tabla se muestra la variación de la presión atmosférica en función de la altitud:

Tabla 2.18 Presión atmosférica en relación a la altura sobre el nivel del mar

Height below/above sea level	Pressure bar(a)	Temperature °C
-1000	1.138	21.5
-800	1.109	20.2
-600	1.080	18.9
-400	1.062	17.6
-200	1.038	16.3
0	1.013	15.0
200	0.989	13.7
400	0.966	12.4
600	0.943	11.1
800	0.921	9.8
1000	0.899	8.5
1200	0.877	7.2
1400	0.856	5.9
1600	0.835	4.6
1800	0.815	3.3
2000	0.795	2.0
2200	0.775	0.7
2400	0.756	-0.6
2600	0.737	-1.9
2800	0.719	-3.2
3000	0.701	-4.5
3200	0.683	-5.8
3400	0.666	-7.1
3600	0.649	-8.4
3800	0.633	-9.7
4000	0.616	-11.0
5000	0.540	-17.5
6000	0.472	-24.0
7000	0.411	-30.5
8000	0.356	-37.0

Fuente: Atlas Copco, Compressed Air Manual, 7th Edition 2012.

¹⁴ (Copco, 2012, pág. 70)

Cálculo del volumen del depósito de almacenamiento

Para el cálculo del volumen del depósito de aire tenemos los datos que se detallan a continuación:

- $Q_F = 159,2 \left[\frac{l}{\text{min}} \right]$: Calculado en la Sección 2.4.3.2.2.4.
- $P_{ATM} = 0.719 [\text{bar}]$: Presión seleccionada en la Tabla 2.18 a 2800 m sobre el nivel del mar.
 - $Z_s = 40 [h^{-1}]$: El espacio disponible para el depósito es muy limitado. A mayor frecuencia de conexión menor el tamaño del depósito.
 - $\Delta P = 1 [\text{bar}]$: Variación admisible en la presión del depósito.

Aplicando los datos antes mencionados en la Ecuación 2.15 tenemos como resultado que el volumen necesario para el depósito de aire es $V_{DEP} = 42,5 [l]$.

Selección por catálogo

En resumen los requerimientos del compresor son los siguientes:

- $V_{DEP} = 42,5 [l]$
- $P = 7 [\text{bar}]$
- $Q_F = 159,2 \left[\frac{l}{\text{min}} \right] = 5,62 [\text{cfm}]$

Tabla 2.19 Compresores de Pistón sin lubricación

Model	Motor		Pump	Speed	1440Air Displacement		Max Pressure		Tank		Noise	Weight	Dimensions
	W	HP		R.P.M	L/min	C.F.M	Bar	Psi	L	Gal	dB(A)	KG	LXWXH(cm)
FB-45/8	550	3/4	OLF550	1440	110	2.8	7	100	15	4.0	68	29	42X41X66
FB-88/7	750	1.0	OLF750	1440	165	5.8	7	100	15	4.0	69	25	40X41X70
FB-140/7	1100	1.5	OLF1100	1440	202	7.1	7	100	50	13.2	75	42	74X35X73

Fuente: SUN COMPRESSOR 2013.

En base a los requerimientos buscamos en la Tabla 2.19 y determinamos que el modelo de compresor que se requiere es el FB-140/7.



Figura 2.18 Compresor SUN FB-140/7

CAPÍTULO III

3. DISEÑO ELECTRÓNICO, AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL

En el presente capítulo se analiza y detalla el proceso de control y automatización que se lleva a cabo para que el prototipo de máquina *vending* inversa funcione correctamente. Se detallan detenidamente las etapas del proceso de identificación - transporte, compactación - almacenamiento y el sistema de pago. Posteriormente en cada una de ellas se establecen las especificaciones técnicas concernientes a parámetros electrónicos que se deberán considerar a la hora de seleccionar los elementos de instrumentación y sensores a utilizar.

Por otra parte, se selecciona el dispositivo de control embebido que permita obtener una óptima funcionalidad a todo el sistema electrónico y que servirá de enlace de comunicación directa con la interfaz principal de control, la cual será desarrollada en el capítulo 4. Se determinan los protocolos de comunicación que la tarjeta electrónica principal establece con la interfaz principal y de igual forma se dimensiona la capacidad de la fuente de poder a utilizar.

Finalmente se establecerán los lazos de control necesarios para garantizar un correcto funcionamiento de la etapa de identificación, compactación y sistema de pago.

3.1. ANÁLISIS DEL PROCESO DE AUTOMATIZACIÓN

3.1.1. DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO

En el siguiente flujograma se presenta de manera visual como se lleva a cabo la secuencia de automatización de cada uno de los procesos involucrados en el funcionamiento requerido para el prototipo de RVM.

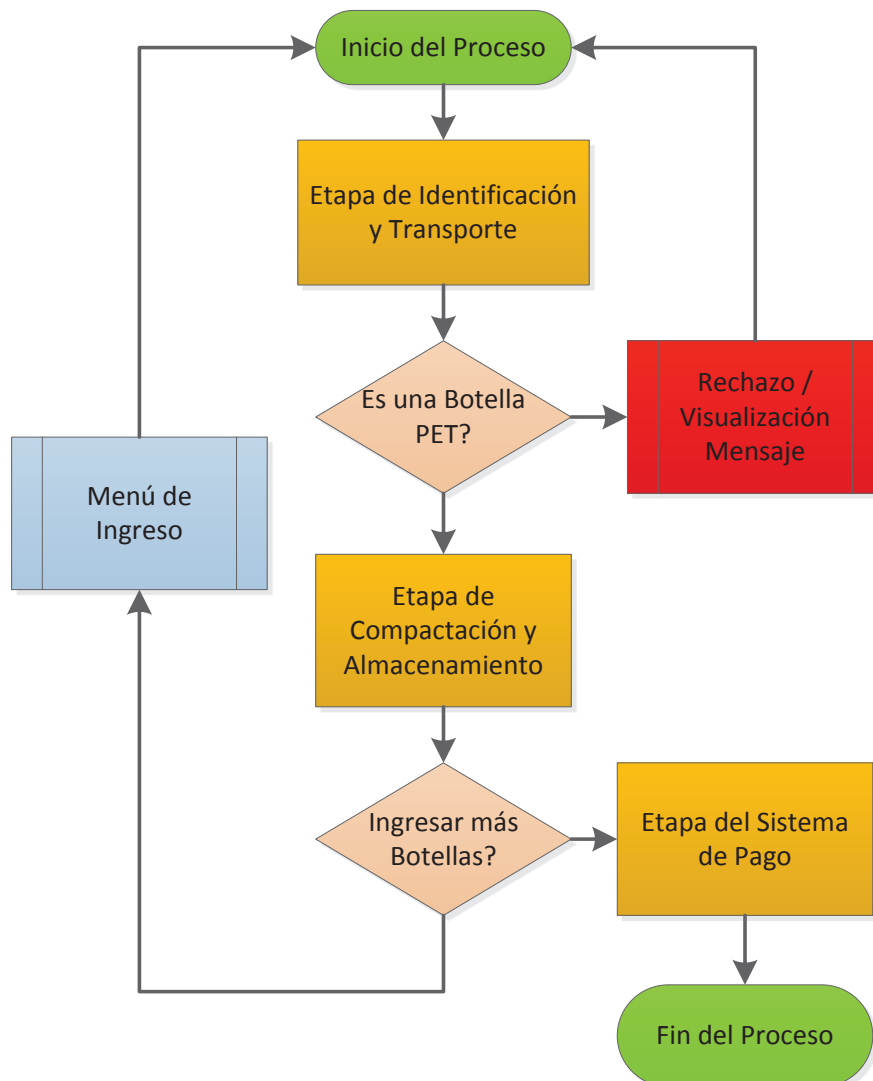


Figura 3.1 Diagrama de Flujo del Proceso de Automatización

3.1.2. IDENTIFICACIÓN DE ETAPAS Y ESPECIFICACIONES

Para el proceso identificado en el diagrama de flujo, se puede determinar claramente tres etapas:

- Identificación y Transporte
- Compactación y Almacenamiento
- Sistema de Pago

A continuación se detallarán los requerimientos técnicos de cada una de las etapas considerando los siguientes aspectos del entorno de funcionamiento de la RVM.

- ✓ Estará instalada en lugares cerrados con alta concurrencia de público como: parques nacionales, reservas ecológicas, supermercados, centros comerciales, universidades, colegios, etc.
- ✓ Deberá identificar, compactar, almacenar y brindar una forma de pago optimizando al máximo el tiempo de uso de la máquina.
- ✓ Será capaz de aceptar una sola botella a la vez, cuyo volumen no sea mayor de 250cm³ ni mayor a 3000cm³.
- ✓ El usuario podrá ingresar más botellas una vez que la interfaz indique que la botella ha sido identificada, compactada y almacenada satisfactoriamente.
- ✓ Constará con algoritmos de programación orientados a la identificación de los envases vacíos de botellas PET evitando así posibles intentos de fraude por parte de los usuarios.
- ✓ Garantizará la seguridad personal de los usuarios al utilizar la máquina.

Estará diseñada para una fácil utilización de la misma para lo cual dispondrá de instrucciones textuales de utilización de la máquina impresas en la parte frontal de la estructura de la misma, serán mostradas de manera visual y animada en la pantalla principal y también serán reproducidas en forma de audio en los idiomas español e inglés.

3.1.2.1. Etapa de identificación y transporte

Si se detiene a analizar la aplicación de la RVM en un lugar con alta concurrencia de público, no está por demás imaginar que la misma estará expuesta a un sin número de retos diarios que ciertos ciudadanos podrán inventar para tratar de engañar el proceso de identificación y validación de las botellas con el fin de obtener dinero fácil. Las posibles soluciones que se podrían plantear van desde apelar a la conciencia ciudadana de solamente ingresar botellas de plástico PET en buenas condiciones hasta implementar un sistema extremadamente costoso de visión artificial el cual garantice una detección minuciosa de los objetos que se puedan ingresar a la máquina *vending*.

Una vez conocidas las condiciones y el entorno de utilización de la máquina, el proceso de aceptación e identificación de botellas deberá garantizar mediante un sistema electrónico de instrumentación que el objeto insertado, cualquiera que físicamente quepa en la cavidad de ingreso de botellas, sea una botella de plástico PET.

Dentro de las características físicas de una botella de plástico tipo PET, se puede listar las más representativas:

- Alto nivel de transparencia.
- Eléctricamente no conductiva.
- Peso ligero.
- Forma Cilíndrica.

Tomando en cuenta éstas características, la etapa de identificación se verá destinada a implementar los elementos de instrumentación necesarios para garantizar que los objetos aceptados sean solamente botellas de plástico tipo PET, caso contrario, deberá disponer de una señal de control que notifique a la interfaz principal que el objeto insertado no es una botella válida para el proceso y ésta será rechazada.

3.1.2.2. Etapa de compactación y almacenamiento

La etapa de compactación de botellas tipo PET tendrá como objetivo la integración mecatrónica del sistema neumático de compactación seleccionado y dimensionado en el capítulo 2 con sus respectivos sensores y el lazo de control seleccionado más adelante en el presente capítulo. Para esto dispondrá de los actuadores electromecánicos, sensores magnéticos y un sensor infrarrojo para garantizar que la botella de plástico PET sea totalmente compactada y almacenada para posteriormente pasar a la etapa del sistema de pago implementado en la RVM.

3.1.2.3. Etapa del sistema de pago

Finalmente, el usuario recibirá un ticket impreso a manera de incentivo por la cantidad de botellas PET que hayan sido validadas en la máquina inversa. El actuador del sistema de pago en este caso será una impresora térmica la cual será accionada cuando el usuario active el pulsador ubicado en la parte frontal de la RVM para que así se establezca la orden de impresión. En el capítulo 4 se detallará las herramientas y los flujos de programa que se utilizan para la secuencia de impresión de tickets.

3.2. SELECCIÓN DE DISPOSITIVOS DE INSTRUMENTACIÓN

En la siguiente sección se definirán los dispositivos de instrumentación y sensores para realizar la identificación de los objetos ingresados en la RVM. Para llevar a cabo este objetivo es importante enfocarse en las características de las botellas PET que se pueden detectar mediante la aplicación de sensores existentes en el mercado para posteriormente tratar cada una de sus señales y llevarlas a un procesamiento en el controlador posteriormente seleccionado.

3.2.1. DEFINICIÓN DE PARÁMETROS FÍSICOS A DETECTAR EN UNA BOTELLA PET

Luego de haber definido las etapas y los parámetros técnicos de funcionamiento que la RVM dispondrá se debe establecer magnitudes y parámetros físicos acordes. Para llevar esto a cabo, es importante diferenciar los parámetros físicos a detectar en el proceso de identificación y aceptación.

Tabla 3.1 Parámetros Físicos a Detectar

PARÁMETRO FÍSICO	UNIDAD DE MEDIDA	SENSOR	TIPO DE SEÑAL
Peso	Gramos	Celda de Carga	Analógica
Presencia	N.D.	Infrarrojo	Digital
Forma	Área	Cámara USB Visión Artificial	Digital con Procesamiento

Fuente: Propia

En base a las lecturas de los sensores se discrimina si el objeto ingresado posee los datos de forma y peso almacenados válidos para una botella PET que se pueda adquirir en el mercado nacional dentro de los volúmenes entre los 250cm³ a los 3000cm³.

Es así que mediante las celdas de carga se discriminará si la botella posee o no posee líquido discriminado un valor establecido de peso para cada marca comercial y tamaño que cada botella.

Por otra parte la detección de la forma de la botella insertada debe coincidir con el área y forma almacenada en el sistema de reconocimiento por visión artificial que podrá ser calibrado con facilidad en el software de procesamiento de imágenes.

Finalmente los sensores de presencia detectarán la existencia de los objetos ingresados en la bandeja de aceptación garantizando la seguridad del usuario para que no se realice ninguna acción si algún objeto extraño o de mayor tamaño obstaculice la cavidad destinada a la identificación de la botella.

3.2.2. TRATAMIENTO DE SEÑALES Y FILTRAJE

Para realizar el tratamiento de las diferentes señales a adquirir es necesario establecer el orden de lectura del sistema de identificación de los objetos insertados. En el siguiente flujo grama se determina el orden específico de adquisición de las señales brindadas por los sensores establecidos para cada fase identificada.

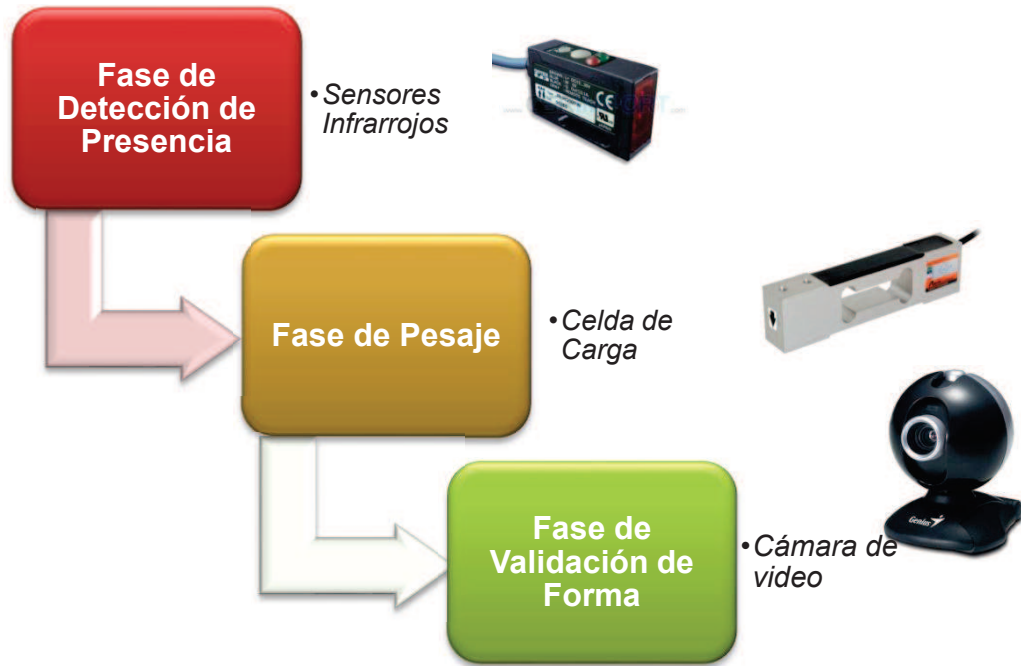


Figura 3.2 Orden de adquisición de datos

El tratamiento y filtraje de cada señal adquirida dependerá de cada tipo de sensor a implementar. En la siguiente tabla se establece el tipo de señal del sensor, el filtro a implementar y la señal que será adquirida en el dispositivo embebido de control.

Tabla 3.2 Sensores y Señales del Sistema de Control

FASE	SENSOR	TIPO DE SEÑAL	FILTRO A IMPLEMENTAR	SEÑAL FILTRADA
Detección de Presencia	Infrarrojo	TTL	Divisor de Voltaje	Digital
Pesaje	Celda de Carga	Analógica	Amplificador-Reductor de Ruido	Analógica
Forma	Cámara de video	Video	Digital con Procesamiento	Forma-Silueta 2D

Fuente: Propia

3.2.2.1. Fase de Detección de Presencia de Objetos

La presente etapa garantizará las siguientes condiciones:

- La existencia de un objeto insertado en la bandeja de pesaje en la cavidad de aceptación e identificación para proceder con las siguientes etapas.
- Detectará si existe la presencia de un objeto obstaculizando la cavidad cilíndrica de ingreso de objetos de tal forma que enviará una señal a la tarjeta de control electrónica para evitar posibles daños o lesiones a los usuarios al ingresar los objetos o detectar que el mismo se encuentra mal ingresado.

El tiempo estimado para la ejecución de la detección de presencia de objetos será de 1,5 segundos que deberán transcurrir cuando la cavidad cilíndrica de ingreso de objetos se encuentre totalmente libre y sin ningún otro objeto interfiriéndola.

En las siguientes figuras se puede observar claramente como la botella insertada en la cavidad es procesada una vez el objeto que interfiere la cavidad cilíndrica es retirado y la botella se encuentra posicionada libremente en la bandeja de aceptación e identificación.



Figura 3.3 Detección de interferencia en cavidad cilíndrica de ingreso



Figura 3.4 Detección de presencia válida de objeto ingresado correctamente.

Para realizar la detección de los objetos ingresados se utiliza sensores infrarrojos refractivos de tipo industrial. Dichos sensores emiten una luz infrarroja que rebota en un espejo ubicado frente al sensor el cual permite la refracción de la luz de nuevo al sensor y así detectar la ausencia de algún objeto que obstaculice el haz de luz emitido. Sin embargo, cuando un objeto interfiere el haz de luz emitido el sensor arroja una señal TTL.

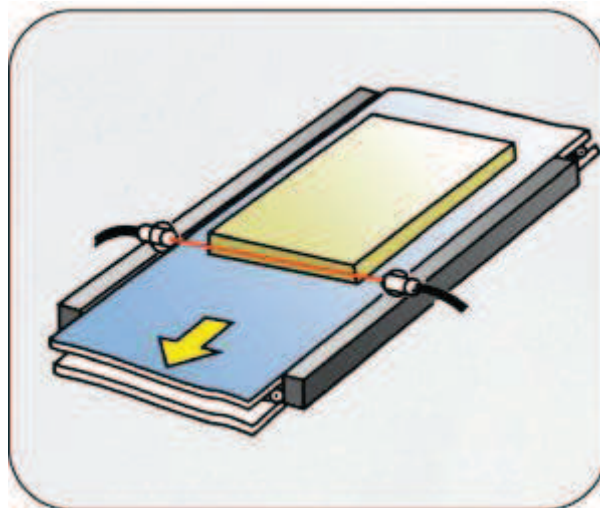


Figura 3.5 Principio de Funcionamiento de un Sensor Infrarrojo Refractivo de Tipo Industrial¹⁵

¹⁵ (OPTEX FA CO. LTDA., 2012)

A continuación se muestra la tabla de especificaciones técnicas de los sensores infrarrojos refractivos de la marca OPTeX FA[®].

Tabla 3.3 Especificaciones Técnicas Sensores Infrarrojos Serie C

Model		Thru-beam	Retro-reflective	Retro-reflective w Polarizing filter	Diffuse reflective 11cm	Diffuse reflective 40cm
Cable type	NPN	CTD-1500N	CRD-300N	CRDF-100N	CDD-11N	CDD-40N
	PNP	CTD-1500P	CRD-300P	CRDF-100P	CDD-11P	CDD-40P
Sensing distance		15m	3m	1m	11cm	40cm
Response time		1.5msec Max				
Hysteresis		NIL			10% Max	
Light source		Infrared		Red	Infrared	
Control output		NPN or PNP Open collector, 100mA Max / 30V DC				
Supply voltage		DC 10 to 30V including 10% of ripple				
Conformity		JIS / C4525, CE, UL				
Power consumption		40mA Max	30mA Max			
Operating temp / humidity		-25 up to 55 oC / 35 up to 95% RH				
Sensitivity adjustment		Single turn potentiometer				
Protection category		IEC 144 IP66				
Shock resistance		50G (500m/S ²), X-Y-Z axis 3 times				
Material		Case : BSBM+Ni, Lens : PC				
Material		-	V-61			-

Fuente: Catálogo de Productos OPTeX FA¹⁶

¹⁶ (OPTeX FA CO. LTDA., 2012)

Para la presente aplicación se selecciona el sensor infrarrojo refractivo con cable modelo CRD-300P con una señal de salida TTL-PNP y un alcance máximo de 3 metros.



Figura 3.6 Sensor Infrarrojo OTEX CRD-300P seleccionado¹⁷

A continuación se muestra el circuito de conexión del sensor seleccionado proporcionado por el fabricante.

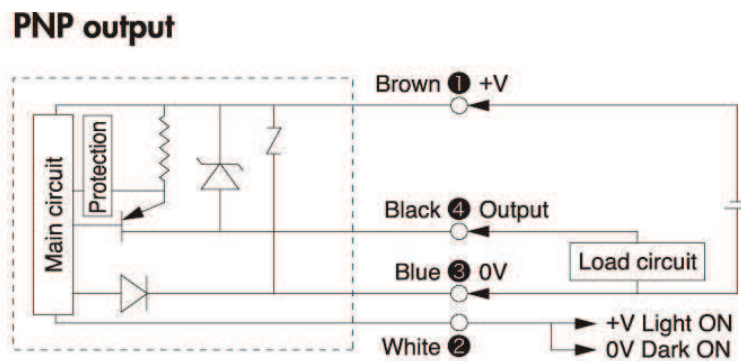


Figura 3.7 Circuito de Conexión Sensor Infrarrojo OTEX CRD-300P¹⁸

Considerando el tipo de señal TTL de salida y la alimentación del sensor superior a los 10VDC con un consumo no superior a 30mA se puede diseñar un circuito acondicionador para la señal a ser adquirida por el controlador el cual trabaja con señales lógicas entre 0 y 5V. De un simple análisis de voltaje se puede encontrar que la señal lógica enviada estará entre el rango de 0V para el caso de refractar la luz y 12V para el caso de que se encuentre un objeto obstaculizando la señal emitida por el diodo emisor del sensor. Por lo tanto se utiliza un divisor de voltaje con las siguientes características.

¹⁷ (OTEX FA CO. LTDA., 2012)

¹⁸ (OTEX FA CO. LTDA., 2012)

$V_{señal_{entrada}} \rightarrow 0V \text{ a } 12V$

$V_{señal_{salida}} \rightarrow 0V \text{ a } 5V$

$$\text{Relación: } \frac{V_{señal_{salida}}}{V_{señal_{entrada}}} = \frac{5V}{12V} = 0.417$$

Ecuación 3.1

La ecuación general para un divisor de voltaje de corriente continua establece que:

$$V_{out} = \frac{R_2 * V_{in}}{R_1 + R_2}$$

Ecuación 3.2

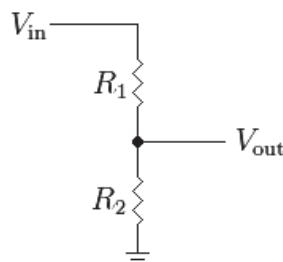


Figura 3.8 Divisor de Voltaje

Tomando un valor de R2 de 330 ohmios y conocida la relación de voltajes se encuentra el valor para R1 reemplazando y utilizando la ecuación anterior del divisor de voltaje.

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$0.417 = \frac{330[\Omega]}{R_1 + 330[\Omega]}$$

$$R_1 = 461.3[\Omega]$$

Tomando en cuenta los valores comerciales de resistencias se establece como valor de R1 470 ohmios.

A continuación se muestra el circuito acondicionador utilizado para la adquisición de la señal TTL del sensor seleccionado simulado en ISIS - Proteus 7[®] como un pulsador abierto cuando no existen obstáculos en el haz de luz emitido y cerrado cuando existen obstáculos presentes.

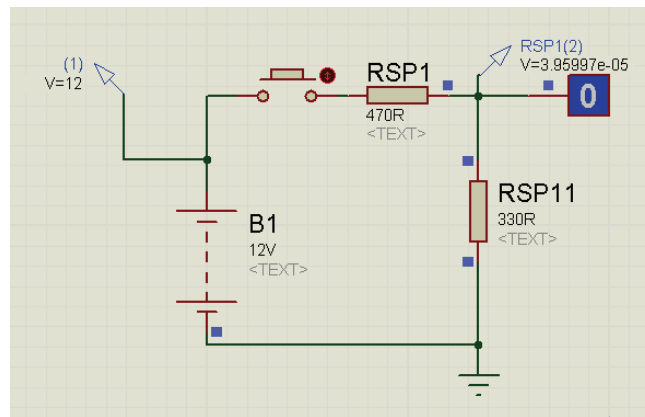


Figura 3.9 Señal de Salida del Sensor CRD-300P en bajo utilizando el acondicionamiento de señal seleccionado.

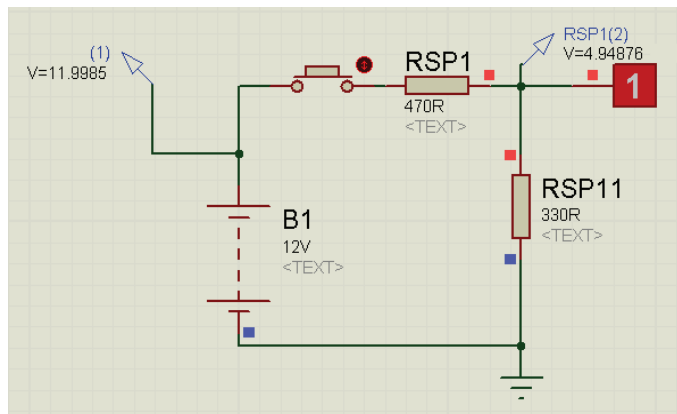


Figura 3.10 Señal de Salida del Sensor CRD-300P en alto utilizando el acondicionamiento de señal seleccionado.

Por lo tanto para la utilización de éste tipo de sensor se acondiciona su salida con el circuito anteriormente detallado para cualquiera etapa en donde se utilice dicho sensor infrarrojo.

3.2.2.2. Fase de Pesaje

El pesaje de los objetos en la bandeja de captación tiene un papel fundamental pues aporta con una condición en el proceso de identificación y aceptación. Este parámetro, el peso, discrimina a las botellas PET de otros objetos en base a la baja densidad que posee, en otras palabras, el PET es mucho más ligero en comparación a otros elementos. Es así que el peso determinará un rango de validez para las botellas y de esta manera validarlas y que se continúe con el proceso de reciclado.

Para esta fase se recurrió al uso de una celda de carga que se extrajo de una balanza comercial casera debido a su bajo costo respecto a otros sensores en el mercado. Después de varias pruebas experimentales (ver capítulo 5) se determinó que el sensor primario acoplado a la celda de carga era un elemento piezoeléctrico presentaba una variación muy pequeña de voltaje proporcional al peso del objeto colocado en la bandeja de captación.

Sensores piezoeléctricos¹⁹

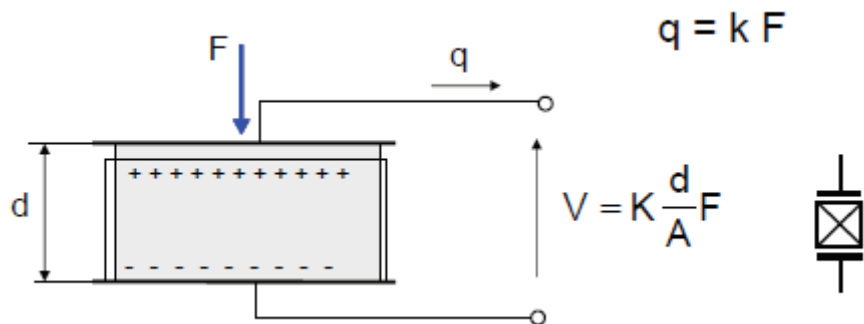


Figura 3.11 Sensor piezoeléctrico

El fenómeno piezoeléctrico se produce en determinados cristales y consiste en la generación de carga eléctrica al deformarse un determinado material al aplicarle un esfuerzo. Estos materiales poseen gran estabilidad ante cambios medio ambientales en el transcurso del tiempo pero las señales que generan son muy débiles por lo que requieren de un acondicionamiento de señal con amplificación.

¹⁹ (Ferrero Martín, 2012, págs. 25-30)

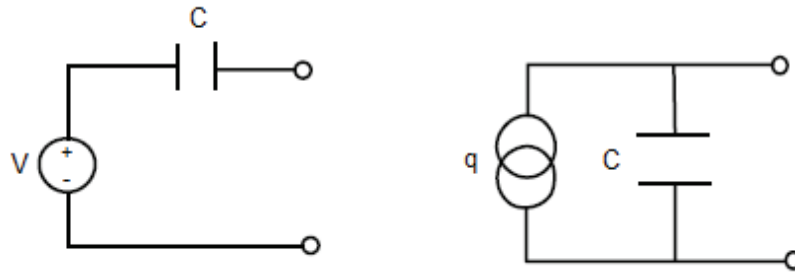


Figura 3.12 Modelo eléctrico de un sensor piezoeléctrico

En Figura 3.12 se ilustra el modelo eléctrico simplificado de un sensor piezoeléctrico, donde V es la tensión de salida en vacío y C es la capacitancia del sensor entre los terminales de salida del dispositivo. Lo más adecuado para obtener la señal del sensor es utilizar un amplificador de carga que transforma la carga en tensión de salida que depende sólo de la carga de entrada y la capacitancia de retroalimentación. En la figura que sigue se muestra el circuito de acondicionamiento.

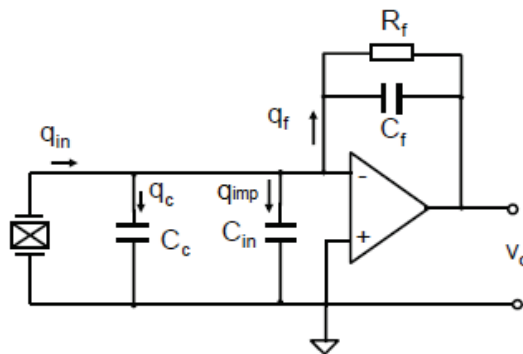


Figura 3.13 Acondicionamiento para la señal de un sensor piezoeléctrico

De la figura 3.13 tenemos:

$$q_{in} = q_c + q_{imp} + q_f \quad \text{Ecuación 3.3}$$

Remplazando los valores de las cargas eléctricas:

$$q_{in} = V_{in} (C_c + C_{in}) - V_o C_f \quad \text{Ecuación 3.4}$$

Por lo tanto:

$$V_o = -\frac{q_{in}}{C_f} \quad \text{Ecuación 3.5}$$

La resistencia de retroalimentación R_f permite que el circuito en corriente continua no se sature y define la menor frecuencia del amplificador.

Considerando la naturaleza del sensor piezoeléctrico se realizó mediciones sin ningún tipo de amplificación o acondicionamiento de señal obteniendo los resultados descritos en el capítulo 5.

Sin embargo se muestra el resultado obtenido de la medición de voltaje alimentando a la celda de carga de características piezoeléctricas con un voltaje de 12VDC.

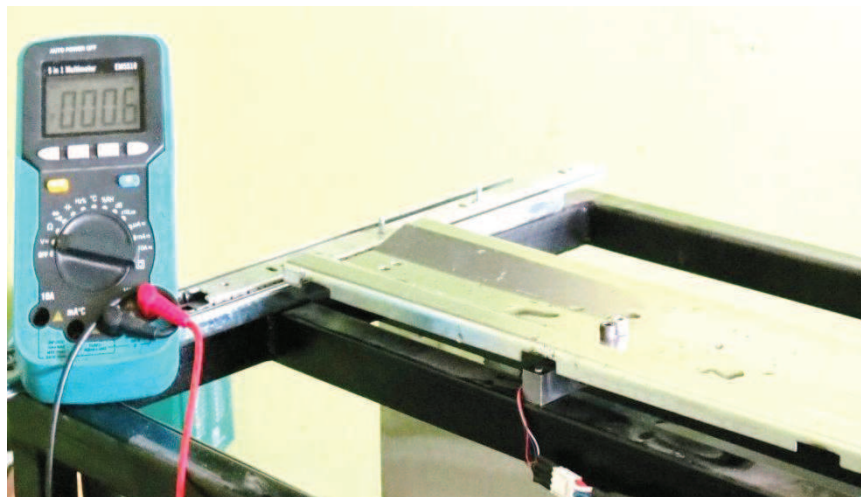


Figura 3.14 Medición de voltaje en terminales de salida del sensor piezoeléctrico sin acondicionamiento sujeto a la bandeja de pesaje vacía.

El resultado de la medición sin ningún objeto colocado en la bandeja destinada al pesaje fue de 0,6mV medido con un multímetro digital de la marca E-Sun modelo E5510.

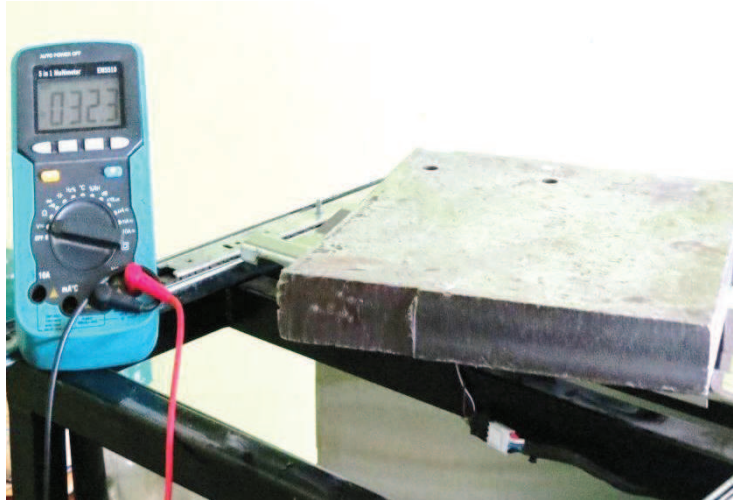


Figura 3.15 Medición de voltaje en terminales de salida del sensor piezoeléctrico sin acondicionamiento con un objeto pesado.

Posteriormente para comprobar la tendencia del sensor piezoeléctrico y su comportamiento, se colocó un pedazo de fundición de hierro con un peso aproximado de 16 Kg obteniendo 32.3mV realizando la medición con un multímetro digital de la marca E-Sun modelo E5510. Sin embargo se realiza la medición de un envase de 3000cm³ lleno de líquido con un peso de 3 Kg obteniendo un valor de voltaje de 6.3mV. De esta manera se busca obtener una tendencia aproximada del comportamiento del sensor.



Figura 3.16 Medición de voltaje en terminales de salida del sensor piezoeléctrico sin acondicionamiento con una botella PET de 3000cm³ llena de líquido.

Tomando como lineal la tendencia al incremento de voltaje con respecto al peso de la bandeja se puede realizar la siguiente gráfica de comportamiento obtenida de las tres mediciones.

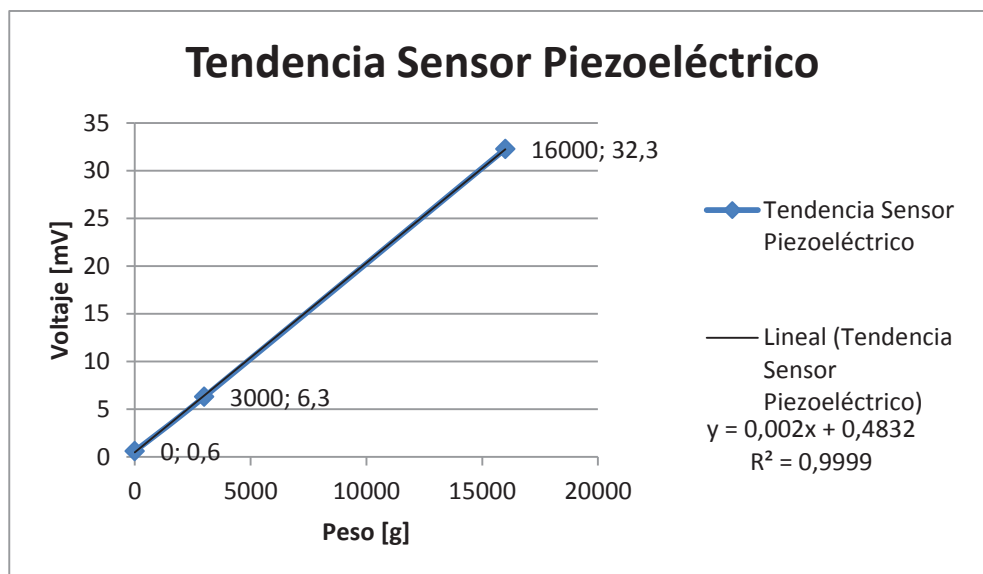


Figura 3.17 Tendencia lineal del sensor piezoeléctrico sin acondicionamiento

Utilizando las herramientas gráficas de Microsoft®-Excel²⁰ se puede obtener la regresión lineal de la curva y comprobar la tendencia de la misma, por lo tanto para éste caso se puede ver claramente que el valor de la regresión es prácticamente igual a uno comprobando así la característica lineal del sensor.

Considerando el valor del factor de correlación de la línea de tendencia con la curva experimentalmente obtenida de: $R=0,9999$, se asume la ecuación lineal de primer grado obtenida de la gráfica, de donde es fácil considerar que la relación entre el peso y el voltaje a obtenerse la cual es la siguiente:

$$\text{Voltaje}[mV] = 0.002 * \text{Peso}[g] + 0.4832 \quad \text{Ecuación 3.6}$$

Tomando la relación obtenida se puede remplazar los valores de peso en gramos de los envases vacíos obteniendo los siguientes valores de voltaje.

²⁰ (Microsoft Corporation, 2010)

Tabla 3.4 Valores de Voltaje Utilizando la Ecuación de tendencia lineal del sensor piezoeléctrico sin acondicionamiento

Peso [gr]	Voltaje [mV]
0,00	0,48
2,00	0,49
8,00	0,50
15,00	0,51
25,00	0,53
35,00	0,55
50,00	0,58

Fuente: Propia

La comprobación de los valores esperados para la medición de los envases vacíos de diferentes volúmenes se muestran en el capítulo 5 en donde se detallan cada uno de los resultados de las diferentes pruebas y mediciones obtenidas comprobando la veracidad de la relación lineal anteriormente encontrada. Por otra parte, se analiza que la señal obtenida para los valores de voltaje de las botellas vacías no supera el valor de los 0,6 mV para un peso de 35 gramos para el caso de los envases vacíos tipo PET de botellas de 3000cm³.

Por lo tanto se considera oportuna una amplificación de la señal de voltaje que posea una ganancia superior a 800 veces. Dichos valores de ganancia solamente se pueden obtener de amplificadores operacionales de instrumentación electrónica. Es así que se implementa un circuito amplificador de voltaje utilizando el circuito operacional AD620 con una ganancia regulable por un potenciómetro con un valor máximo de ganancia en amplificación de 10.000 y su alta capacidad de supresión de ruidos eléctricos en la señal de origen. Para información más detallada del amplificador operacional seleccionado véase el anexo 2.

En la siguiente figura se muestra el circuito de acondicionamiento de señal para el sensor piezoeléctrico en la disposición de voladizo de una celda de carga alimentada con 12VDC con una ganancia regulable por potenciómetro.

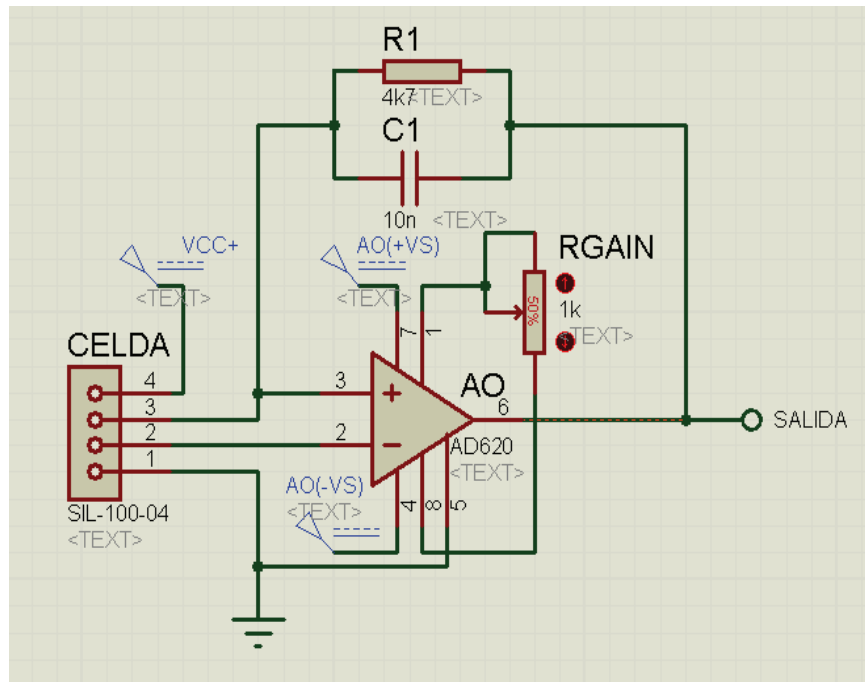


Figura 3.18 Circuito de acondicionamiento de señal utilizado para la celda de carga de comportamiento piezoeléctrico.

3.2.2.3. Fase de Validación de Forma

Para la validación de la forma es necesario comprender la dificultad del proceso que se requiere implementar dada la inmensa cantidad de objetos un usuario puede llegar a ingresar a la RVM buscando engañar el sistema de identificación.

Para lograr obtener un proceso de validación de forma de los diferentes objetos es necesario aplicar los algoritmos de procesamiento de imágenes basados en la visión artificial.

A continuación se muestran los diferentes envases con sus respectivas formas de las botellas PET que se busca identificar como válidas para el proceso de la RVM y por otra parte una imagen de los objetos que no se consideran como válidos para su compactación y almacenamiento.



Figura 3.19 Envases de botellas PET válidas



Figura 3.20 Objetos no válidos con características similares a una botella PET

Para la presente aplicación se considera que el objeto a identificar más grande que viene a ser la botella de 3000cm^3 y del objeto más pequeño que es el envase de una botella de 250cm^3 en un área de trabajo destinada a la identificación de $420 \times 180\text{mm}$.



Figura 3.21 Dimensiones a considerar para el cálculo de la resolución

Por lo tanto se puede calcular la resolución necesaria utilizando las siguientes fórmulas²¹:

$$Resolución_x = \left(\frac{Longitud\ del\ Área\ de\ Trabajo}{Longitud\ del\ Objeto} \right) * 2 \quad \text{Ecuación 3.7}$$

$$Resolución_y = \left(\frac{Altura\ del\ Área\ de\ Trabajo}{Altura\ del\ Objeto} \right) * 2 \quad \text{Ecuación 3.8}$$

De donde se obtiene la siguiente resolución en pixeles:

$$Resolución_x = \left(\frac{420[mm]}{365[mm]} \right) * 2 = 2.30$$

$$Resolución_y = \left(\frac{180[mm]}{115[mm]} \right) * 2 = 3.13$$

De igual manera se puede determinar la resolución necesaria para la detección de la botella PET más pequeña utilizando sus dimensiones. De igual manera se obtiene la siguiente resolución.

$$Resolución_x = \left(\frac{420[mm]}{175[mm]} \right) * 2 = 4.80$$

$$Resolución_y = \left(\frac{180[mm]}{55[mm]} \right) * 2 = 6.55$$

Dado que la resolución necesaria está muy por debajo de las resoluciones estándares que se encuentran hoy en día en las cámaras comerciales. Sin embargo dada la importancia de la detección de la forma se considera que el objeto más pequeño a detectar en la forma de una botella será la medida de 1 mm en ambas direcciones.

²¹ (National Instruments Corporation, 2010)

Por lo tanto se establece que:

$$Resolución_x = \left(\frac{420[mm]}{1[mm]} \right) * 2 = 840$$

$$Resolución_y = \left(\frac{180[mm]}{1[mm]} \right) * 2 = 360$$

Entonces se puede escoger un dispositivo que arroje una resolución superior a los 840x360 píxeles. Por otra parte el Manual de Conceptos de Vision²² de NI recomienda que el sensor a utilizar sea de al menos el doble del valor máximo de la resolución por consiguiente para una resolución de 840 píxeles el sensor a utilizar debería ser de al menos 1.7M píxeles.

Sin embargo, es necesario considerar que para realizar el procesamiento se utiliza una cámara de video la cual sea compatible con el sistema operativo Windows XP[®] y que sea reconocida entre los dispositivos que el software de procesamiento utiliza. En base a las características de resolución y el tamaño de sensores requeridos para la aplicación se considera la selección de una cámara de video USB.

Por la facilidad de adquisición en el mercado local y por su precio asequible se utiliza una cámara de video USB de la marca Genius[®] modelo FaceCam 3000 con las siguientes características detalladas en la siguiente tabla.



Figura 3.22 Cámara USB de video FaceCam3000²³

²² (Genius,KYE Systems Corp., 2011)

²³ (Genius,KYE Systems Corp., 2011)

Tabla 3.5 Especificaciones Técnicas FaceCam 3000

MODELO	FACECAM 3000
Tipo de Sensor	3.0M pixel CMOS
Tipo de Lente	Lente Focal Fijo
Interfaz	USB 2.0
Formato de Salida	JPEG/WMV
Resolución Imagen detenida	8MP(Interpolación) 2048x1536, 1600x1200,1280x960, 1280x720,800x600,640x480 píxeles
Resolución de Video (cantidad de cuadros por segundo)	CIF/VGA: (30cps) 720P HD: (30cps) 2.0M: (15cps) 3.0M: 15(cps)
UVC (Plug&Play)	Si
Velocidad de Transmisión	480 Mbps
Tamaño (Longitud, Profundidad, Altura)	46x32.5x32.6mm

Fuente: Catálogo FaceCam 3000 Genius²⁴

En la siguiente figura se muestra un diagrama de bloques en el cual se detalla el proceso a llevar a cabo en el tratamiento digital de imágenes con el software corporativo de *National Instruments Vision Builder®* AI 2009.

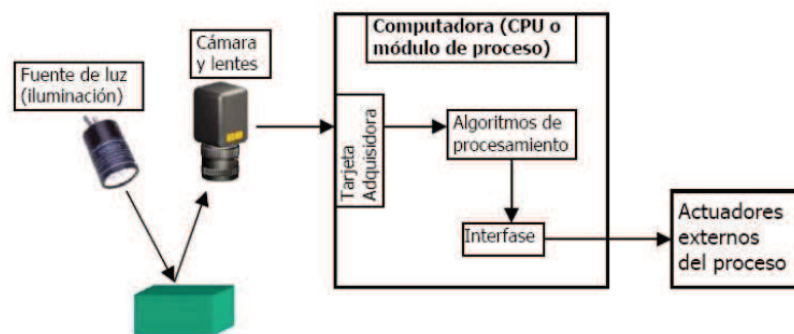


Figura 3.23 Elementos del Procesamiento Digital de Imágenes.

²⁴ (Genius,KYE Systems Corp., 2011)

➤ Acondicionamiento de señal

Detallado el software a utilizarse y la definida la cámara de video, es necesario tomar en cuenta los factores de acondicionamiento que influyen en la adquisición de las imágenes.

Para la presente aplicación se consideran dos aspectos importantes para el acondicionamiento de la señal de video a adquirir:

- ✓ El entorno físico de trabajo en el cual se realiza la adquisición de imágenes del objeto a inspeccionar su forma.
- ✓ La fuente de luz o iluminación del entorno de trabajo.



Figura 3.24 Entorno Físico de trabajo destinado a la Etapa de Identificación. Cavity de validación.

Tomando en cuenta la superficie transparente de una botella y los colores que pueden poseer dichos envases según su marca y tipo de bebida en conjunto con las dimensiones físicas de la cavidad dispuesta en la RVM para la etapa de identificación se establece que la cavidad posea un fondo negro no reflectivo para eliminar posibles efectos de luminosidad provocada por las superficies metálicas. Por otra parte se selecciona la iluminación led de como fuente de luz directa que estará dispuesta en la cavidad de identificación en la tolva de transporte dispuesta en el sistema de clasificación y transporte. En la siguiente figura se puede visualizar la cavidad de validación con el fondo oscuro no refractivo y con la iluminación led de luz blanca.



Figura 3.25 Cavity de validación acondicionada

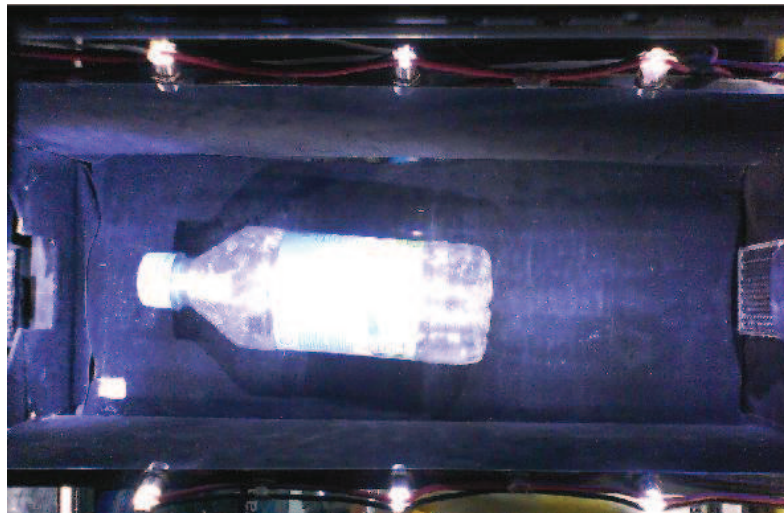


Figura 3.26 Adquisición de imagen en *Vision Builder*® AI 2009 de la cavity de identificación acondicionada.

➤ **Procesamiento digital de imágenes utilizando *Vision Builder*® AI 2009.**

Una vez que se obtiene la señal de video acondicionada se debe proceder a filtrar digitalmente las capturas de cada cuadro por segundo que arroja la cámara de video. Para esto es necesario en primer lugar extraer un plano de color adecuado. Dadas las características de color de las botellas y considerando el fondo negro seleccionado en el acondicionamiento de la señal se selecciona el plano de luminosidad extraído con la herramienta “*Extract Color Plane*”

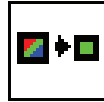


Figura 3.27 Herramienta de Extracción de planos²⁵

Posteriormente se establece la cantidad de píxeles de la imagen a utilizar considerando los ajustes de brillo y contraste con la herramienta “*Threshold*” o de umbral de luz

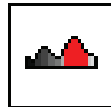


Figura 3.28 Herramienta de Extracción de planos²⁶

Estableciendo el campo de interés (ROI siglas en inglés de *Region of Interest*) con se puede comenzar a identificar los objetos de la imagen a detectar comparando los patrones encontrados en los píxeles de la imagen con la herramienta “*Match Pattern*”



Figura 3.29 Herramienta de búsqueda de patrones²⁷

Posteriormente se establece un identificador de clases para cada envase de todas las marcas existentes de botellas PET para poder generar un valor de detección de formas geométricas comparables entre el objeto ingresado en la cavidad de identificación y la base de datos generada para todas las formas de las botellas a identificar como válidas. Para esto se utiliza la herramienta de clasificación de objetos “*Classify Objects*”

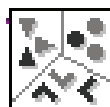


Figura 3.30 Herramienta para Clasificación de Objetos²⁸

²⁵ (National Instruments Corporation, 2010)

²⁶ (National Instruments Corporation, 2010)

²⁷ (National Instruments Corporation, 2010)

²⁸ (National Instruments Corporation, 2010)

Finalmente el resultado de la inspección se puede enviar mediante la utilización de las herramientas de comunicación incorporadas en la paleta denominada “Comunicate”.

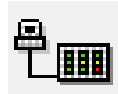


Figura 3.31 Herramientas de Comunicación de Resultados²⁹

Para la presente aplicación se utilizará una tarjeta de comunicación mediante la aplicación del protocolo RS232, soportado por la herramienta de comunicación, entre *Vision Builder*® AI 2009 y la tarjeta electrónica de control para enviar una señal TTL digitalizando así el resultado de la inspección del objeto ingresado en la cavidad de identificación.

A continuación se muestra el resultado final del proceso de inspección realizada con *Vision Builder*® AI 2009

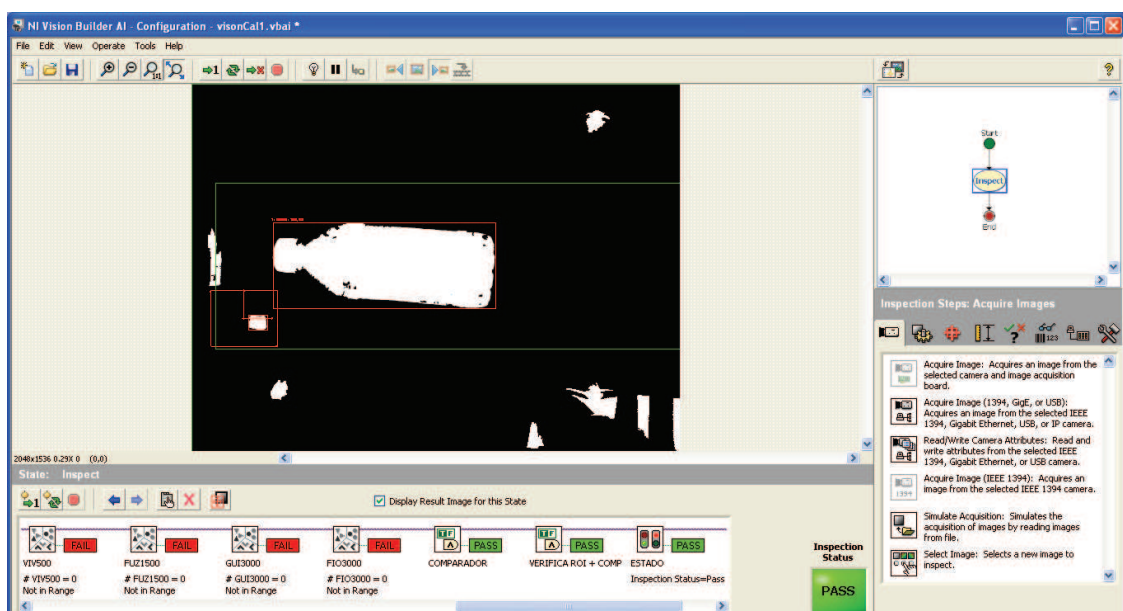


Figura 3.32 Resultados Obtenidos en la Fase de Validación de Forma para una botella PET de 500cm³ con *Vision Builder*® AI 2009

²⁹ (National Instruments Corporation, 2010)

A continuación se muestra un diagrama de flujo del proceso de validación de forma indicando cada una de las herramientas utilizadas las cuales han sido detalladas individualmente.



Figura 3.33 Diagrama de Flujo del Proceso de Validación de Forma

3.2.2.4. Fase de transporte

El sensor, usado para determinar la posición angular del motor, es un codificador angular de posición (encoder) incremental que consta de un disco ranurado radialmente y donde dichas ranuras están dispuestas equidistantes entre sí. Poseen además un sistema de iluminación infrarroja en el que la luz es alineada con un foto-receptor.

El eje del cual se quiere medir su posición va acoplado al disco, de tal manera que a medida que el eje vaya girando se generarán pulsos en el receptor cada vez que la luz atraviese la ranura y llevando una cuenta de los pulsos se puede determinar su posición.

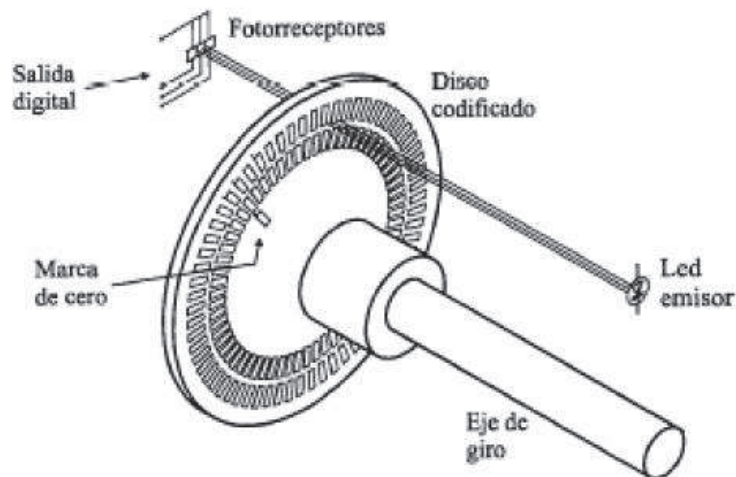


Figura 3.34 Configuración de un codificador angular de posición (encoder) óptico

La resolución, de este sensor angular, dada como número de impulsos de salida, es:

$$N = \frac{\pi D}{2X} \quad \text{Ecuación 3.9}$$

Donde:

D es el diámetro del disco y X la anchura de cada sector codificado.

Para nuestro diseño hemos tomado los siguientes parámetros para definir la resolución del sensor: $D = 60$ [mm] y $X = 1$ [mm]. Calculando la Ecuación 3.9 con los parámetros obtenemos una resolución:

$$N = 94.25 \left[\frac{\text{pulsos}}{\text{revolucion}} \right]$$

3.3. SISTEMAS DE CONTROL

Una vez definidos las etapas que posee el proceso de automatización de la RVM y detallados los tipos de sensores a utilizar con sus respectivos tratamientos de señal y filtros a utilizar, se puede establecer los lazos de control y sus respectivos controladores. A continuación se define los lazos de control

independientes para cada una de las diferentes etapas definidas anteriormente en la figura 3.1 detallando los sensores a utilizar con sus respectivos actuadores.

3.3.1. ETAPA DE IDENTIFICACIÓN Y TRANSPORTE

La presente etapa tiene como objetivo la identificación del objeto ingresado para que se lo pueda procesar como una botella PET válida para la compactación y el almacenamiento o que sea rechazado y llevado a la cavidad de rechazo. Por lo tanto se puede dividir la etapa en dos sistemas la etapa de identificación del objeto y el sistema de clasificación del mismo.

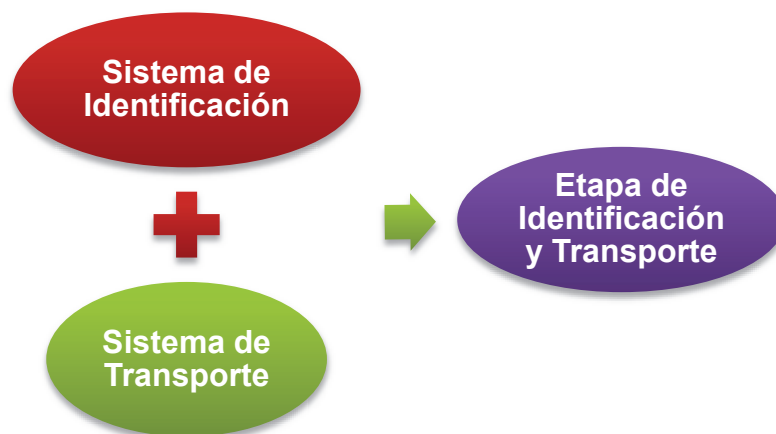


Figura 3.35 Partes de la Etapa de Identificación y Transporte

3.3.1.1. Sistema de Identificación

El sistema de identificación es el responsable del análisis del objeto ingresado en base a las diferentes señales proporcionadas por los sensores implementados para las lecturas de los parámetros físicos a detectar en una botella PET anteriormente definidos.

Por lo tanto las fases del sistema de identificación serán consideradas como lazos de control independientes en donde el conjunto de condiciones válidas proporcionaran la identificación correcta de la botella PET válida. Caso contrario si una de las condiciones o fases identifica al producto como fuera del rango determinado para su identificación pues se procederá a identificar el objeto como objeto rechazado.

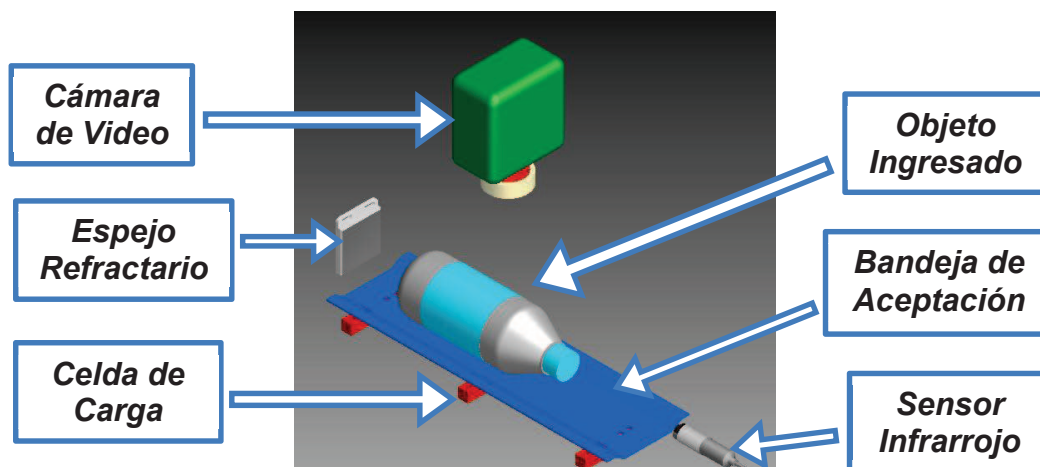


Figura 3.36 Componentes del Sistema de Identificación.

De esta manera se puede determinar un controlador ON-OFF para cada fase en donde cada uno de las fases posee un setpoint diferente en donde su salida de control es de carácter lógico. El procesamiento de cada una de las señales que ingresan al controlador serán analizadas según la magnitud leída, es decir todas las señales ingresan al controlador de manera secuencial pero son analizadas independientemente brindando a cada etapa una salida de verdadero o falso. En cada una de las etapas del sistema de identificación se establece una comunicación con la interfaz de usuario controlando así la ejecución de las pantallas en las cuales se mostrarán las diferentes acciones que la RVM realiza y al mismo tiempo el usuario estará en capacidad de darse cuenta el proceso que se lleva a cabo.

Las fases de detección de presencia y validación de forma envían señales digitales al controlador principal del sistema de control mientras que la fase de pesaje envía una señal analógica la cual posee rangos válidos para de esta manera filtrar por programación los rangos de peso máximos y mínimos para las botellas vacías PET de 250 a 3000cm³. Si cualquiera de las etapas llega a no identificar correctamente el proceso, se enviará la señal a la interfaz de mostrar el mensaje de rechazo desechando así el objeto ingresado.

A continuación se muestra en el siguiente flujograma la secuencia del proceso de control ON-OFF implementado en ésta etapa.

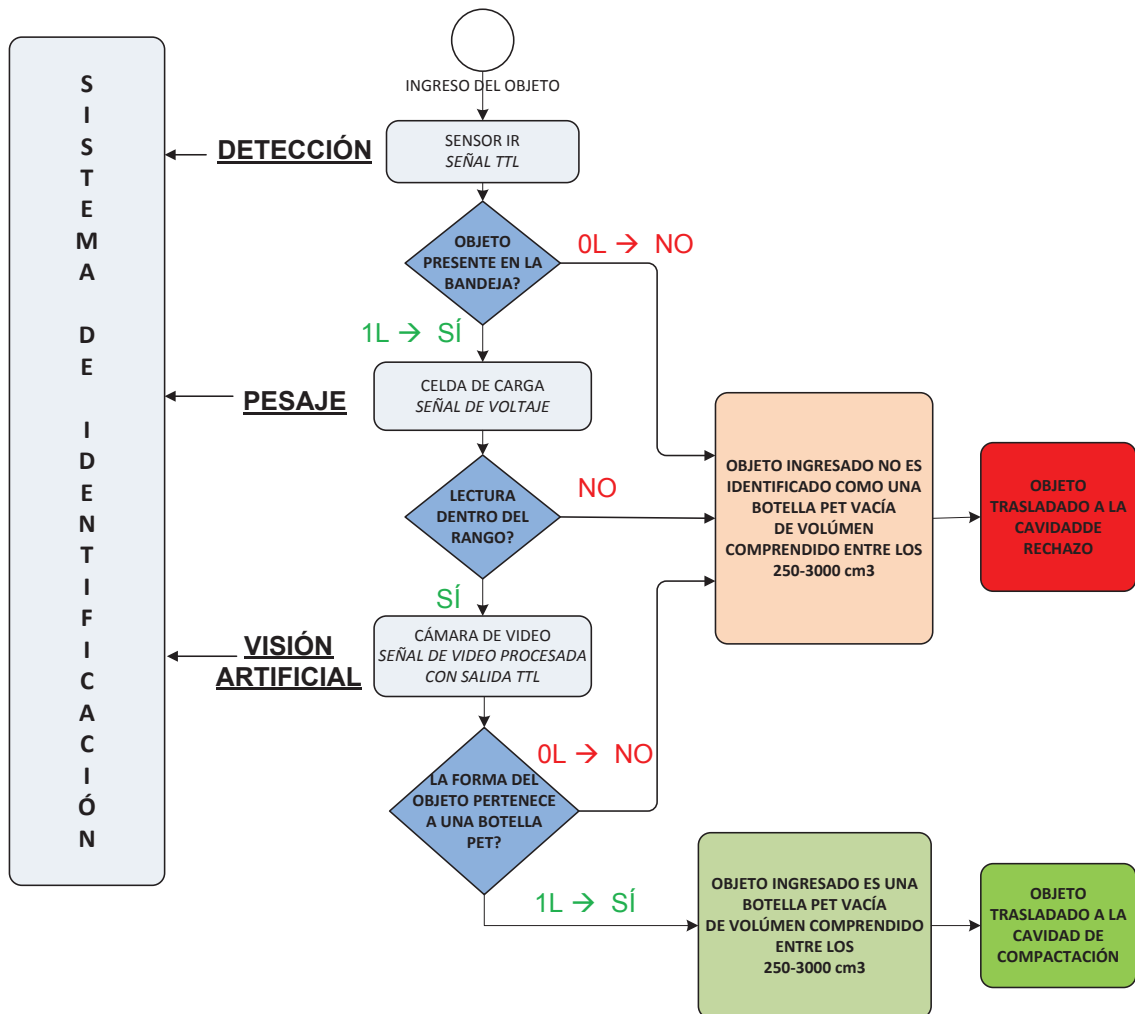


Figura 3.37 Diagrama de Flujo del Sistema de Identificación

3.3.1.2. Sistema de Transporte

El sistema de transporte desplazará el objeto a la cámara de compactación o bien a la cámara de rechazo según sea el resultado, positivo o negativo respectivamente, obtenido en el sistema de identificación y clasificación.

El desplazamiento lineal de la bandeja de captación es transmitido por el sistema piñón – cremallera sobre el cual está montado (acople mecánico a la cremallera).

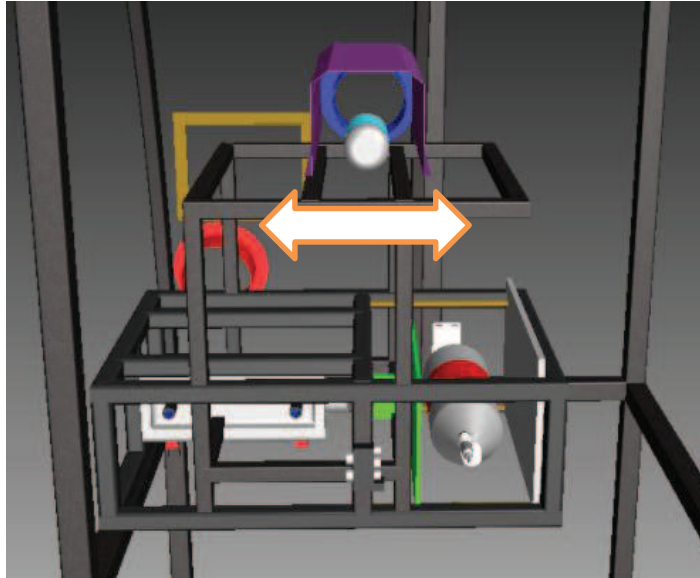


Figura 3.38 Movimiento Lineal que ejerce la Tolva de Aceptación.

El elemento motriz (piñón) está acoplado al eje de un motor de corriente continua generando así el desplazamiento angular necesario para el movimiento que el sistema de transporte necesita.

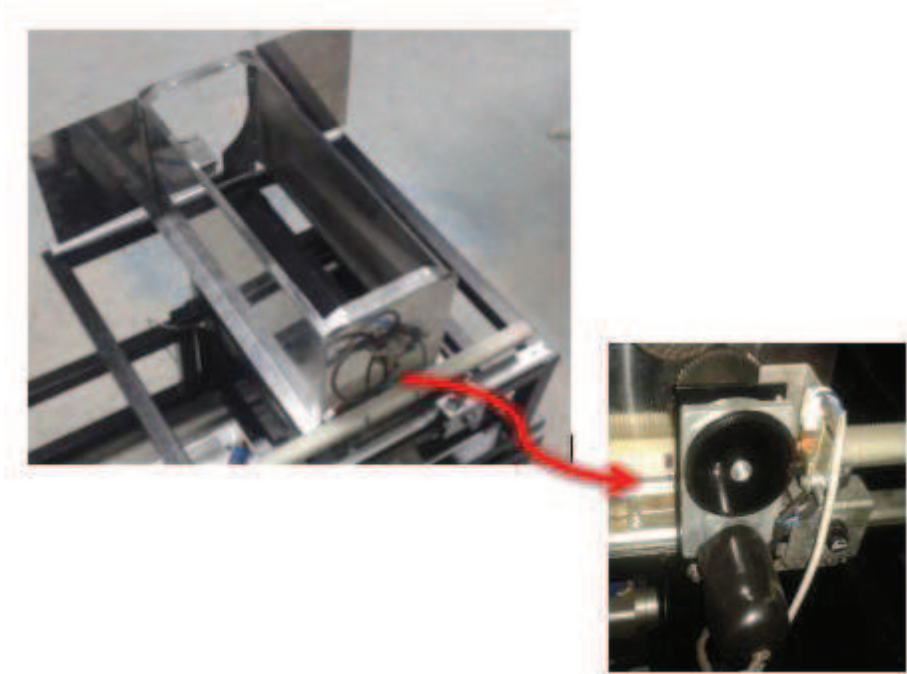


Figura 3.39 Sistema Piñón-Cremallera con Motor DC acoplado

Diseño del sistema de control

Un sistema de control es una interconexión de componentes que forman una configuración del sistema que proporcionará una respuesta deseada. La base para el análisis de un sistema es el fundamento proporcionado por la teoría de los sistemas lineales, que supone una relación directa entre causa y efecto para sus componentes. La relación entrada-salida representa la relación entre causa y efecto del proceso, que a su vez representa un procesamiento de la señal de entrada para proporcionar una señal de salida³⁰.

Para el diseño principal plantearemos un sistema de control con retroalimentación en lazo cerrado con el fin de mantener una relación preceptuada entre la salida y la entrada de referencia. El modelo básico de este sistema de control se ilustra en la figura 3.40.

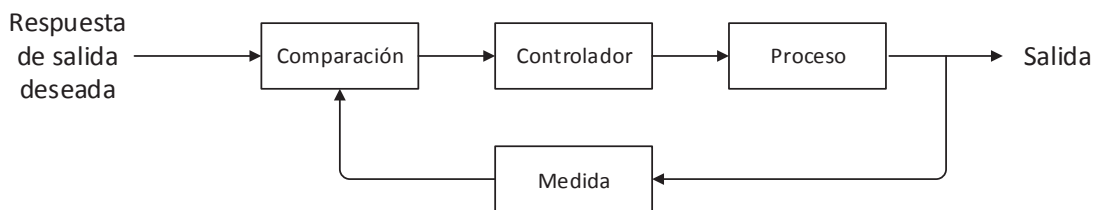


Figura 3.40 Sistema de control con retroalimentación en lazo cerrado

Los elementos utilizados en este modelo de sistema de control son cuatro: comparación, controlador, el proceso y la medida.

- ✓ **Comparación:** Define la diferencia entre la salida del proceso a controlar y la entrada de referencia, la empleamos para controlar el proceso de tal manera que ésta se reduzca continuamente.
- ✓ **Controlador:** Proporciona una señal actuante que controla el proceso de tal forma que la variable controlada se desempeñe de acuerdo con estándares preestablecidos³¹. Se pretende diseñar un controlador PID sobre el desplazamiento angular de un motor de corriente continua de tal manera que el sistema de control gane robustez.

³⁰ (Dorf & Bishop, págs. 2,3)

³¹ (Kuo, 1996, pág. 9)

- ✓ **Proceso:** Para el sistema de transporte el proceso corresponde al desplazamiento angular de un motor de corriente continua por lo que será preciso modelar dicho proceso e identificarlo para poder desarrollar el controlador más adecuado.
- ✓ **Medida:** Comprende la retroalimentación del sistema la cual se hará mediante un codificador angular de posición que se describirá posteriormente.

Se ilustra el esquema general del sistema de control principal:

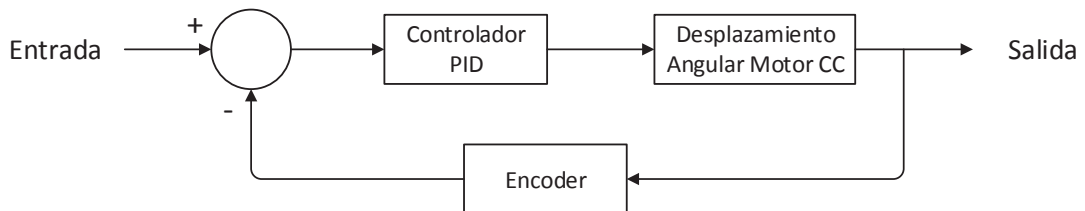


Figura 3.41 Diagrama del sistema de control principal – desplazamiento angular

Ahora bien, al sistema de control para el transporte de los objetos añadiremos una etapa importante: el sistema de control de movimiento rotativo a lineal (piñón y cremallera), figura 3.42.

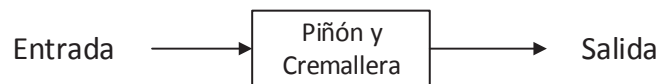


Figura 3.42 Sistema de control secundario – control de movimiento rotativo a lineal

Como se observa en la figura anterior el sistema de control es, en esencia, muy simple, pero afecta directamente al modelamiento del motor de corriente continua pues la inercia del sistema secundario se transmite al principal mecánicamente a través del eje que acopla el motor y el piñón. Todo este análisis se tomará en cuenta el modelado matemático del sistema.

Para finalizar acoplaremos los sistemas principal y secundario en la Figura 3.43 observando el sistema de control final diseñado para el transporte de los objetos.

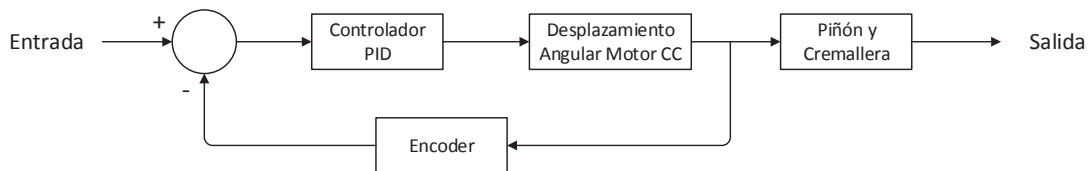


Figura 3.43 Sistema final de control para el transporte de los objetos

Modelado matemático de los elementos del sistema de control

Parte fundamental en el análisis y diseño de sistemas de control es el modelado matemático de los sistemas. Uno de los métodos más comunes para modelar sistemas lineales es el método de la función de transferencia³².

Una función de transferencia de un sistema se define como la relación entre la transformada de Laplace de la variable de salida y la transformada de Laplace de la variable de entrada, suponiendo que todas las condiciones iniciales se hacen iguales a cero. La función de transferencia de un sistema o proceso representa la relación que describe la dinámica del sistema considerado.

Una función de transferencia puede definirse únicamente para un sistema lineal y estacionario (invariante en el tiempo) y es una descripción entrada-salida del comportamiento de un sistema³³.

En esta sección se desarrollarán los modelos matemáticos de los elementos que comprenden todo el sistema de control para el transporte de los objetos previamente clasificados e identificados.

Enfatizamos que es de crucial importancia e interés el modelado de los sistemas para que el análisis de los problemas de diseño pueda resolverse convenientemente mediante el empleo de software (Matlab® en nuestro caso) con objetivo de desarrollar simulaciones analíticas y que los resultados obtenidos sean aplicados sobre el modelo real directamente.

³² (Kuo, 1996, pág. 134)

³³ (Dorf & Bishop, págs. 52,53)

Sistema Piñón Cremallera

Es de vital importancia convertir el movimiento rotacional del motor de corriente continua en un movimiento de traslación de la bandeja de captación y para ello recurrimos, como ya se había dicho antes, a un sistema de control de movimiento Piñón – Cremallera.

En este sistema de control son dos las variables importantes a modelar: la más evidente de ellas la conversión del desplazamiento angular a lineal y la segunda, la inercia que posee el sistema Piñón-Cremallera al desplazar la bandeja de captación y el objeto insertado.

Conversión del movimiento de rotación a traslación:

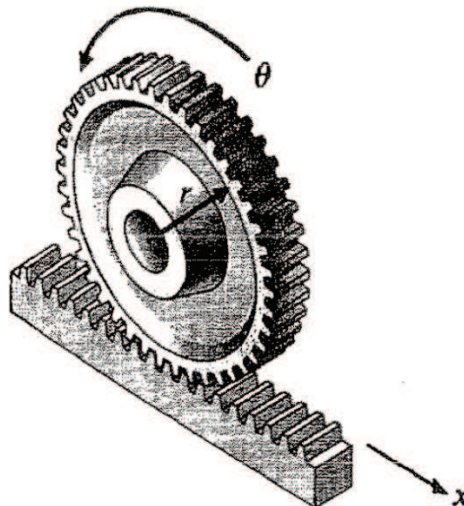


Figura 3.44 Conversión de movimiento del sistema Piñón - Cremallera

Para determinar (Ver Figura 3.43) la expresión que define el desplazamiento lineal x que la cremallera proporciona recurriremos a la expresión que sigue:

$$L = \theta \cdot r \quad \text{Ecuación 3.10}$$

Donde:

L : Longitud de arco de una circunferencia [mm]

θ : Desplazamiento angular [rad]

r : Radio de circunferencia [mm]

Ahora la longitud de arco L generada por el desplazamiento angular θ es la misma distancia que la cremallera se desplazó de manera longitudinal por lo que la Ecuación 3.10 modificada resulta:

$$x = \theta \cdot r \quad \text{Ecuación 3.11}$$

Donde:

x : Longitud de desplazamiento de la cremallera [mm]

θ : Desplazamiento angular del piñón [rad]

r : Radio del círculo de paso del piñón [mm]

La representación del sistema de piñón cremallera en forma de bloques se ilustra en la figura 3.45, donde la constante K representa el radio del círculo de paso del piñón.

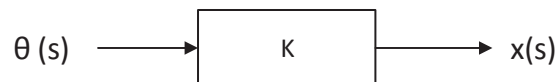


Figura 3.45 Diagrama de bloques de la conversión de movimiento del sistema Piñón-Cremallera

Inercia generada por desplazamiento de una masa:

El sistema de control de movimiento rotativo Piñón – Cremallera se emplea para conectar mecánicamente la bandeja de captación al motor, transmitiendo así, una carga inercial a través de su eje.

Podemos representar dicho esquema mediante un sistema simple con una inercia equivalente conectada directamente al motor, ver figura 3.46.

Para ello debemos tomar en cuenta las siguientes suposiciones:

- ✓ Una masa puntual se mueve en la periferia del piñón el cual tiene un radio de paso r .
- ✓ La inercia del piñón es despreciable.

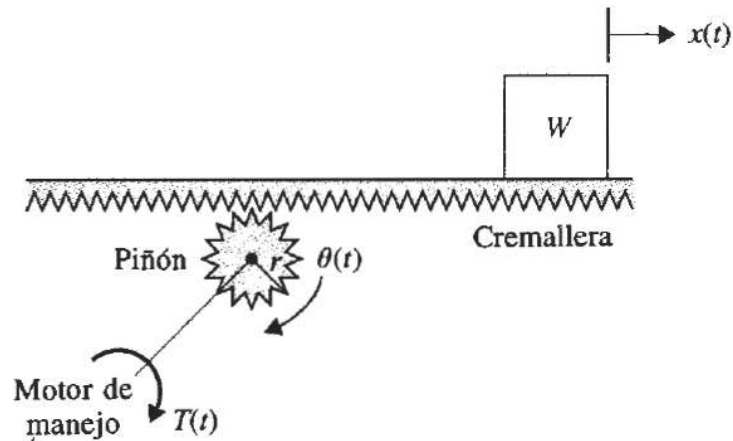


Figura 3.46 Carga mecánica del Sistema Piñón – Cremallera transmitida al motor de corriente continua

Entonces, la inercia del sistema que se transmite al motor se expresa como:

$$J_L = m \cdot r^2 \quad \text{Ecuación 3.12}$$

Donde:

J_L : Momento de Inercia del sistema que se transmite al motor $[kg \cdot mm^2]$

m : Masa a transportar por el mecanismo $[kg]$

r : radio de paso del piñón $[mm^2]$

La Ecuación 3.12 será utilizada para el modelado del motor de corriente continua en la siguiente sección.

Motor de CC controlado por campo, actuador rotacional

Se desarrollará a continuación el modelo matemático lineal de un motor de corriente continua al cual se le ha acoplado una carga inercial que en el modelo real representa el acople mecánico entre el eje del motor y el sistema piñón-cremallera que así mismo se encuentra conectada a la bandeja de captación.

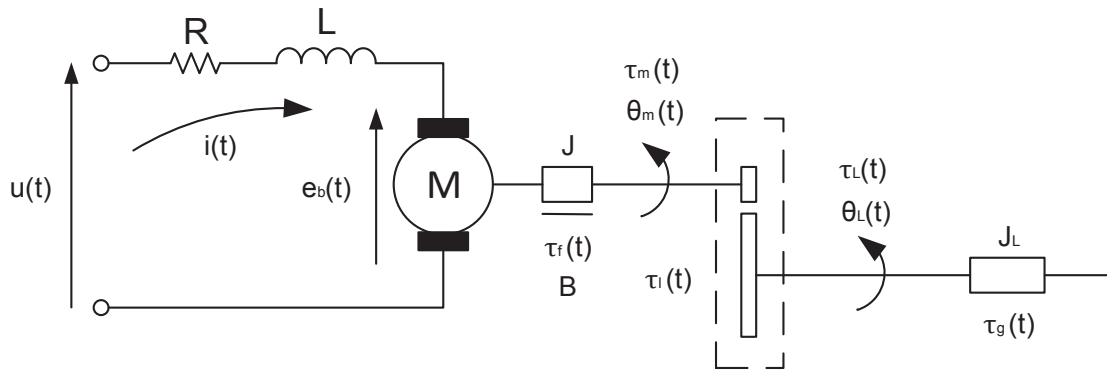


Figura 3.47 Esquema mecánico y eléctrico del motor CC con carga

En la figura 3.47 se muestra el esquema electromecánico de un motor de corriente continua acoplado a una carga. Este sistema puede ser representado por las ecuaciones diferenciales que siguen:

Ecuación eléctrica – Leyes de Kirchhoff:

$$u(t) = L \cdot \frac{di(t)}{dt} + R \cdot i(t) + e_b(t) \quad \text{Ecuación 3.13}$$

Ecuación mecánica – Leyes de Newton:

$$\tau_m(t) = J_e \cdot \frac{d^2\theta_m(t)}{dt^2} + \tau_l(t) + \tau_f(t) \quad \text{Ecuación 3.14}$$

Donde:

$u(t)$: Tensión eléctrica aplicada al motor

$i(t)$: Corriente Eléctrica

$e_b(t)$: Fuerza contra-electromotriz

$\tau_m(t)$: Par del motor

$\tau_l(t)$: Par de la carga visto desde el eje del motor

$\tau_f(t)$: Par de fricción

R : Resistencia eléctrica

L : Inductancia eléctrica

J_e : Momento de inercia eficaz

Los parámetros R , L , y J_e se considerarán como constantes. El motor de corriente continua satisface las siguientes ecuaciones de acoplo electromecánico:

$$\tau_m(t) = k_m \cdot i(t) \quad \text{Ecuación 3.15}$$

$$e_b(t) = k_b \cdot \dot{\theta}_m(t) \quad \text{Ecuación 3.16}$$

Donde:

k_m : Constante del par del motor

k_b : Constante de la fuerza electromotriz

$\dot{\theta}_m(t)$: Velocidad angular del eje del motor

Se hace notar que $k_m = k_b$ pero los fabricantes les dan valores diferentes debido a las unidades que utilizan para cada una de ellas, en el desarrollo del modelado se las representará por separado para observar el efecto de los acoples mecánico y eléctricos por separado.

Análisis de la fricción:

Se desarrollará el análisis de fricción en base al modelo clásico de fricción o modelo CVS³⁴ expresada de la manera que sigue:

$$\tau_f(t) = \tau_{rC}(t) + \tau_{rV}(t) + \tau_{fs}(t) \quad \text{Ecuación 3.17}$$

³⁴ (Monasterio Huelin & Gutiérrez, 2012, pág. 4)

Donde:

$\tau_{fC}(t)$: Par de fricción seca o fricción de Coulomb

$\tau_{fV}(t)$: Par de fricción viscosa

$\tau_{fs}(t)$: Par de fricción estática

Además se tiene que:

$$\tau_{fV}(t) = B \cdot \dot{\theta}_m(t) \quad \text{Ecuación 3.18}$$

$$\tau_{fC}(t) = \tau_C \cdot \text{sgn}(\dot{\theta}_m(t)) \quad \text{Ecuación 3.19}$$

$$\tau_{fs}(t) = \begin{cases} \tau_e(t), & |\tau_e(t)| \leq \tau_S, \quad \dot{\theta}_m(t) = \ddot{\theta}_m(t) = 0 \\ \tau_S \cdot \text{sgn}(\tau_e(t)), & |\tau_e(t)| > \tau_S, \quad \dot{\theta}_m(t) = 0, \quad \ddot{\theta}_m(t) \neq 0 \end{cases} \quad \text{Ecuación 3.20}$$

En la Ecuación 3.14 tenemos que:

$$\tau_e(t) = \tau_m(t) - \tau_l(t) - J \cdot \ddot{\theta}_m(t) \quad \text{Ecuación 3.21}$$

Donde:

$\tau_e(t)$ Representa el par externo.

Los parámetros B , τ_C y τ_S representan las constantes de fricción viscosa, de Coulomb y estática respectivamente.

El par de fricción estática se presenta cuando el eje del motor está inmóvil o cuando hay un cambio de sentido del eje del motor ($\ddot{\theta}_m(t) \neq 0$). En el momento del arranque impide el movimiento del eje del motor hasta que el par externo supere un valor constante τ_S . La variación temporal se debe a la corriente eléctrica $i(t)$ pues en el arranque $i(t) \neq 0$. Esta fricción produce un

retardo temporal desde el punto de vista mecánico pero no se considera ninguna clase de retardo con respecto al punto de vista eléctrico³⁵.

Consideraremos exclusivamente la fricción viscosa en el modelo matemático del motor de corriente continua dada la no linealidad de los pares producidos por las fricciones de Coulomb y estática haciendo que:

$$\tau_f(t) = \tau_{fv}(t) \quad \text{Ecuación 3.22}$$

Remplazando la Ecuación 3.18 en la expresión anterior se tiene:

$$\tau_f(t) = B \cdot \dot{\theta}_m(t) \quad \text{Ecuación 3.23}$$

Análisis de la carga acoplada al motor:

De manera general se considera que la carga está acoplada al motor mediante un mecanismo reductor con un factor de reducción $N \in (0,1)$ y un factor de rendimiento $\eta \in (0,1)$.

La velocidad angular $\dot{\theta}_L(t)$ y el par de la carga $\tau_L(t)$ a la salida del mecanismo reductor están relacionados con $\theta_m(t)$ y $\tau_i(t)$ en el eje del motor por medio de las siguientes expresiones:

$$\theta_L(t) = N \cdot \theta_m(t) \quad \text{Ecuación 3.24}$$

$$\tau_L(t) = \frac{\eta}{N} \cdot \tau_i(t) \quad \text{Ecuación 3.25}$$

A la carga acoplada la vamos a considerar como un cuerpo rígido cuya ecuación dinámica la podemos expresar de la siguiente forma:

$$\tau_L(t) = J_L \cdot \frac{d^2\theta_L(t)}{dt^2} + \tau_g(t) \quad \text{Ecuación 3.26}$$

³⁵ (Monasterio Huelin & Gutiérrez, 2012, pág. 5)

Donde:

J_L : Momento de inercia de la carga

$\tau_g(t)$: Función lineal dependiente de la posición angular $\theta_L(t)$ que representan los efectos gravitacionales.

Remplazando las Ecuaciones 3.24 y 3.25 en la Ecuación 3.26 y despreciando los efectos gravitacionales que se presenten en la carga se tiene que:

$$\tau_l(t) = \frac{N^2 \cdot J_L}{\eta} \cdot \frac{d^2\theta_m(t)}{dt^2} \quad \text{Ecuación 3.27}$$

Se rempaza ésta ecuación, la Ecuación 3.15 y la Ecuación 3.23 en la representación mecánica del motor dada en la Ecuación 3.14:

$$k_m \cdot i(t) = J_e \cdot \frac{d^2\theta_m(t)}{dt^2} + B \cdot \frac{d\theta_m(t)}{dt} \quad \text{Ecuación 3.28}$$

Donde:

$$J_e = J + \frac{m \cdot r^2 \cdot N^2}{\eta} \quad \text{Ecuación 3.29}$$

Obtención de la función de transferencia:

Aplicamos la transformada de la Laplace a las ecuaciones eléctricas y mecánicas, Ecuaciones 3.13 y 3.28 respectivamente y se obtiene:

$$U(s) = (L \cdot s + R) \cdot I(s) + k_b \cdot s \cdot \Theta(s)$$

$$k_m \cdot I(s) = s \cdot (J_e \cdot s + B) \cdot \Theta(s)$$

Despejando $I(s)$ en las ecuaciones presentadas anteriormente obtenemos:

$$k_m \cdot U(s) = s \cdot ((Ls + R) \cdot (J_e \cdot s + B) + k_b \cdot k_m) \cdot \Theta(s)$$

Ahora obtenemos la función de transferencia en posición del motor:

$$G_u(s) = \frac{\Theta(s)}{U(s)} = \frac{k_m}{s \cdot ((Ls + R) \cdot (J_e \cdot s + B) + k_b \cdot k_m)} \quad \text{Ecuación 3.30}$$

La función de transferencia $G_u(s)$ puede ser escrita como un sistema realimentado en el que el acople eléctrico se encuentra en el lazo realimentado y el acople mecánico en el lazo directo como se ilustra en la Figura 3.47 donde $G'_u(s)$ es una función de transferencia de los circuitos eléctrico y mecánico de un motor de corriente continua desacoplado³⁶,

$$G'_u(s) = \frac{1}{(Ls + R) \cdot (J_e \cdot s + B)} \quad \text{Ecuación 3.31}$$

Puede deducirse que:

$$G_u(s) = \frac{1}{s} \cdot \frac{k_m \cdot G'_u(s)}{1 + k_m \cdot k_b \cdot G'_u(s)} \quad \text{Ecuación 3.32}$$

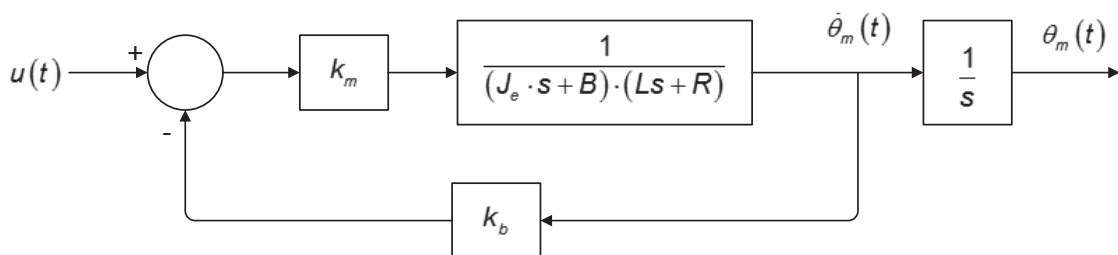


Figura 3.48 Esquema de un motor CC

La figura 3.48 nos permite simplificar el modelo del motor fácilmente teniendo en cuenta que la dinámica eléctrica es mucho más rápida que la mecánica obteniendo un modelo simplificado que es una buena aproximación del modelo de orden tres.

³⁶ (Monasterio Huelin & Gutiérrez, 2012, pág. 8)

Eliminando la constante eléctrica en la Ecuación 3.31 obtenemos:

$$G'_u(s) = \frac{1}{R \cdot (J_e \cdot s + B)} \quad \text{Ecuación 3.33}$$

Remplazando la expresión anterior en la Ecuación 3.32 determinamos que el modelo matemático que define nuestro sistema transportador es:

$$G_u(s) = \frac{k_m}{s \cdot (R \cdot J_e \cdot s + R \cdot B + k_b \cdot k_m)} \quad \text{Ecuación 3.34}$$

Identificación del Sistema

En este apartado se obtendrá de forma experimental el modelo matemático que reproduzca con suficiente exactitud las características dinámicas del sistema de transporte.

El proceso de identificación, en términos generales, se lo describe de la siguiente manera:

1. Adquisición de datos entrada-salida: Se registra la evolución de las entradas y salidas del sistema durante un determinado intervalo de tiempo mientras la entrada es excitada con una señal de entrada.
2. Tratamiento previo de los datos registrados: Usualmente la adquisición de datos viene acompañada de ruidos u otro tipo de imperfecciones por lo que puede ser necesario discriminar, corregir o filtrar los datos adquiridos facilitando y mejorando el proceso de identificación.
3. Selección de la estructura del modelo: De ser, el modelo a identificar, paramétrico se establece la estructura deseada para dicho modelo basado en el conocimiento que se posee sobre las leyes físicas que rijan el proceso.
4. Obtención de los parámetros del modelo: Se estiman los parámetros de la estructura que mejor se ajustan la respuesta del modelo a los datos obtenidos experimentalmente

5. Validación del modelo: Se evalúa si el modelo obtenido satisface el grado de exactitud que la aplicación requiera. Los datos deben proporcionar suficiente información sobre la dinámica del sistema, la estructura escogida debe ser capaz de describir con exactitud el modelo y el criterio de ajuste de parámetros seleccionado debe ser el más adecuado.

Dependiendo del modelo obtenido existen dos tipos de métodos de identificación:

- No Paramétricos: se obtienen modelos no paramétricos como por ejemplo: análisis de la respuesta transitoria, análisis de la respuesta en frecuencia, análisis de la correlación, análisis espectral, análisis de Fourier entre otros.
- Paramétricos: los modelos obtenidos son paramétricos y necesitan una posible estructura para el modelo, un criterio de ajuste y una estimación de parámetros.

Bajo el método de identificación no paramétrica se definen dos técnicas, identificación en el dominio de la frecuencia e identificación en el dominio del tiempo. En esta última basaremos nuestro procedimiento para el modelado experimental del proceso registrando la evolución temporal de la salida del sistema tras la aplicación de una señal escalón.

Adquisición de datos:

En el sistema de transporte vamos a controlar la variable posición longitudinal de la bandeja de captación y que se obtiene mediante la transformación de movimiento rotacional en longitudinal con el sistema piñón-cremallera que se ha modelado anteriormente. Se observa entonces que en realidad se controla la posición angular $\theta_L(t)$ integrada de la velocidad angular $\dot{\theta}_L(t)$ como se observa en la figura 3.48 por lo que los datos se obtendrán en la adquisición son los de la velocidad angular de tal manera que

se pueda identificar, obtener y validar el modelo de un motor de corriente teniendo como salida la velocidad para luego mediante integración determinar la función de transferencia del motor teniendo como salida del sistema la posición angular.

Software:

Para la fase del sistema de identificación se desarrolló una interfaz de adquisición de datos en Matlab® (ver figura 3.49) ganando versatilidad en la manipulación del valor del escalón y teniendo un monitoreo continuo de la señal mediante gráficas en función del tiempo. Además que se podrán exportar los datos para generar un histórico de la adquisición. Para ver el desarrollo de la programación se puede recurrir al Anexo 5.

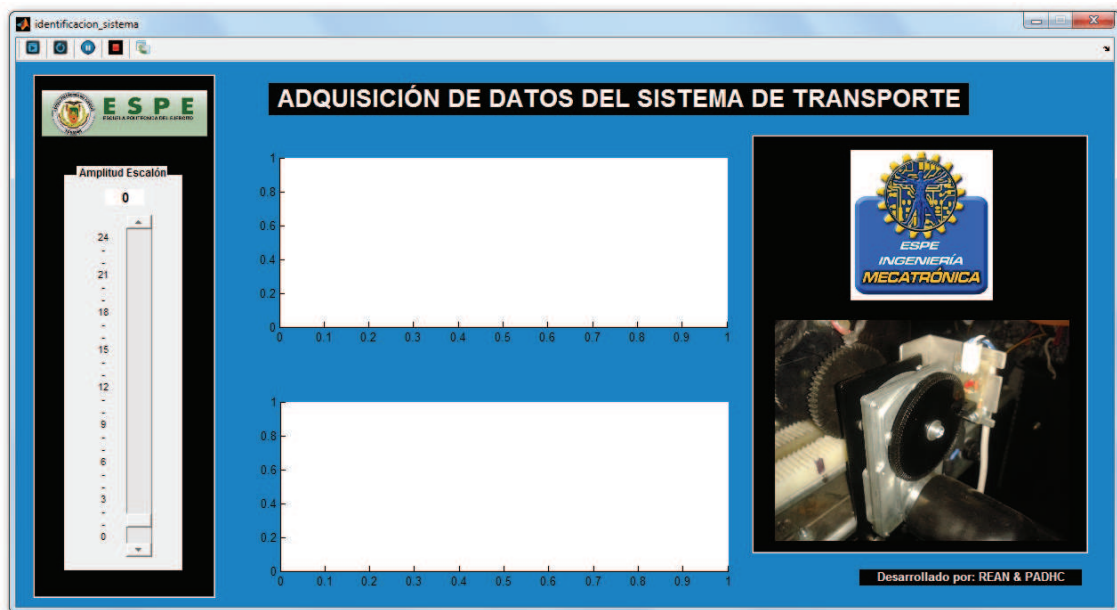


Figura 3.49 Interfaz de usuario para la adquisición de datos

Hardware:

Se diseñó y manufacturó una tarjeta de adquisición de datos para realizar las mediciones de velocidad en el sistema transportador. Se usó un microcontrolador de la familia PIC16F876A y su programación fue desarrollada en el compilador mikroBASIC®. La comunicación entre la tarjeta y la interfaz se la realizó mediante el protocolo de transmisión y recepción de datos RS-232 a

través de un cable de conversión RS232 – USB, los protocolos de comunicación serán tratados a profundidad en el apartado 3.4.3.



Figura 3.50 Cable de comunicación adaptador USB a RS232



Figura 3.51 Compilador mikroBASIC®

Selección del periodo de muestreo:

La elección del periodo de muestreo T_m repercute directamente en la calidad que tendrán los datos obtenidos en la adquisición, es decir, que no se perderá información al determinar correctamente dicho periodo.

El microprocesador está trabajando a una frecuencia de 8MHz lo que implica que el tiempo de instrucción es de $0.5 \mu s$ y haciendo una aproximación de las líneas usadas en la programación tenemos que el microcontrolador se

demora como mínimo $50 \mu\text{s}$ en ejecutar el programa cada ciclo como criterio inicial se toma:

$$T_m > 3 \cdot T_{\text{procesador}} \quad \text{Ecuación 3.35}$$

Entonces se debe cumplir que: $T_m > 150 [\mu\text{s}]$ y siendo conservadores en la elección del tiempo de muestreo elegimos: $T_m = 1000 [\mu\text{s}] = 0.001 [\text{s}]$.

Adquisición de datos:

La adquisición de datos tuvo un tiempo de duración de 3.5 segundos mientras se le aplicaba una señal de escalón $u(t)$ de amplitud $18 [\text{V}]$. La salida del sistema es la velocidad angular del motor $\dot{\theta}_L(t)$ expresada en $[\text{rad/s}]$. En la figura siguiente podemos observar la adquisición de datos a través de la interfaz:

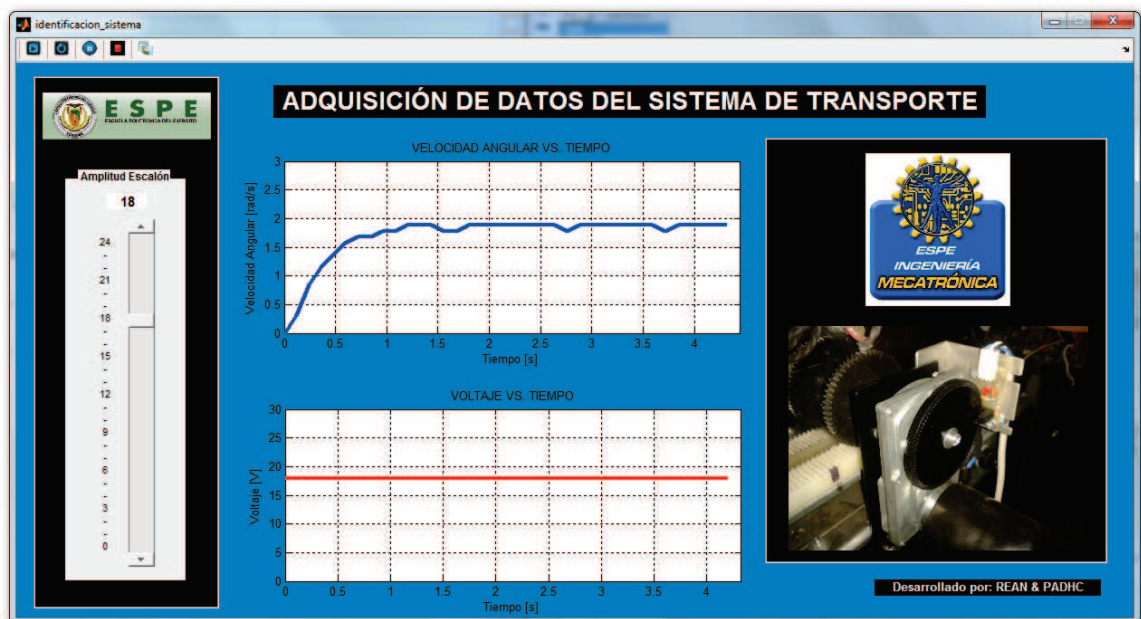


Figura 3.52 Visualización en la interfaz de la adquisición de datos del sistema transportador

Los resultados obtenidos a la respuesta escalón se muestran en la siguiente figura:

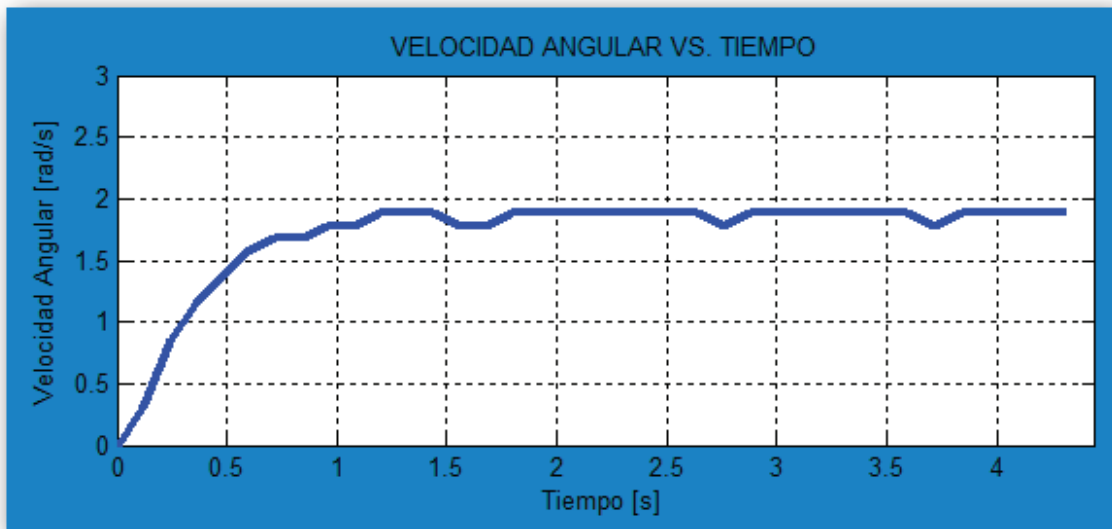


Figura 3.53 Respuesta sistema de transporte a un escalón de 18V

Por lo tanto se puede concluir que el motor de corriente continua (sistema de transporte) en velocidad es estable en lazo abierto para cualquier escalón que se le aplique y que la calidad de datos obtenidos es buena pues no se presentan ruidos y no se necesitará dar un pre procesamiento a dichos datos.



Figura 3.54 Ícono exportar de la interfaz de adquisición de datos

El siguiente paso es guardar y exportar los datos obtenidos en la carpeta de archivos, esto se realiza mediante el botón de exportar ubicado en la barra de herramientas de la interfaz de adquisición de datos, obteniendo los resultados que se ilustran en las figuras mostradas a continuación:

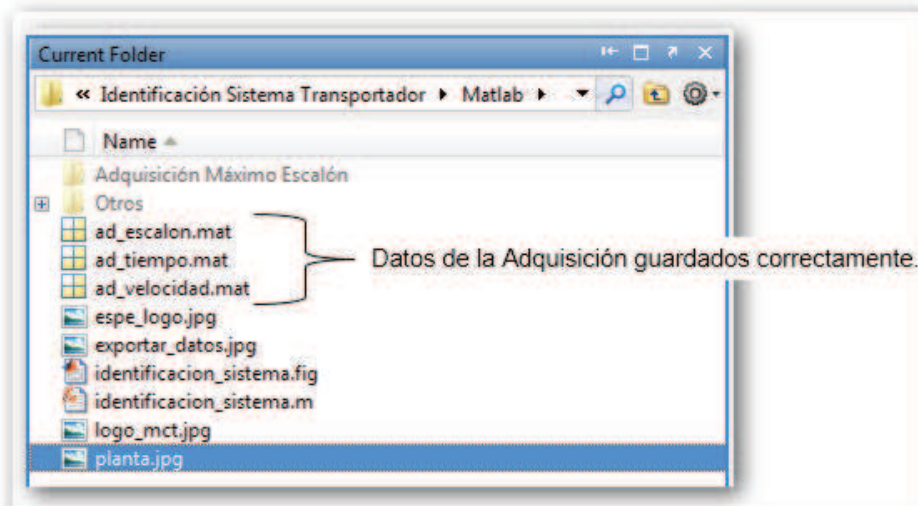


Figura 3.55 Visualización de los datos guardados.

Identificación del sistema:

Ya guardados los datos, el siguiente paso es exportar los archivos al *Workspace* para poder cargarlos al *System Identification Toolbox* de Matlab® y obtener los parámetros del modelo.

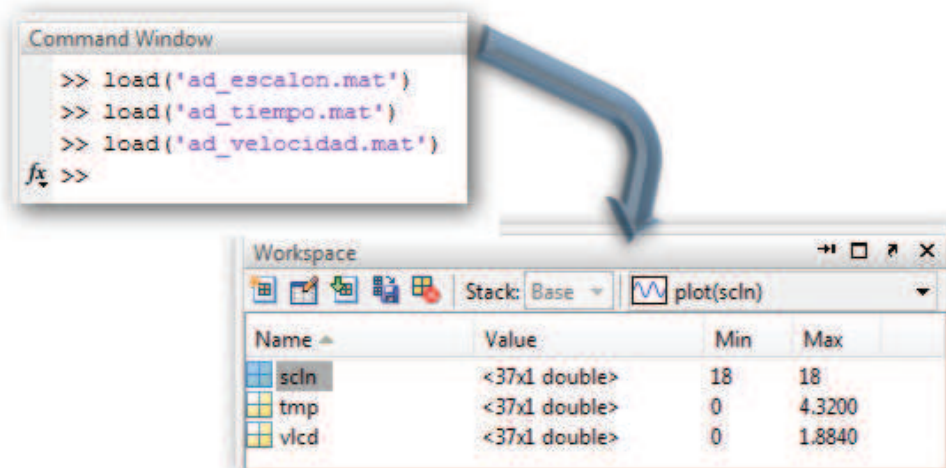


Figura 3.56 Datos exportados al *Workspace* de Matlab®

En la ventana de comandos escribimos '*ident*' para abrir la herramienta de identificación de sistemas:

```
Command Window
>> ident
Opening System Identification Tool ..... done.
fx >>
```

Figura 3.57 Apertura de la herramienta de identificación de sistemas

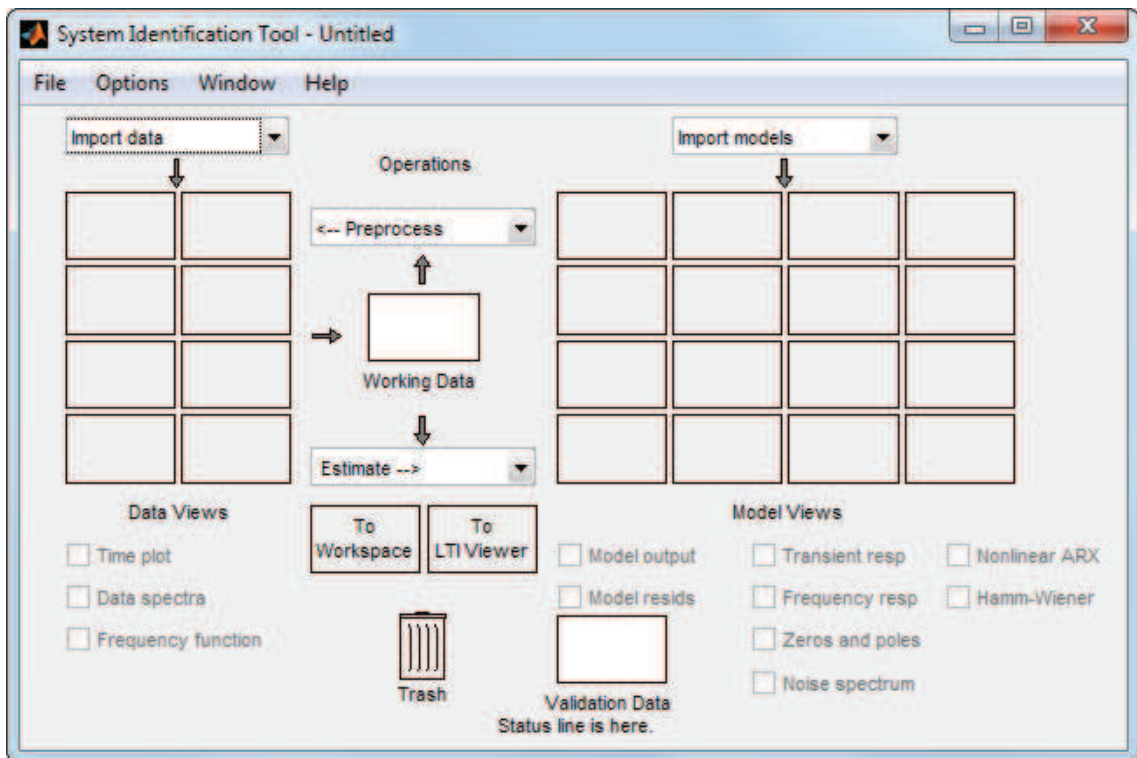


Figura 3.58 Herramienta de identificación de sistemas

Abierta la herramienta de identificación, se importan los datos obtenidos en la adquisición, los cuales están en el dominio del tiempo por lo que en la lista desplegable elegimos 'Time domain data...', lo que abrirá una nueva ventana donde se deberán ingresar los vectores que contienen los datos y que se cargaron con anterioridad al *workspace*.

La figura 3.59 muestra el procedimiento a realizarse.

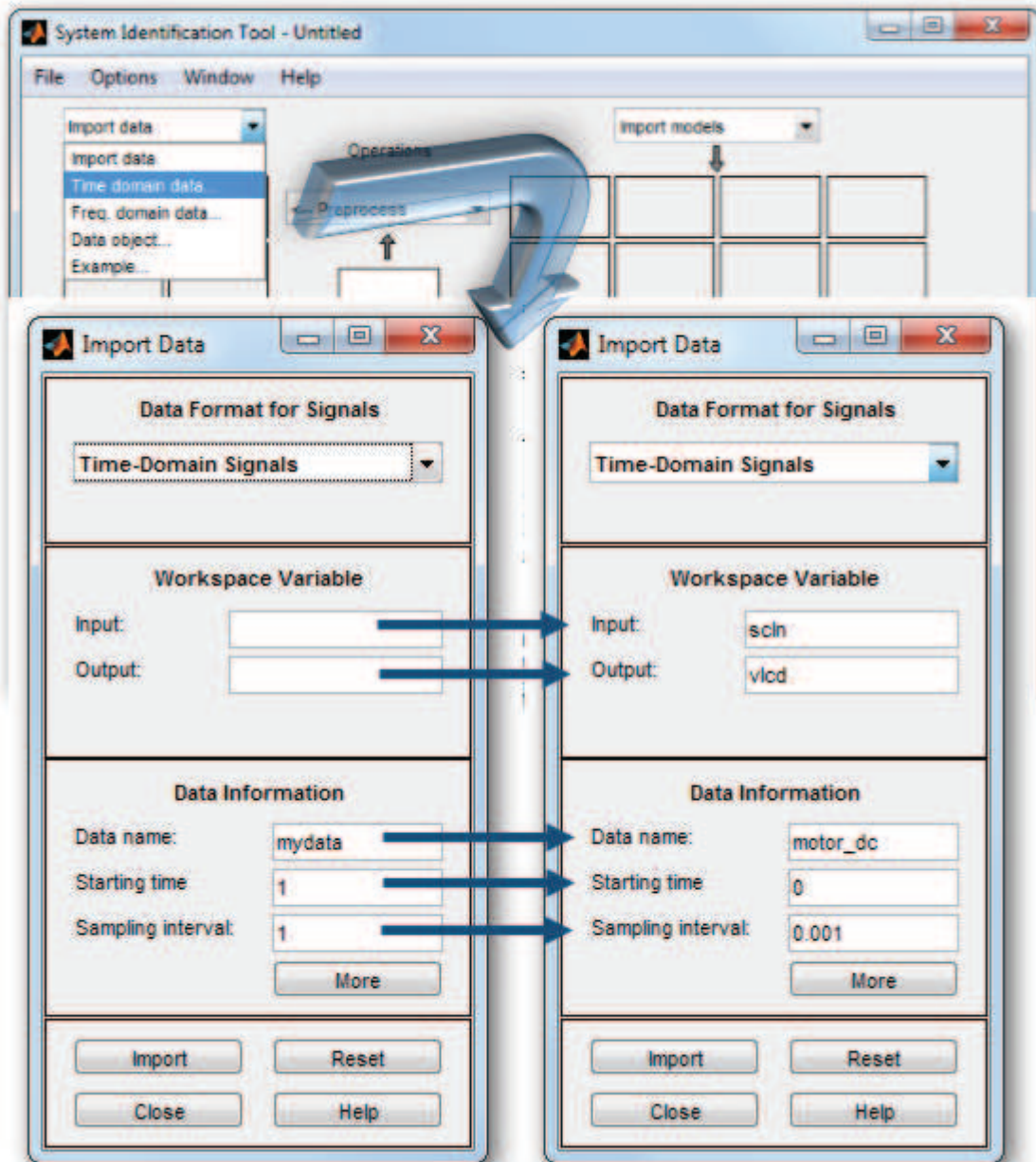


Figura 3.59 Proceso de importación de datos a la herramienta de identificación de sistemas

La operación de importación finaliza al presionar el botón 'Import'. Podemos visualizar las gráficas de entrada y salida de la adquisición de datos marcando la casilla 'Time Plot'.

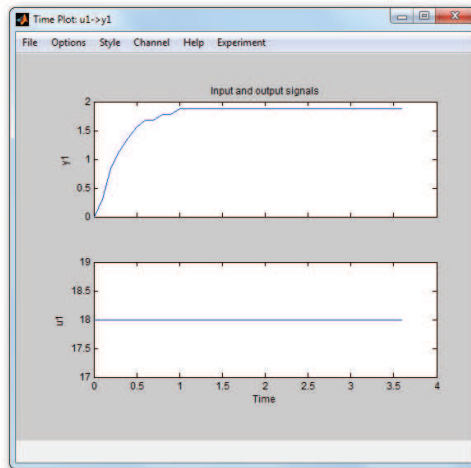


Figura 3.60 Mapeo de los datos de entrada y salida en el sistema de identificación

En la lista desplegable en el centro de la pantalla se selecciona 'Process Models...', lo que abrirá una nueva ventana que muestra la configuración de los posibles parámetros que nuestro modelo puede tener.

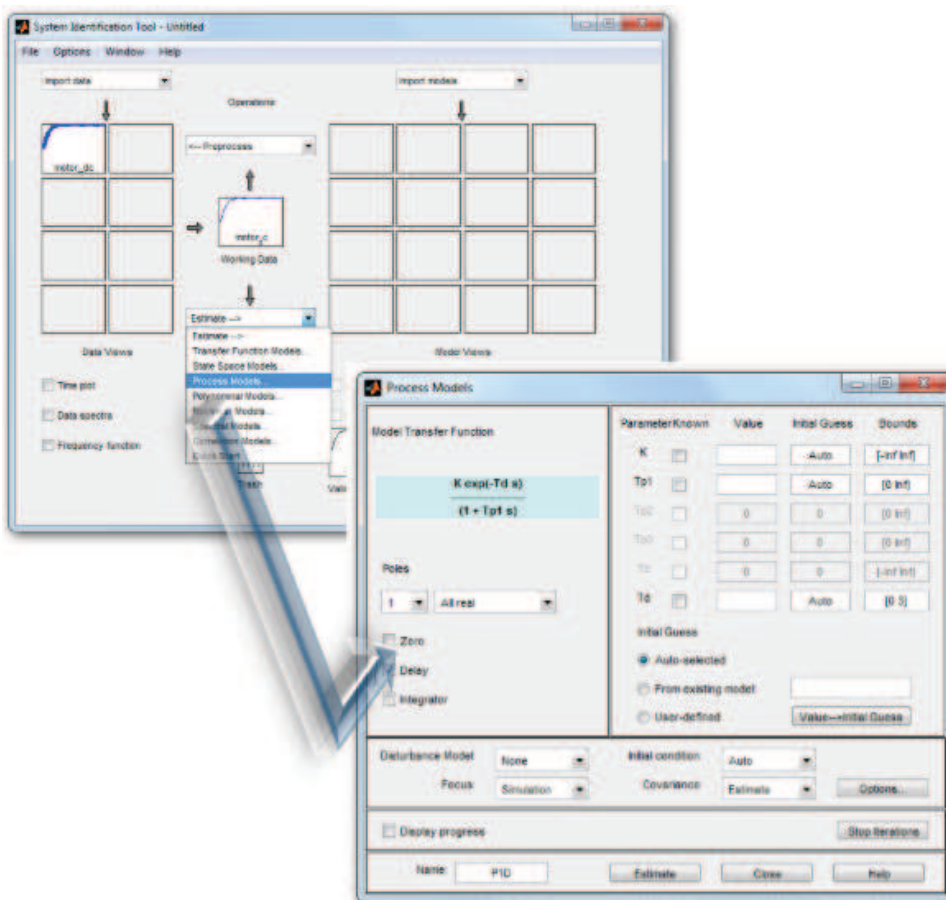


Figura 3.61 Ventana de proceso de modelado de sistemas

La configuración de los parámetros para el modelado debe coincidir con lo establecido en el análisis matemático llevado a cabo anteriormente y que debe tener la forma de la Ecuación 3.34, una función de transferencia de primer orden, sin ceros y sin retrasos. En la figura siguiente se muestra la configuración que se tomó para el modelado del sistema.

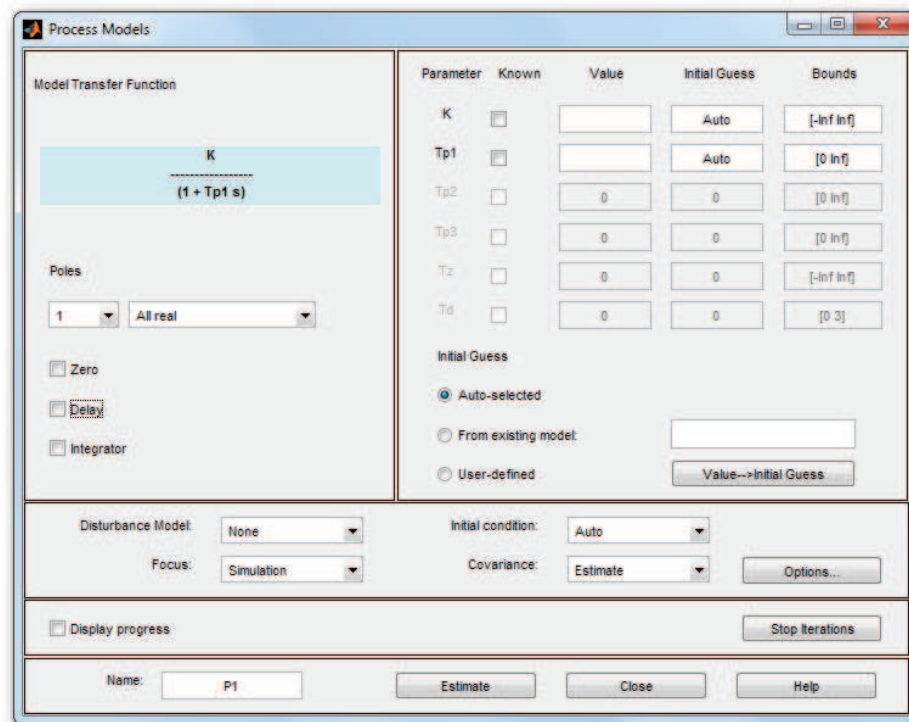


Figura 3.62 Ventana de configuración de parámetros del modelado del sistema

Por propósitos comparativos se tomó una segunda estimación del modelo, la forma que representa la función de transferencia de segundo grado (2 polos, sin ceros y sin retardo) y que corresponde al modelo matemático completo del motor de corriente continua teniendo como salida del sistema la velocidad angular.

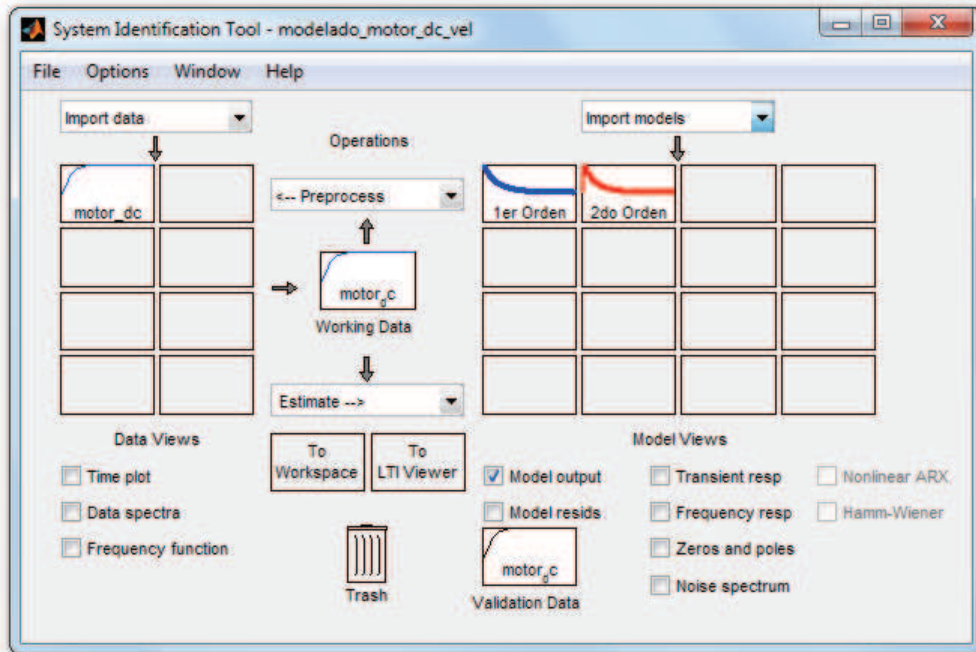


Figura 3.63 Proceso de modelado de los sistemas de primer y segundo orden

Marcando la casilla 'Model output' se despliega una ventana con los sistemas estimados. Ahí se puede visualizar el porcentaje de coincidencia de las estimaciones con los datos tomados en la adquisición.

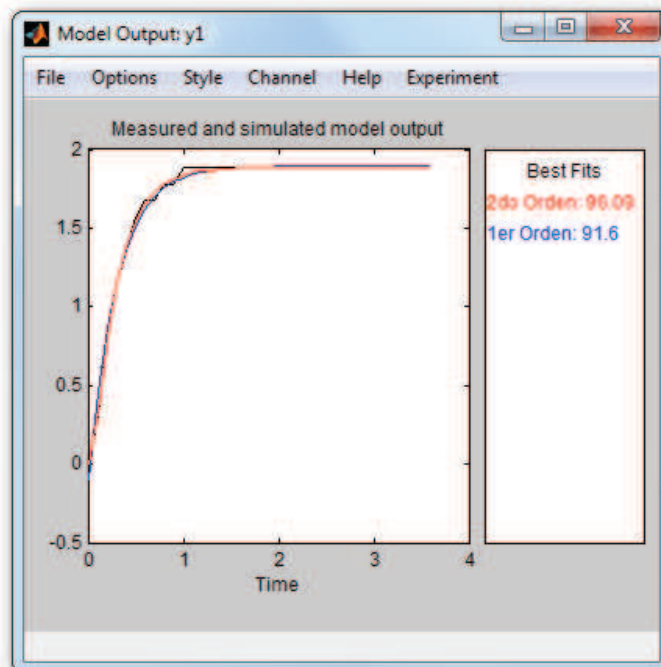


Figura 3.64 Resultados de la modelación paramétrica de los sistemas

En la figura 3.65 se muestran los resultados obtenidos y se observa que el porcentaje de coincidencia de ambos modelos es mayor al 90% significando eso una buena aproximación al modelo real. Para facilitar el análisis de cálculo de los controladores se opta por el modelo de primer orden que representa el modelo simplificado de un motor de corriente continua con velocidad angular como salida.

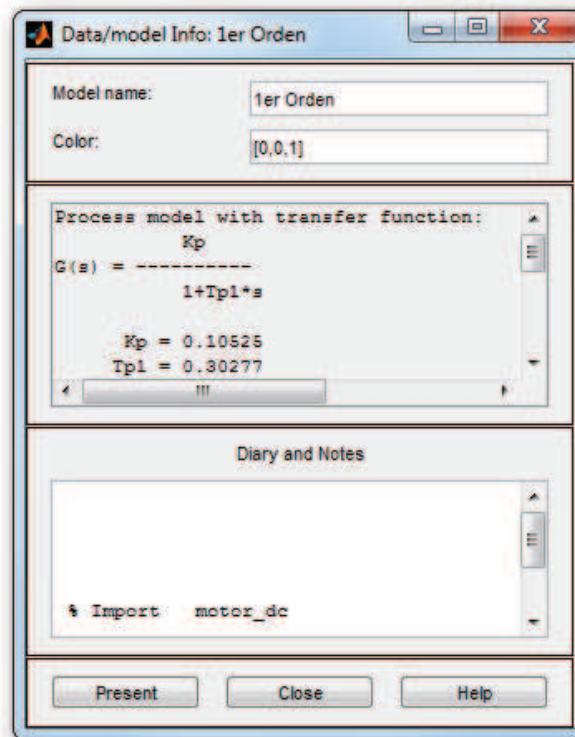


Figura 3.65 Datos del modelo del sistema de primer orden

Función de transferencia del sistema de transporte

Para determinar la función de transferencia que define el sistema de transporte haremos referencia al diagrama siguiente:

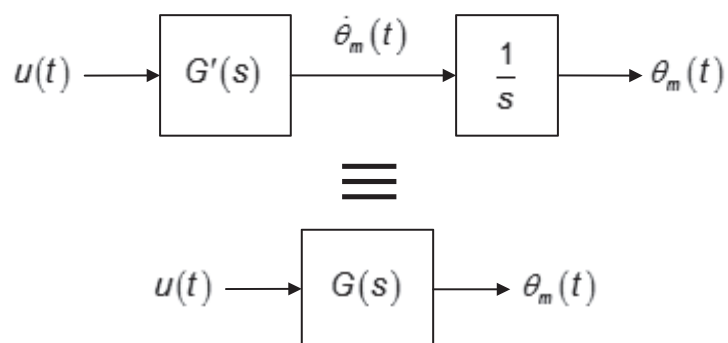


Figura 3.66 Diagrama de bloques del sistema de transporte

De la figura 3.66 tenemos:

$$G'_u(s) = \frac{0.10525}{0.30277 \cdot s + 1} \quad \text{Ecuación 3.36}$$

Simplificando el diagrama de bloques de la figura 3.66 determinamos la función de transferencia que define el sistema transportador:

$$G_u(s) = \frac{0.10525}{s \cdot (0.30277 \cdot s + 1)} \quad \text{Ecuación 3.37}$$

Diseño del Controlador

El análisis del sistema se desarrollará usando el potencial con sus comandos para el análisis de sistemas de control. Se realizará un breve análisis de estabilidad tanto en lazo abierto como cerrado en base a las respuestas que el sistema tenga a la aplicación de un escalón en la entrada. El código usado para el análisis y las respuestas del sistema puede verse a detalle en el anexo 7.

Para el diseño del controlador se aplicará la metodología analítica de respuesta en frecuencia centrándonos en la robustez (estabilidad robusta y comportamiento robusto) en presencia de incertidumbres. En la actualidad se considera el hecho de que tanto los sistemas físicos y el entorno el cual operan no se puede modelar de manera precisa, pueden cambiar de manera no predecible, y pueden estar sujetos a perturbaciones significativas³⁷.

Es importante mencionar que el diseño del controlador se realizará poniéndonos como datos de partida los parámetros de desempeño deseados que se establecen en función de las necesidades del sistema transportador y que cumplan con los tiempos estimados para el proceso.

³⁷ (Dorf & Bishop, pág. 723)

Parámetros de desempeño³⁸:

Los parámetros de desempeño para el diseño de un sistema de control a menudo implican ciertos requisitos relacionados con el tiempo de respuesta del sistema. Los requisitos para una respuesta al escalón se expresan en términos de las cantidades estándar ilustradas en la figura 3.67.

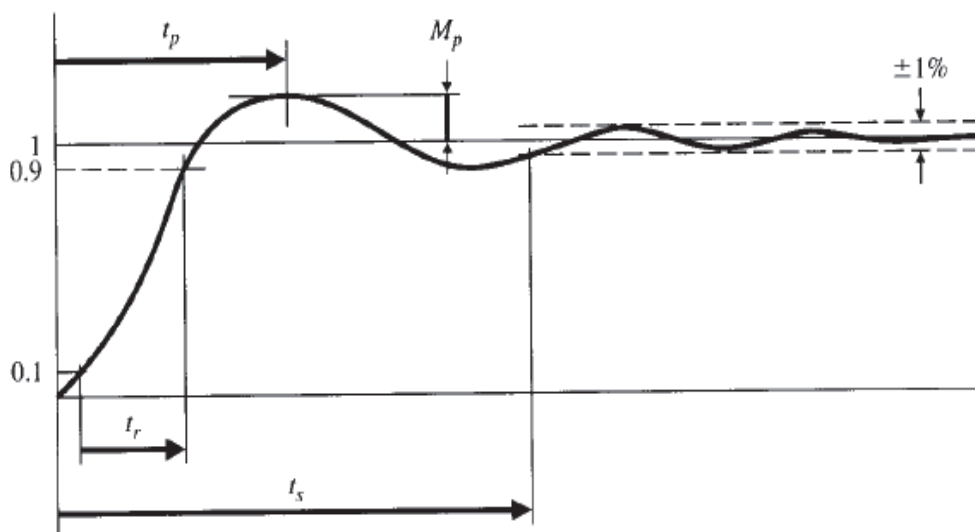


Figura 3.67 Parámetros de desempeño en un sistema de segundo orden sin ceros

El **tiempo de subida** t_r es el tiempo que tarda el sistema para llegar a las cercanías de su nueva referencia (setpoint).

El **tiempo de establecimiento** t_s es el tiempo que tardan los transitorios del sistema en descender.

El **sobre pico** M_p es la cantidad máxima que el sistema rebasa su valor final, dividido por su valor final (con frecuencia expresado como porcentaje).

³⁸ (Franklin, Powell, & Workman, 1998, págs. 20-21)

Las aproximaciones comúnmente usadas para el caso de segundo orden sin ceros son:

$$t_p \approx \frac{1.8}{\omega_n} \quad \text{Ecuación 3.38}$$

$$t_s \approx \frac{4.6}{\zeta \cdot \omega_n} \quad \text{Ecuación 3.39}$$

$$M_p \approx e^{\frac{-\pi \cdot \zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \quad \text{Ecuación 3.40}$$

Las Ecuaciones 3.39 y 3.40 caracterizan la respuesta transitoria de un sistema que no tiene ceros finitos y dos polos complejos con frecuencia natural no amortiguada ω_n e índice de amortiguamiento ζ . En el análisis y diseño, son utilizados para obtener una estimación aproximada del tiempo de subida, el sobre pico y el tiempo de ajuste para casi cualquier sistema.

Es importante tener en cuenta, sin embargo, que son guías cualitativas y fórmulas de diseño que no son precisas. Tienen el propósito de proporcionar un punto de partida para la iteración del diseño y el tiempo de respuesta siempre se debe comprobar después de que el diseño de control se completa mediante un cálculo exacto, por lo general mediante simulación numérica, para verificar si las especificaciones de tiempo realmente se cumplen. Si no se han cumplido, es necesaria otra iteración en el diseño.

Dado el conocimiento teórico previo se establecen los parámetros de desempeño deseados, basándonos en el tiempo de un segundo y medio en el cual la bandeja de captación debe transportar el objeto previamente identificado, ya sea a la cámara de compactación o a la tolva de rechazo.

A continuación se muestran dichos parámetros: $t_s \leq 2$ [s] y $M_p \leq 1$ [%].

Respuesta del sistema en lazo abierto:

Aplicando un escalón, mediante el comando *step()* de Matlab®, en la entrada del sistema obtuvimos la respuesta que se muestra en la figura que sigue:

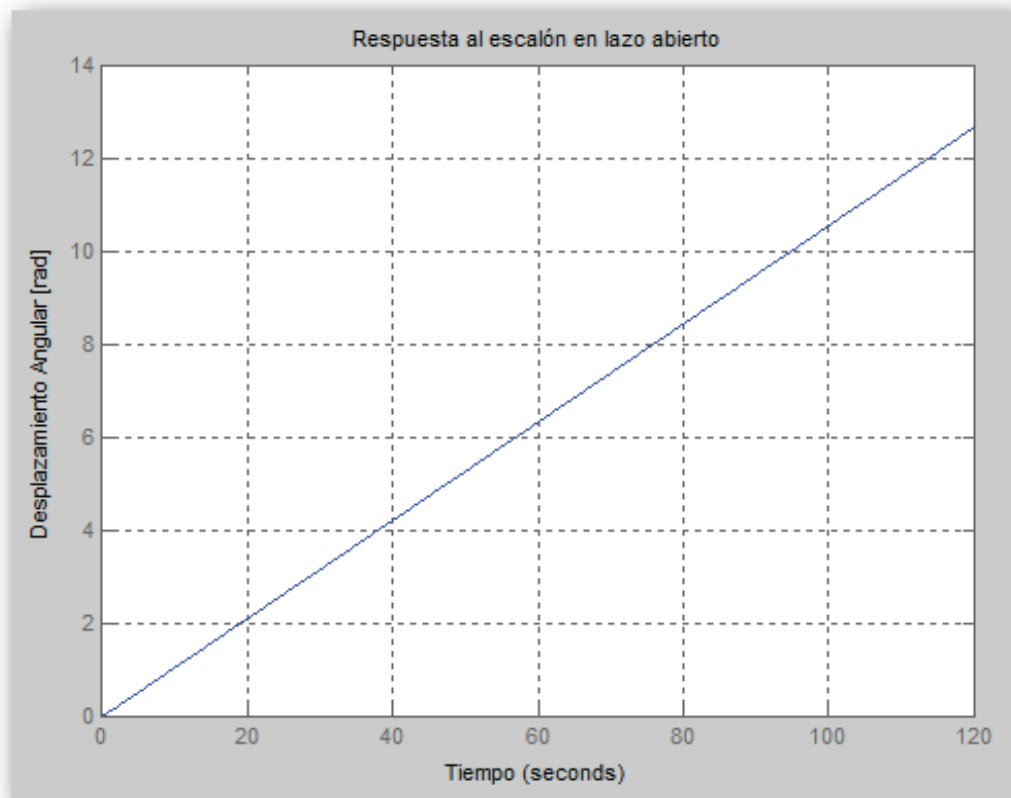


Figura 3.68 Respuesta al escalón del sistema en lazo abierto

De la figura concluimos que al aplicar un escalón de 12V y no tener retroalimentación el motor gira indefinidamente. El sistema es críticamente inestable pues la salida es una rampa y no se estabiliza en el transcurso del tiempo.

Respuesta del sistema en lazo cerrado

Al igual que en el análisis anterior obtenemos la respuesta del sistema, a diferencia que esta vez el sistema ha sido realimentado con el comando *feedback()* con ganancia unitaria.

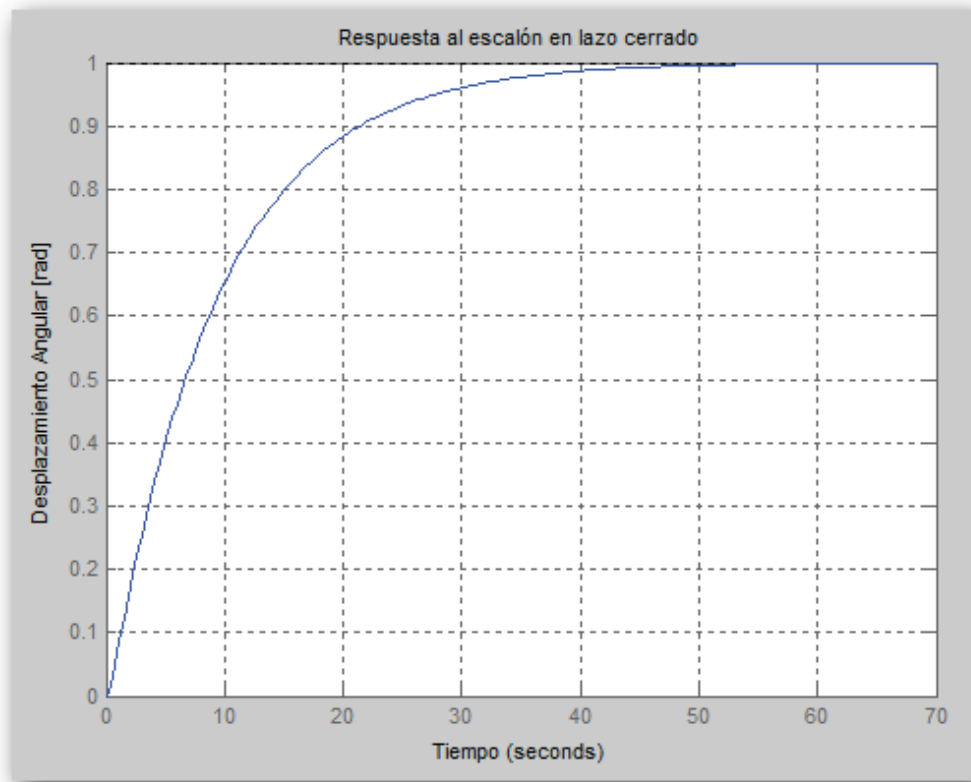


Figura 3.69 Respuesta al escalón del sistema en lazo cerrado

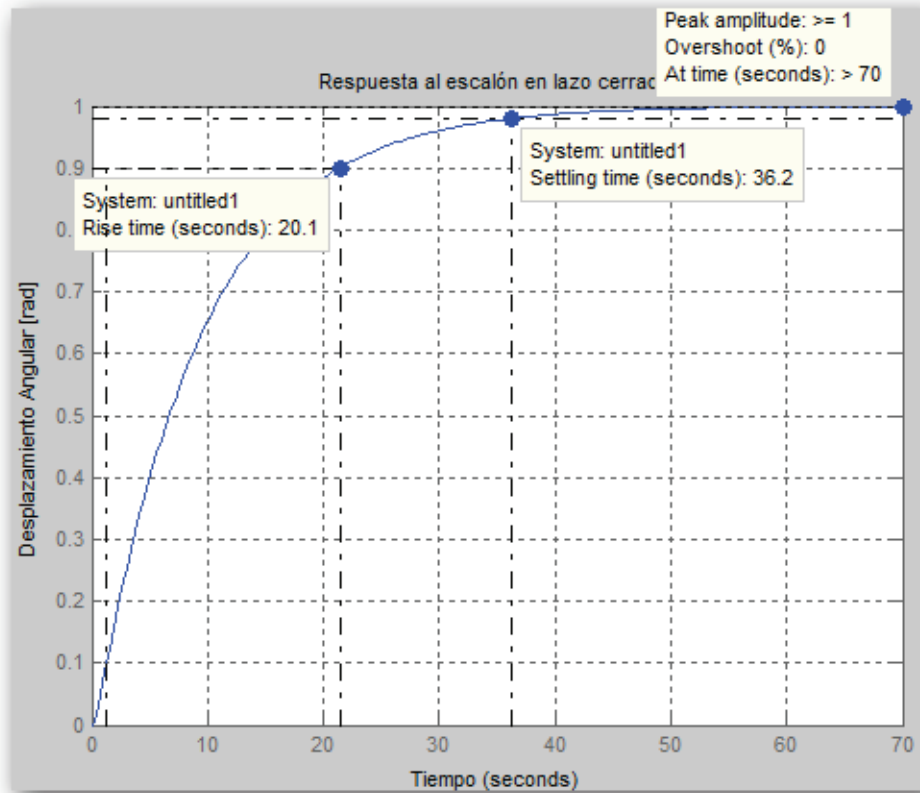


Figura 3.70 Parámetros de desempeño del sistema en alzo cerrado sin controlador

De las Figuras 3.69 y 3.70 concluimos que retroalimentando el sistema se consigue estabilizarlo alcanzando un valor constante en régimen permanente. Además se establece que el sistema tiene los siguientes parámetros de desempeño: $t_s = 36.2$ [s] y $M_p = 0$ [%]. Se concluye entonces que el sistema requiere de la implementación de un controlador que mejore los parámetros de desempeño con la finalidad de cumplir con los establecidos anteriormente. En tal virtud se llevará a cabo el diseño analítico de cuatro controladores, enlistados a continuación:

- Control proporcional (P)
- Control proporcional y derivativo (PD)
- Control proporcional e integral (PI)
- Control proporcional, integral y derivativo (PID)

Como observación final de este análisis llevado a cabo se anticipa el cálculo del tiempo de muestreo, establecido anteriormente de manera algo empírica, mediante teoremas de límites de muestreo dándole al diseño un nivel matemático mejor fundamentado.

Cálculo del tiempo de muestreo³⁹

Del teorema del límite del muestreo. El límite teórico está dado por:

$$\omega_s > 2\omega_b \quad \text{Ecuación 3.41}$$

Donde:

ω_s : Frecuencia de muestreo

ω_b : Ancho de banda de la planta en lazo cerrado

³⁹ (Franklin, Powell, & Workman, 1998, págs. 449-453)

Observación: La Ecuación 3.41 posee el límite fundamental más bajo para la frecuencia de muestreo que en la práctica provoca que el muestreo se vuelva lento para tiempos de respuesta aceptables del sistema.

Para frecuencias de muestreo con una considerable continuidad en la respuesta en el tiempo se recomienda que:

$$20\omega_b < \omega_s < 40\omega_b \quad \text{Ecuación 3.42}$$

Para nuestro diseño tomaremos el valor de:

$$\omega_s = 30\omega_b \quad \text{Ecuación 3.43}$$

Además:

$$\omega_s = \frac{2\pi}{T_m} \quad \text{Ecuación 3.44}$$

Donde: T_m es el tiempo de muestreo.

Remplazando la Ecuación 3.43 en la 3.44 tenemos que:

$$T_m = \frac{2\pi}{30\omega_b} \quad \text{Ecuación 3.45}$$

Para determinar el ancho de banda del sistema en lazo cerrado utilizamos el comando *bandwidth()* de Matlab® (ver Anexo 7), obteniendo:

$$\omega_b = 0.1087 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$$

Entonces:

$$T_m \approx 1.7 \text{ [s]}$$

El valor hallado representa el tiempo de periodo de muestreo máximo que podemos utilizar, ahora bien para poder determinar el más mínimo de los cambios en el sistema lo más rápido posible utilizaremos un tiempo de muestreo:

$$T_m = 0.1 \text{ [s]}$$

Diseño analítico de controladores PID⁴⁰:

Para un controlador PID la función de transferencia que lo define está dada por:

$$G_c(s) = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s \quad \text{Ecuación 3.46}$$

Como en la figura 3.70, se asume que el diagrama de Nyquist compensado pasa por el punto $1 \angle -180^\circ + \phi_m$ para una frecuencia ω_1 , al alcanzar el margen de fase ϕ_m . En otras palabras:

$$G_c(j\omega_1) \cdot G_p(j\omega_1) \cdot G_H(j\omega_1) = 1 \angle -180^\circ + \phi_m \quad \text{Ecuación 3.47}$$

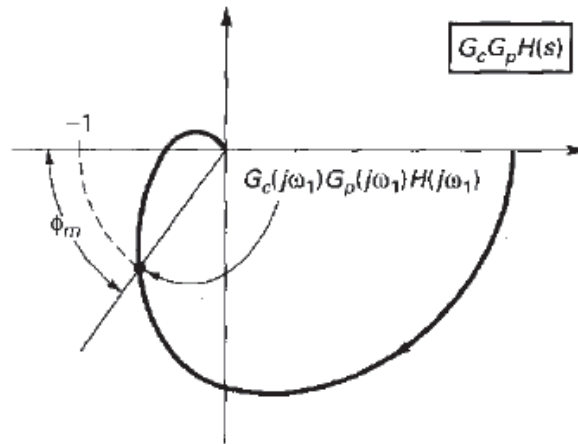


Figura 3.71 Diagrama de Nyquist compensado

Si al ángulo de $G_c(j\omega_1)$ lo llamamos θ , entonces de la Ecuación 3.47:

$$\theta = \arg[G_c(j\omega_1)] = -180^\circ + \phi_m - \arg G_p(j\omega_1) \cdot G_H(j\omega_1) \quad \text{Ecuación 3.48}$$

De la Ecuación 3.47 y la Ecuación 3.48 se tiene que:

$$K_P + j\left(K_D \omega_1 - \frac{K_I}{\omega_1}\right) = |G_c(j\omega_1)|(\cos \theta + j \text{sen} \theta) \quad \text{Ecuación 3.49}$$

Además, de la Ecuación 3.48, despejando $G_c(j\omega_1)$ e igualando los módulos:

⁴⁰ (Franklin, Powell, & Workman, 1998, págs. 398-399)

$$|G_C(j\omega_1)| = \frac{1}{|G_P(j\omega_1) \cdot G_H(j\omega_1)|} \quad \text{Ecuación 3.50}$$

Asumiendo que se conoce ω_1 (o no), conocemos los valores de θ y $|G_C(j\omega_1)|$ de las Ecuaciones 3.48 y 3.49. En consecuencia en la Ecuación 3.50, igualamos las partes real e imaginaria en ambos lados de la ecuación y obtenemos dos ecuaciones con tres incógnitas. Por lo tanto se asume el valor de una de las ganancias y se hallan las otras dos. Desde luego, como no conocemos ω_1 tendríamos dos ecuaciones y cuatro incógnitas. La frecuencia de margen de fase ω_1 puede ser calculada al fijar un tiempo de establecimiento t_s usando la Ecuación 3.40. Adicionalmente, la ganancia K_I , puede escogerse para satisfacer las especificaciones de baja frecuencia ya que, a bajas frecuencias, el controlador PID es dominado por el término integral.

De igualar las partes reales de la Ecuación 3.50:

$$K_p = \frac{\cos \theta}{|G_P(j\omega_1) \cdot G_H(j\omega_1)|} \quad \text{Ecuación 3.51}$$

Y de la parte imaginaria:

$$K_D \omega_1 - \frac{K_I}{\omega_1} = \frac{\text{sen} \theta}{|G_P(j\omega_1) \cdot G_H(j\omega_1)|} \quad \text{Ecuación 3.52}$$

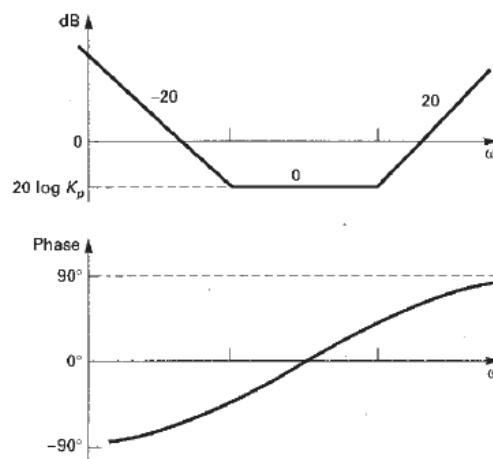


Figura 3.72 Traza de Bode de un controlador PID

Dado ω_1 , la ganancia K_p , se calcula de la Ecuación 3.52. El ángulo de fase del controlador a ω_1 , θ , puede ser positivo o negativo tal como se indica en la figura 3.72. De dicha figura también se observa que la magnitud del controlador, $|G_c(j\omega_1)|$, puede ser mayor o menor a la unidad. Así que el único requerimiento en la elección de ω_1 es que la magnitud de θ en la Ecuación 3.48 es que sea menor a 90° .

Las Ecuaciones 3.51 y 3.52 son de diseño general pues estas ecuaciones se aplican para cualquier variación que se presente en el controlador PID.

Control Proporcional (P):

La función de transferencia de un controlador proporcional está dada por la expresión:

$$G_c(s) = K_p$$

De la Identificación del sistema obtuvimos que el sistema está definido por:

$$G_p(s) = \frac{0.10525}{s(0.30277s + 1)}$$

Se desea cumplir con los siguientes parámetros de desempeño:

$$M_p = 1 \text{ [%]}$$

$$t_s = 2 \text{ [s]}$$

De la Ecuación 3.40 se tiene:

$$\zeta = \sqrt{\frac{\ln^2(M_p)}{\pi^2 + \ln^2(M_p)}} \quad \text{Ecuación 3.53}$$

En base a los parámetros de desempeño deseados: $\zeta \approx 0.9$

Determinando el margen de fase deseado:

$$\phi_m = 100\zeta \quad \text{Ecuación 3.54}$$

Por lo que: $\phi_m = 90$ [°]

Ahora determinamos la frecuencia natural del sistema mediante la Ecuación 3.40:

$$\omega_n = 2.556 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$$

Se sabe que la retroalimentación del sistema es unitaria por lo que:

$$H(s) = 1$$

Hacemos que: $\omega_1 = \omega_n$, $s = j\omega_1$:

$$G_p(j\omega_1) \cdot H(j\omega_1) = -0.02 - j0.026$$

Donde:

$$\arg[G_p(j\omega_1) \cdot H(j\omega_1)] = -127.7^\circ \text{ y } |G_p(j\omega_1) \cdot H(j\omega_1)| = 0.033$$

Se sigue que:

$$\theta = -180^\circ + \phi_m - \arg[G_p(j\omega_1) \cdot H(j\omega_1)] \Rightarrow \theta = 37.731^\circ$$

Finalmente:

$$K_P = \frac{\cos \theta}{|G_p(j\omega_1) \cdot H(j\omega_1)|} \Rightarrow K_P = 24.28 \therefore G_c(s) = 24.28$$

Hallado el controlador P se procede a determinar la respuesta al escalón, dando como respuesta las figuras siguientes:

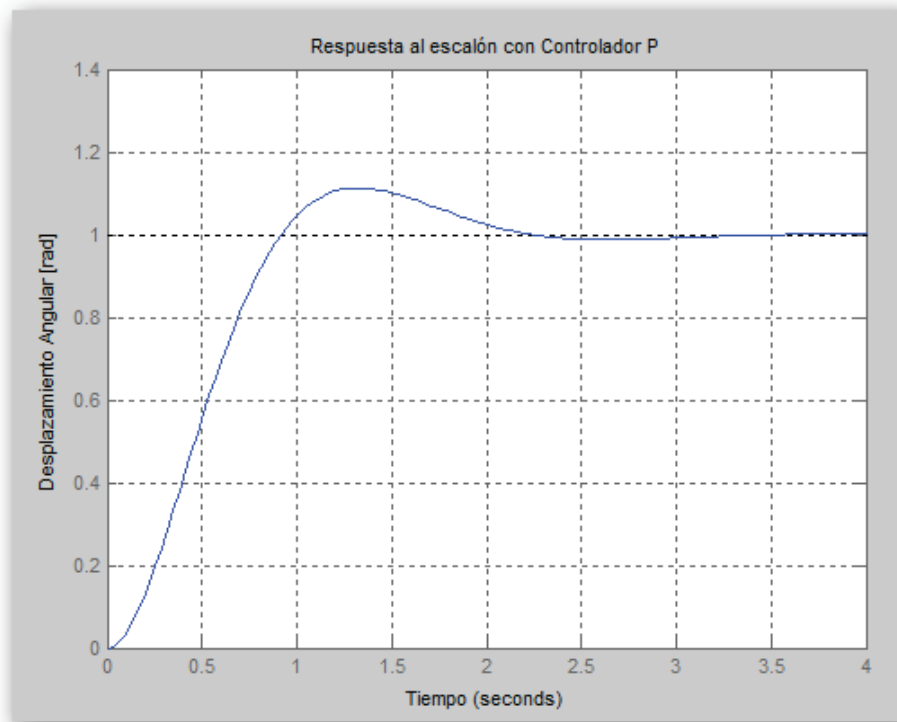


Figura 3.73 Respuesta al escalón del sistema con un controlador P

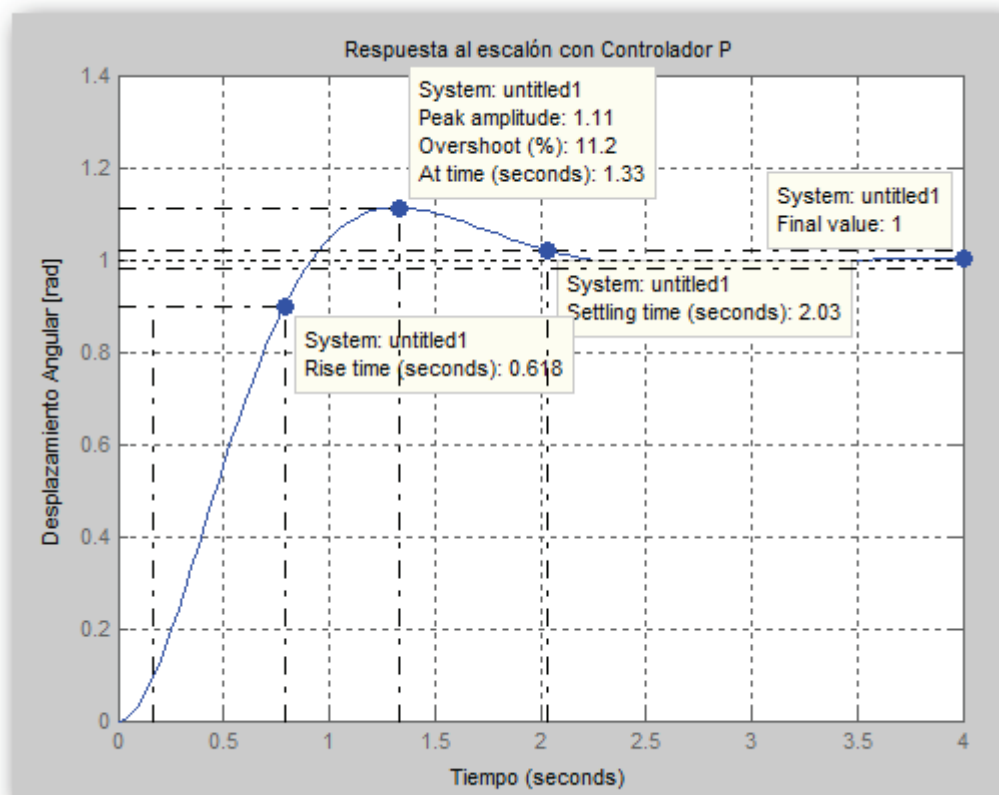


Figura 3.74 Parámetros de desempeño obtenidos del sistema implementado con un controlador P

Controlador proporcional y derivativo (PD):

La función de transferencia para un controlador PD está dada por:

$$G_c(s) = K_p + K_D s \quad \text{Ecuación 3.55}$$

El procedimiento para determinar la constante K_p es el mismo que el desarrollado en el control proporcional por lo que $K_p = 24.28$.

Ahora extendiendo el cálculo de la constante derivativa tenemos:

$$K_D = \frac{\sin \theta}{\omega_1 \cdot |G_p(j\omega_1) \cdot H(j\omega_1)|} \quad \text{Ecuación 3.56}$$

Realizando las operaciones tenemos que $K_D = 7.335$.

Construyendo el controlador PD en la forma de la Ecuación 3.48:

$$G_c(s) = 24.28 + 7.335s$$

Comprobando el efecto que tiene el controlador PD sobre el sistema se muestran a continuación la respuesta del sistema controlado al someter el sistema a una entrada de escalón:

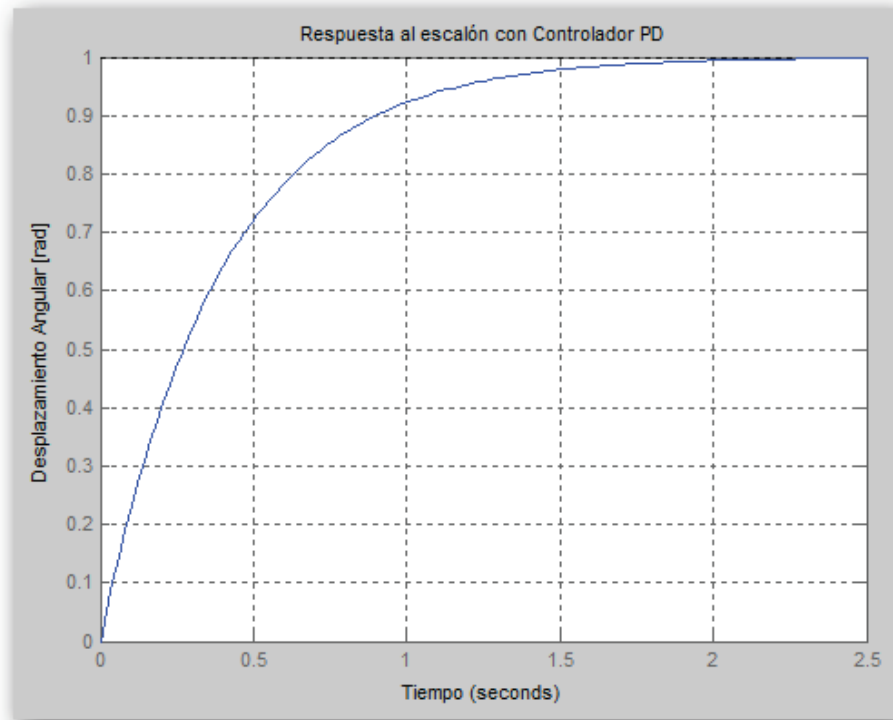


Figura 3.75 Respuesta al escalón del sistema con un controlador PD

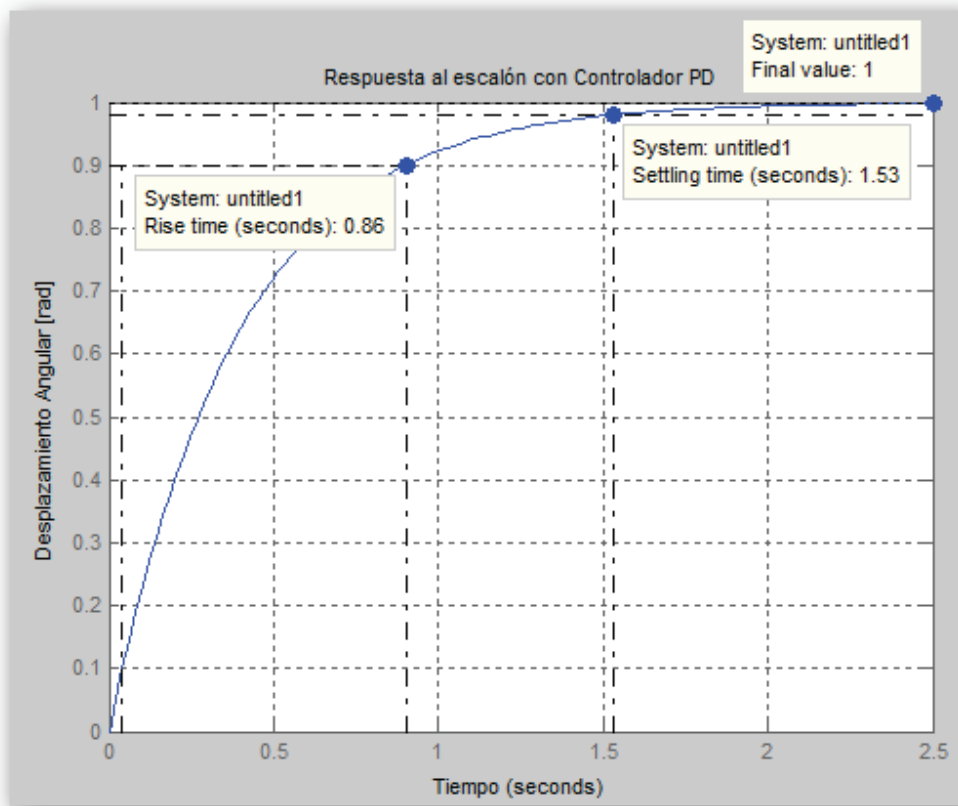


Figura 3.76 Parámetros de desempeño obtenidos del sistema implementado con un controlador PD

Controlador proporcional e integral (PI)⁴¹:

La función de transferencia de un controlador PI está dada por:

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} = \frac{K_p s + K_i}{s} \quad \text{Ecuación 3.57}$$

El controlador tiene un polo en el origen y un cero en el eje real negativo. Escribiendo la función de transferencia como sigue:

$$G_c(s) = \frac{K_i \left(1 + \frac{s}{\omega_0} \right)}{s} \quad \text{Ecuación 3.58}$$

Podemos observar que el cero está localizado en $s = -\omega_0 = -\frac{K_i}{K_p}$. En la figura 3.77 observamos la traza de bode del controlador PI y sus características donde su ganancia de alta frecuencia en magnitud es K_p y $20\log(K_p)$ en decibeles.

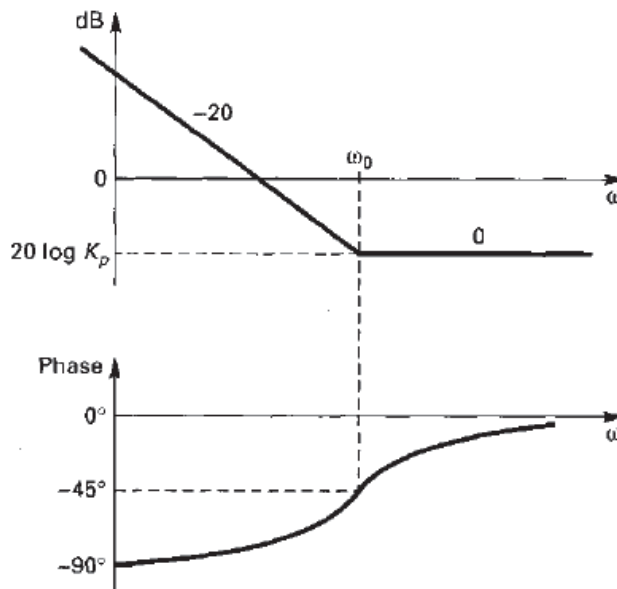


Figura 3.77 Traza de Bode para un controlador PI

⁴¹ (Phillips & Harbor, 1996, págs. 394-395)

Para iniciar el análisis tomamos del controlador P el margen de fase deseado: $\phi_m = 90^\circ$.

Se debe cumplir: $\phi = -180^\circ + \phi_m + \phi_s$, ϕ_s es un parámetro de margen de fase de seguridad y hacemos que $\phi_s = 5^\circ$, entonces:

$$\phi = -85^\circ$$

De la traza de bode de margen de fase del sistema hallamos un $\omega = \omega_1$ que satisfaga el margen de fase ϕ , para luego determinar el margen de ganancia que cumpla con las condiciones mencionadas anteriormente, la figura que sigue ilustra el procedimiento.

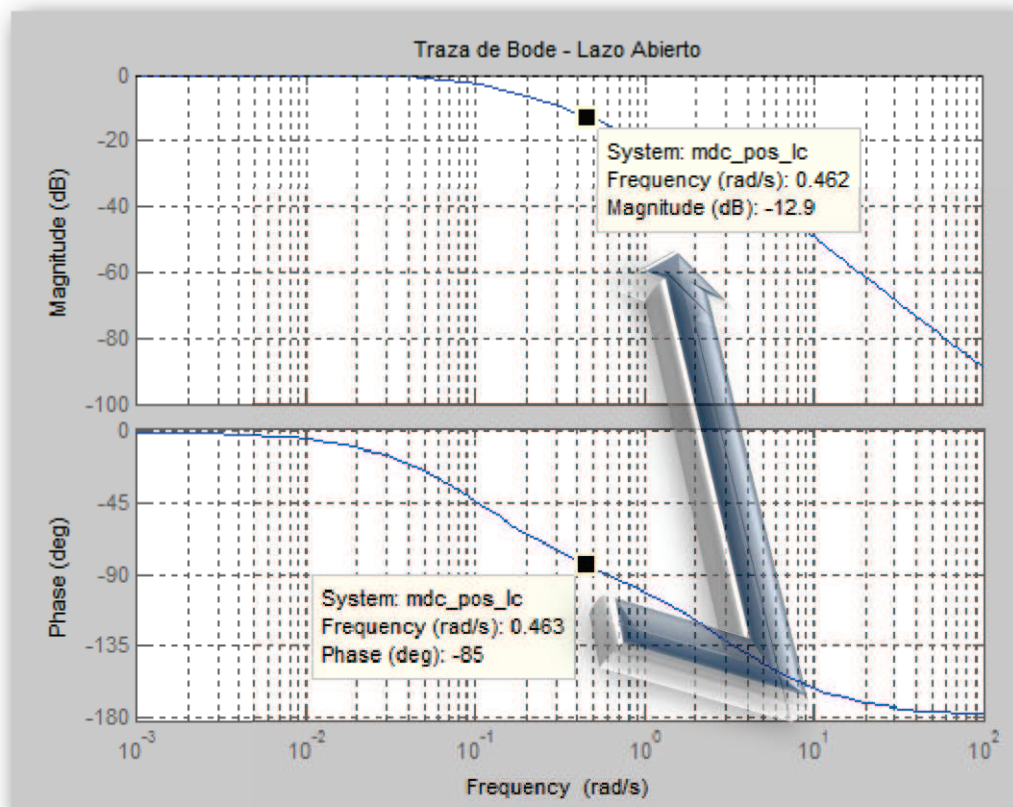


Figura 3.78 Traza de Bode con la búsqueda de parámetros necesarios del control PI.

De la figura 3.78 se puede determinar los siguientes datos:

$$MG(G_p(s)) = -12.9 \text{ [dB]} \text{ y } \omega_1 = 0.463 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$$

Con esto determinamos la ganancia proporcional del controlador como:

$$20\log(K_p) = -MG(G_p(s)) \Rightarrow K_p = 4.416$$

La magnitud del cero está dada por:

$$\omega_0 = \frac{K_i}{K_p} = 0.1\omega_1 \quad \text{Ecuación 3.59}$$

Donde:

$$K_i = 0.1 \cdot \omega_1 \cdot K_p \Rightarrow K_i = 0.204 .$$

Construyendo el controlador PI de la forma presentada en la Ecuación 3.48:

$$G_c(s) = \frac{4.416s + 0.204}{s}$$

Implementando los controladores en el sistema resultan las siguientes respuestas al escalón:

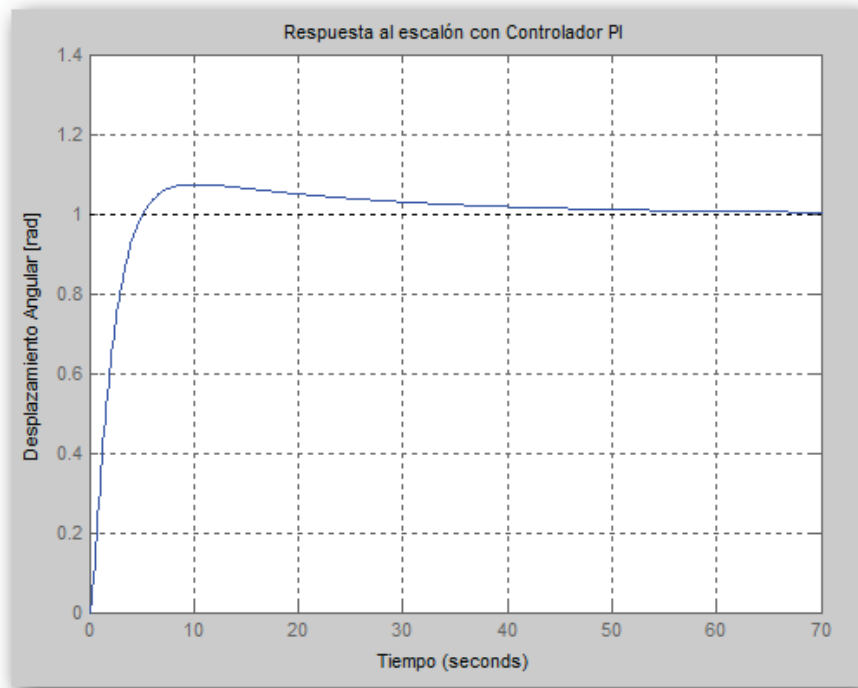


Figura 3.79 Respuesta al escalón del sistema con un controlador PI

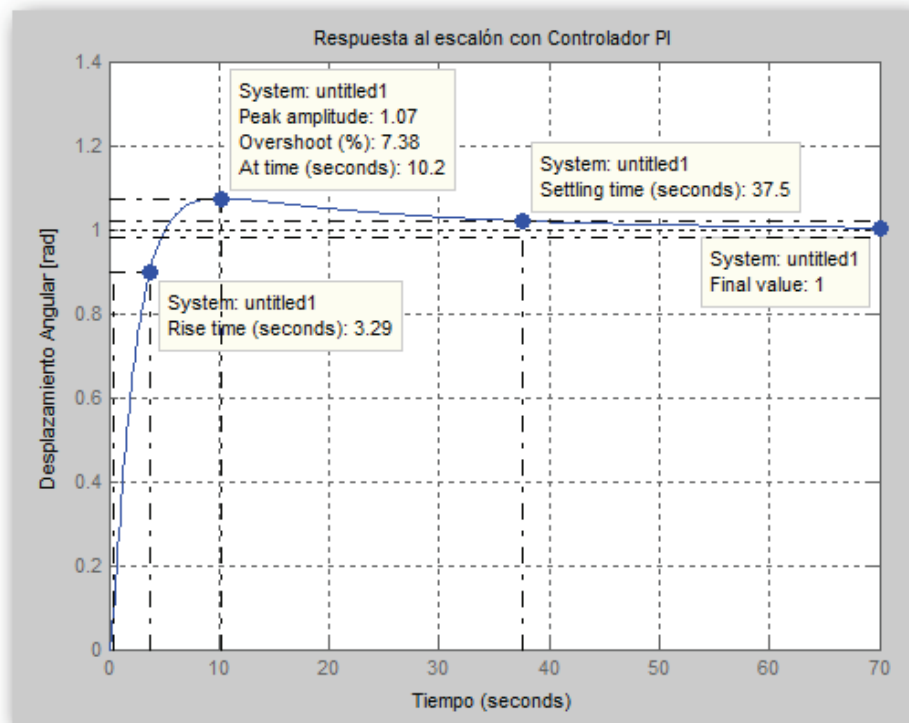


Figura 3.80 Parámetros de desempeño obtenidos del sistema implementado con un controlador PI

Controlador proporcional, integral y derivativo (PID):

La función de transferencia de un controlador PID puede definirse como:

$$G_C(s) = \frac{K_D s^2 + K_P s + K_I}{s} \quad \text{Ecuación 3.60}$$

Del diseño del controlador proporcional tenemos:

$$K_P = 24.28, \theta = 37.731^\circ, \omega_1 = 2.556 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right],$$
$$|G_P(j\omega_1) \cdot H(j\omega_1)| = 0.033$$

Además asumimos del controlador PI: $K_I = 0.204$.

De la Ecuación 3.60:

$$K_D = \frac{\sin \theta}{\omega_1 \cdot |G_P(j\omega_1) \cdot G_H(j\omega_1)|} + \frac{K_I}{\omega_1} \quad \text{Ecuación 3.61}$$

Resolviendo se tiene: $K_D = 7.415$. Para finalizar construimos el controlador según la forma presentada en la Ecuación 3.61:

$$G_C(s) = \frac{7.415s^2 + 24.28s + 0.204}{s}$$

Al modelar el efecto del controlador en el sistema se obtienen las siguientes gráficas de respuesta:

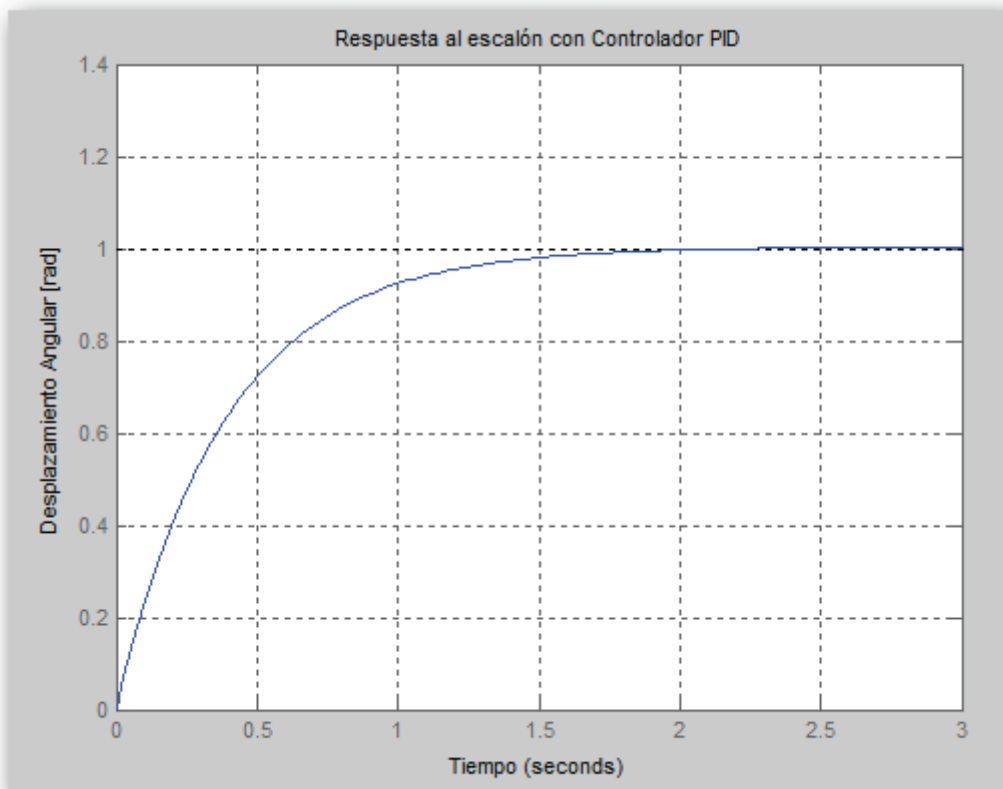


Figura 3.81 Respuesta al escalón del sistema con un controlador PID

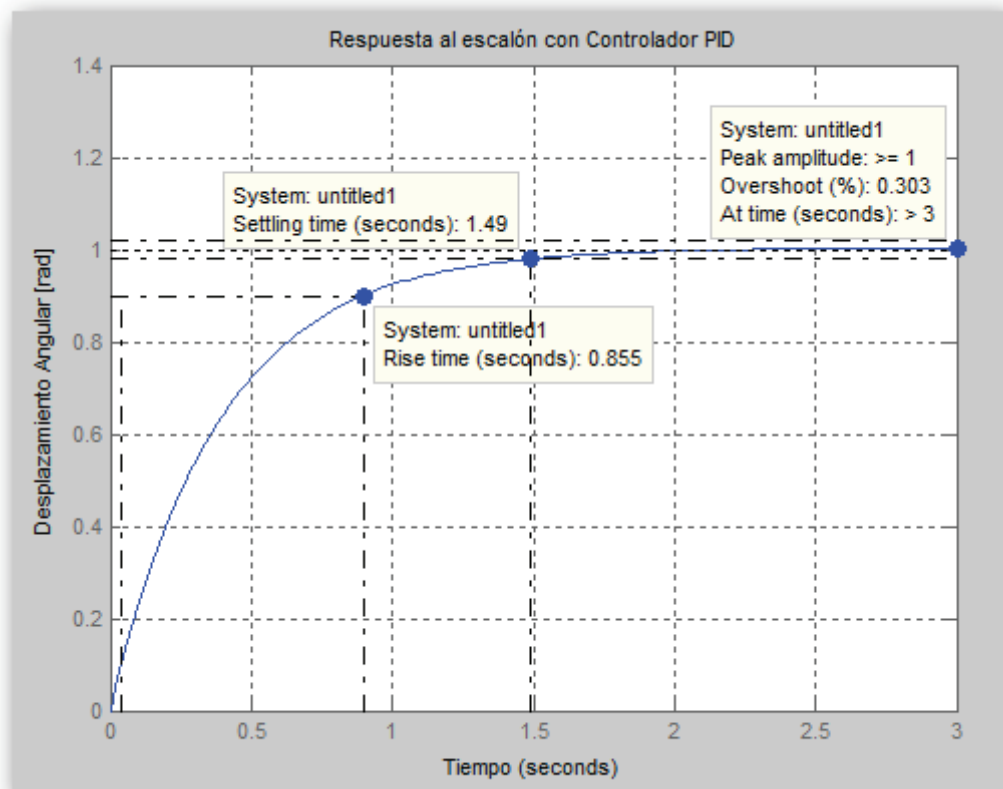


Figura 3.82 Parámetros de desempeño obtenidos del sistema implementado con un controlador PID

Selección del Controlador:

Para elegir el controlador más óptimos construiremos una tabla en la cual consten los parámetros de desempeño obtenidos con cada controlador.

Tabla 3.6 Parámetros de desempeño obtenidos con los controladores PID

	SIN CONTROLADOR	P	PD	PI	PID
t_r [s]	20.1	0.618	0.86	3.29	0.855
t_s [s]	36.2	2.03	1.53	37.5	1.49
M_p [%]	0	11.2	0	7.38	0.303
e_{ss} [rad]	0	0	0	0	0

FUENTE: Propia

Observamos de la tabla anterior que los mejores resultados se obtuvieron con los controladores P, PD y PID. Cualquiera de ellos puede ser implementado pero recomendamos el PID que posee los mejores parámetros de desempeño. En el capítulo 5 se obtendrán las gráficas de la implementación práctica de los controladores en el sistema de transporte.

3.3.2. ETAPA DE COMPACTACIÓN Y ALMACENAMIENTO

La etapa de compactación se encarga de reducir el tamaño de la botella PET identificada y clasificada correctamente a un tercio de su tamaño original para proceder a ubicarla en la cesta incorporada en la cavidad de almacenamiento. El actuador seleccionado en el capítulo 2 utilizado para la presente etapa es un cilindro neumático de doble efecto. El control a realizarse es bastante simple pues se necesita controlar una electroválvula la cual al accionarse permite circular el aire comprimido el cual se activa en un sentido permitiendo compactar la botella PET ubicada en la recámara de compactación. En la siguiente figura se muestran los componentes principales de la presente etapa.

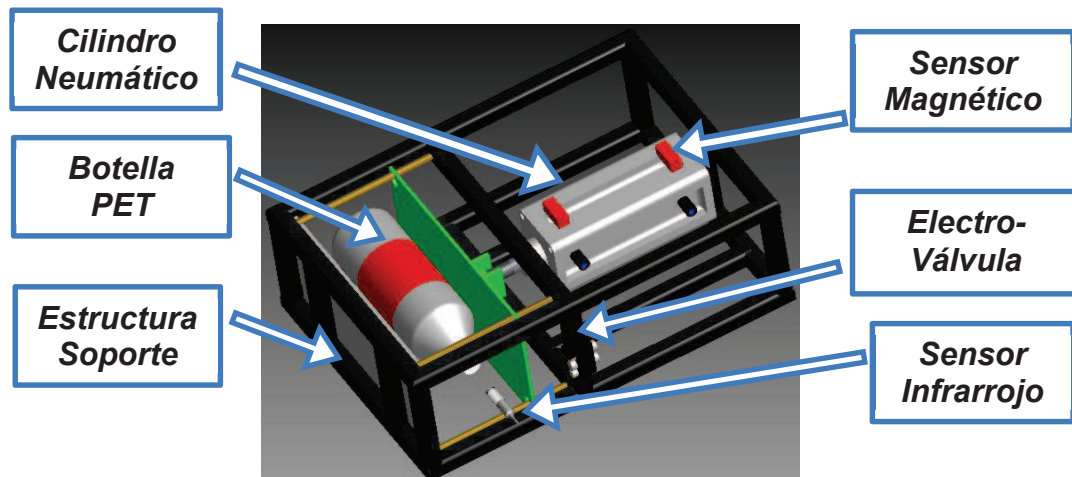


Figura 3.83 Componentes de la Etapa de Compactación y Almacenamiento

El cilindro regresa a su posición inicial cuando la electroválvula se encuentra inactiva. Para garantizar la posición del cilindro ya sea en avance o retroceso son necesarios sensores magnéticos que actúan como interruptores. Éstos interruptores proporcionan al controlador la posición del émbolo imantado del cilindro conociendo así su posición. Dado que sólo se necesita saber dos posiciones son instalados dos sensores magnéticos a la distancia regulada de avance y retroceso del cilindro.

Sin embargo, dado que la acción de compactación no pueda llegar a compactar debidamente la botella PET ingresada y que el descenso de la misma hacia la cesta de almacenamiento no ocurra, es pertinente ubicar un sensor infrarrojo de presencia similar a los detallados para la fase de detección en el sistema de identificación.

Por lo tanto el sensor indicará al dispositivo de control que la cavidad de compactación se encuentra libre de botellas o se encuentra ocupada con un objeto que impida el fácil almacenamiento de la siguiente botella validada. Es así que se establece un controlador ON-OFF para las tres sub-etapas que se deberá verificar con los sensores implementados. A continuación se detalla cada una de las sub-etapas necesarias para realizar una compactación adecuada de la botella ingresada.

- ✓ De verificación de retroceso del cilindro
- ✓ De verificación de avance del cilindro para realizar la compactación.
- ✓ De evacuación completa de la botella compactada.

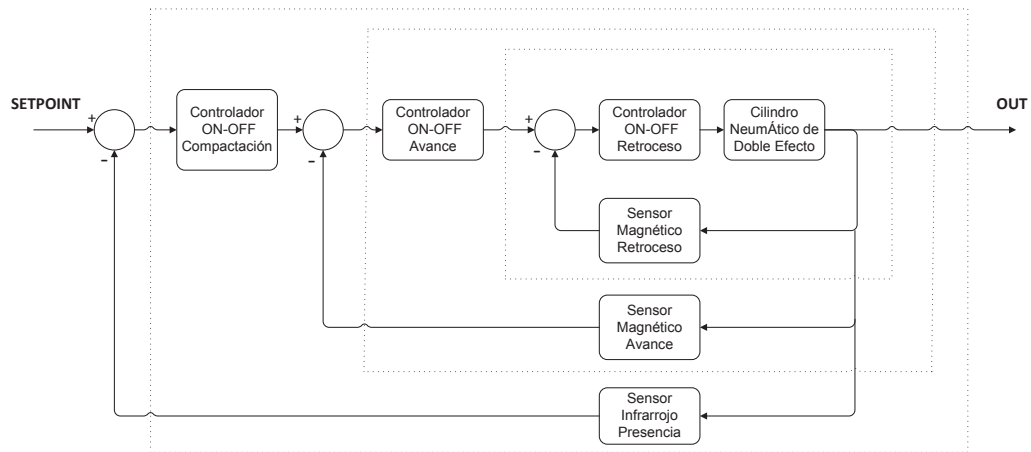


Figura 3.84 Lazos de Control de la Etapa de Compactación y Almacenamiento

Es así que se selecciona un controlador de activación/desactivación del cilindro neumático de tipo ON-OFF controlado por la ubicación de los sensores magnéticos y el sensor infrarrojo los cuales servirán de retroalimentación para cada sub-etapa con su respectivo controlador seleccionado.

3.3.3. ETAPA DEL SISTEMA DE PAGO

Como se detalló anteriormente el sistema de pago será activado por el usuario mediante el accionamiento de un pulsador ubicado en la parte frontal de la RVM una vez que la botella sea identificada, clasificada, compactada y almacenada correctamente. Para ello se implementará un lazo abierto de control con un controlador ON-OFF para emitir la orden desde la tarjeta electrónica de control a la interfaz computacional para proceder con la impresión del ticket que el usuario recibirá a manera de incentivo.

3.4. SELECCIÓN DEL DISPOSITIVO PRINCIPAL DE CONTROL

3.4.1. CRITERIOS DE SELECCIÓN

Para la selección del dispositivo principal de control se establecerán los siguientes criterios:

- ✓ Costo de módulos y accesorios
- ✓ Robustez en base a la aplicación
- ✓ Conectividad con protocolo RS232 y drivers a utilizar
- ✓ Aplicabilidad

Considerando los criterios listados, se pre-seleccionan dos dispositivos de control un controlador lógico programable (en inglés PLC) y un microcontrolador. Las ponderaciones de la siguiente tabla fueron definidas en base a las necesidades de la empresa auspiciante.

Tabla 3.7 Criterios de Selección del Dispositivo de Control

DISPOSITIVO	COSTO (0.35)	ROBUSTEZ (0.25)	CONECTIVIDAD (0.20)	APLICACIÓN (0.20)	TOTAL (1)
PLC	0.15	0.25	0.18	0.15	0.73
Micro-controlador	0.35	0.15	0.20	0.18	0.88

Fuente: SERPRA CÍA. LTDA.

De la tabla proporcionada se puede notar que el criterio en donde existe mayor diferencia entre el PLC y el microcontrolador es el del costo de los módulos y accesorios, dado que un PLC necesita módulos independientes para entradas-salidas digitales o análogas además de los cables de comunicación para la descarga del programa del PLC accesorios que son muy costosos a nivel nacional.

Por otra parte se debe definir la cantidad de entradas y salidas que el dispositivo de control debe manejar para proceder a la selección del microcontrolador. A continuación se establece el número de componentes que actúan como señales de entrada al microcontrolador y de igual manera se determinan las salidas controladas para los procesos.

Tabla 3.8 Señales de Entrada a procesar

ETAPA	SENSOR	TIPO DE SEÑAL	CANTIDAD
Identificación y Clasificación	Infrarrojo	Digital-TTL	2
	Celda de Carga	Analógica-ADC	1
	Cámara de video	Digital (con Procesamiento Externo)	1
	Encoder	Digital-TTL	1
	Final de Carrera	Pulsador-TTL	1
Compactación y Almacenamiento	Magnético	Pulsador-TTL	2
	Infrarrojo	Digital-TTL	1
Sistema de pago	Pulsador	TTL	1
Total de Entradas			10

Fuente: Propia

Tabla 3.9 Señales de Salida a controlar

ETAPA	ACTUADOR	TIPO DE SEÑAL	CANTIDAD
Identificación y Clasificación	Motor DC	Digital-PWM	2
Compactación y Almacenamiento	Electroválvula	Digital-TTL	1
Total de Salidas			3

Fuente: Propia

Una vez establecidas la cantidad de señales de entrada y salida es necesario definir la cantidad de puertos de comunicación a utilizar y la cantidad de objetos de visualización y monitoreo. Se debe toma en cuenta para la siguiente selección de dispositivos adicionales que la RVM dispondrá de indicadores de tipo visual destinados a brindar un aspecto amigable al usuario, para ello se disponen de leds indicadores para la cavidad de aceptación, de rechazo y para el pulsador que el usuario deberá activar al momento que desee imprimir su ticket. Por otra parte se dispone de una pantalla LCD alfanumérica para ayudar al programador a visualizar que etapa del proceso se encuentra en ejecución y para monitoreo de las señales que se necesite adquirir o visualizar el estado en el que se encuentran.

En la siguiente tabla se visualizan la cantidad de dispositivos adicionales o que utilizan pines independientes dedicados a cada función.

Tabla 3.10 Señales Adicionales a utilizar

DISPOSITIVO	FUNCIÓN	TIPO DE SEÑAL	CANTIDAD DE PINES
Puerto Serial-Conector DB9	Comunicación de Datos	Entrada/Salida	2
Leds Indicadores	Visualización Óptica para el usuario	Salida	3
Pantalla LCD	Visualización de Etapas	Salida	6
Pulsador de Reseteo	Reinicia el programa del microcontrolador	Entrada	1
Potenciómetro	Calibración del voltaje de referencia conversión ADC	Entrada ADC	1
Total			13

Fuente: Propia

En la siguiente tabla se presenta a manera de resumen la cantidad total de pines necesarios para seleccionar adecuadamente el microcontrolador a utilizar.

Tabla 3.11 Resumen de cantidad de pines a utilizar

TIPO DE SEÑALES	CANTIDAD DE PINES A UTILIZAR
Entradas	10
Salidas	3
Adicionales	13
Total	26

Fuente: Propia

Considerando la cantidad de pines a utilizar se procede a buscar un microcontrolador con las siguientes características indispensables para ésta aplicación:

- Mínimo 28 pines configurables de entrada/salida.
- Un puerto de conversión análoga a digital (siglas en inglés ADC).
- Mínimo de dos salidas controladas por modulación del ancho de pulso (siglas en inglés PWM).
- Compatible con el protocolo de comunicación Serial Estándar-RS232.
- Mínimo dos interrupciones externas.
- Disponer de una interrupción dedicada a la recepción de datos por el puerto de comunicación serial.

Por lo tanto se selecciona a un microcontrolador de 40 pines como dispositivo principal de control. A continuación se detallan las características principales del microcontrolador ATmega644 de la marca ATMEL las cuales cumplen con las especificaciones requeridas para la presente aplicación.

• Controller Family/Series:	AVR MEGA
• Core Size:	8BIT
• N.º of I/O's:	32
• Program Memory Size:	64 KB
• EEPROM Memory Size:	2KB
• RAM Memory Size:	4KB
• CPU Speed:	20MHZ
• Tipo de oscilador:	exterior, interior
• N.º of Timers:	3
• periféricos:	ADC, RELOJ TIEMPO REAL
• Embedded Interface Type:	(Joint Test Action Group). Grupo de acción de pruebas conjuntas. Puerto de acceso de exploración de límites compatible con la norma IEEE 1149.1 para la verificación de la continuidad de la placa y el diagnóstico de circuitos impresos, (Serial to Parallel Interface). Interfaz serie a paralelo, (Universal Synchronous-Asynchronous Receiver Transmitter). Transmisor/receptor universal síncrono-asíncrono
• N.º of PWM Channels:	6
• Digital IC Case Style:	TQFP
• Supply Voltage Range:	2.7V to 5.5V
• Operating Temperature Range:	-40 °C a +85 °C
• N.º of Pins:	44
• MSL:	MSL 3 - 168 hours
• SVHC:	No SVHC (18-Jun-2012)
• Clock Frequency:	20MHZ
• Marcador:	ATMEGA644P-20AU
• Flash Memory Size:	64KB

Figura 3.85 Características principales del ATMEGA644.

3.4.2. PROGRAMACIÓN

Para la programación del microcontrolador se debe establecer todos los procesos a considerar con sus respectivas entradas y salidas tomando en cuenta a su vez los controladores anteriormente seleccionados los cuales se deben implementar en cada una de las etapas. En la siguiente figura se muestra el resumen de todos los controles a implementar en cada etapa mostrando así el algoritmo final de programación del microcontrolador.



Figura 3.86 Flujo Secuencial de Etapas programadas en el Controlador

Determinadas las etapas y la secuencia a seguir es necesario elaborar un flujograma estructurado y simplificado del funcionamiento del algoritmo de programación tomando además en cuenta la comunicación que existirá entre el estado actual de la etapa y el mensaje de la interfaz que será reproducido. Los parámetros de comunicación a utilizarse serán definidos más adelante en el presente capítulo.

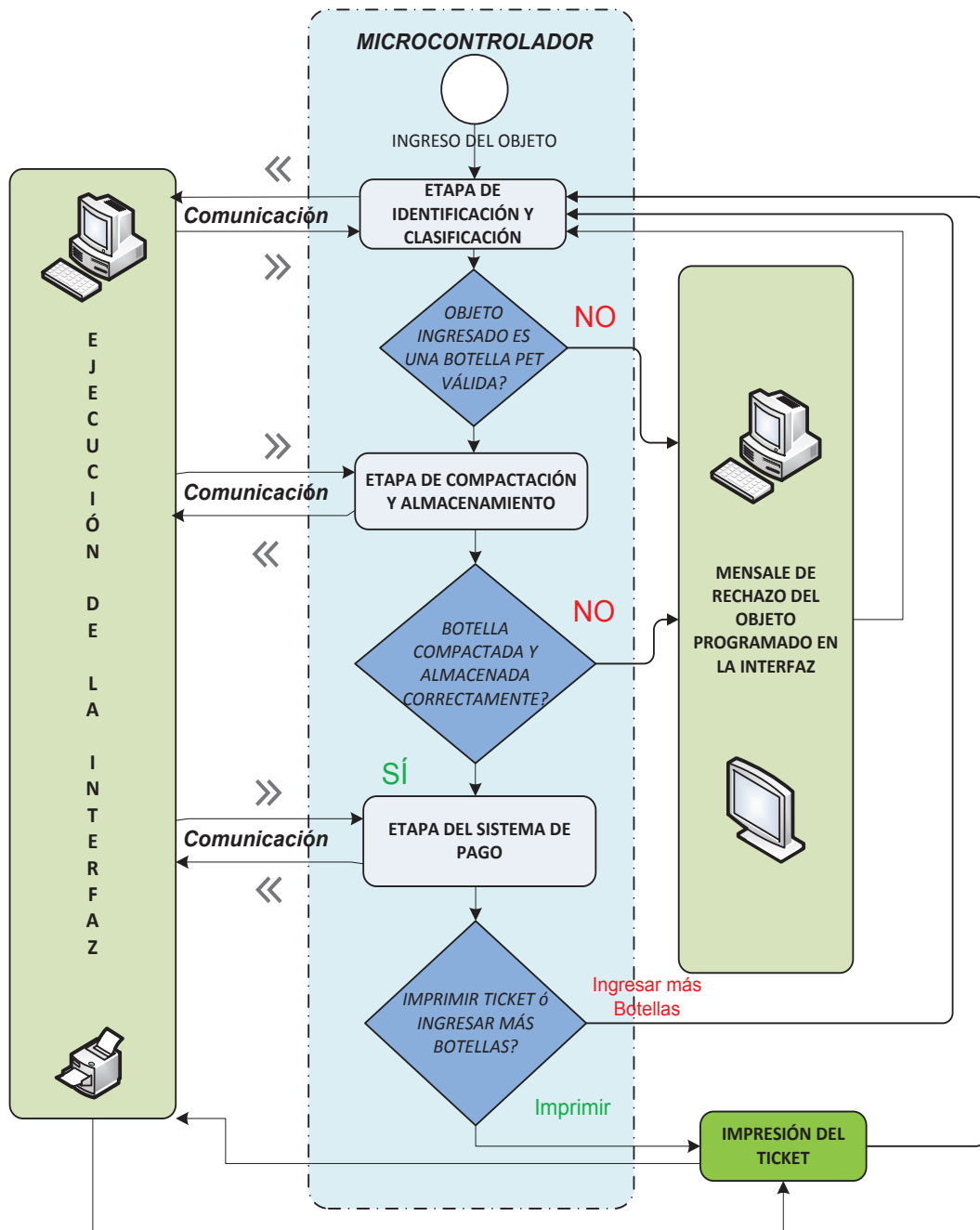


Figura 3.87 Diagrama de Flujo del Algoritmo de Programación

Se debe recalcar que en la etapa del sistema de pago existen dos condiciones posibles las cuales son: activar el pulsador que indica a la tarjeta electrónica que se envíe a la interfaz la orden de impresión del ticket por medio de la impresora instalada en la computadora y que se requiera ingresar más botellas por parte del usuario.

En cualquiera de las dos condiciones se regresa a la etapa de identificación y clasificación. Por último se considera que solamente se puede comenzar la siguiente etapa si existió la comunicación correcta entre el envío del aviso de la etapa por parte del microcontrolador hacia la interfaz la cual responderá al microcontrolador a manera de confirmación para continuar en la siguiente etapa. Sin este intercambio de información de comienzo y culminación de etapas sería imposible coordinar la secuencia de funcionamiento automático de la RVM.

Para la realización de la programación del microcontrolador AVR se selecciona al compilador BASCOM®-AVR ya que la empresa auspiciante posee la licencia corporativa del mismo.



Figura 3.88 Compilador a utilizar para la programación

3.4.3. PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN

Dentro de los múltiples protocolos para la comunicación de datos, se escoge el protocolo de transmisión y recepción de datos RS232 o serial estándar para realizar la conectividad entre la interfaz interactiva y la tarjeta electrónica de control debido a las siguientes razones:

- Fácil configuración de parámetros de comunicación.
- Recepción y envío de datos a velocidades de transmisión variables.
- Universalidad en lectura y escritura de caracteres estándar.
- Comunicación confiable y eficaz en distancias no superiores a 10 metros.
- Se puede enviar y recibir una gran cantidad de información.
- Los microcontroladores disponen de interrupciones dedicadas al envío y recepción de datos cuando se utiliza el protocolo RS232.
- Fácil sintaxis en los lenguajes de programación para llamar a los comandos de lectura y escritura.

Gracias a las razones listadas anteriormente en conjunto con la facilidad que presenta la interfaz interactiva de poder enviar y recibir información mediante la apertura directa de un puerto de comunicación serial, pues justifican la selección del protocolo RS232 como el más apto para realizar la conectividad de los datos.

Dentro los parámetros que se deben configurar para realizar una transmisión de datos utilizando el protocolo serial RS232, se listan y detallan los más relevantes:

- ✓ **Velocidad de Transmisión de datos:** 9600 baudios.
- ✓ **Paridad:** Ninguna.
- ✓ **Cantidad de bits de parada:** 1 bit.
- ✓ **Tamaño de los datos a comunicar:** 8 bits.

3.4.4. SIMULACIONES

Las simulaciones para la visualización de los resultados que arroja la programación se los realiza en el software de simulación y diseño Proteus 7 en la interfaz ISIS. A continuación se muestran las imágenes de cada uno de los bloques implementados para la simulación en conjunto del programa embebido en el microcontrolador seleccionado.

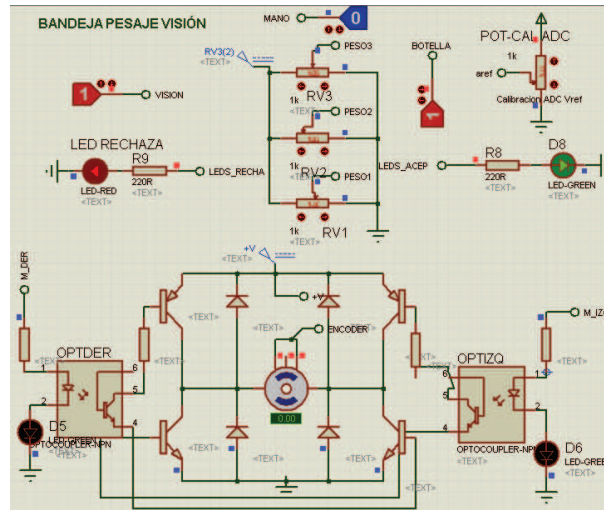


Figura 3.89 Simulación Etapa de Identificación y Clasificación.

En la figura anterior se puede denotar las entradas digitales de los sensores infrarrojos y del valor digital de la identificación de objetos proveniente de la tarjeta de comunicación utilizada para la etapa de identificación con el software Vision Builder AI 2009. Además se muestran las señales de las celdas de carga simuladas con potenciómetros para realizar las mediciones de las señales analógicas que arrojan cada una de ellas.

Finalmente se visualiza el driver del motor de DC con su respectiva señal de encoder con una señal de voltaje controlando la velocidad por modificación del ancho de pulso o PWM a una frecuencia de 15KHz con una resolución de control de 8 bits. Los canales que se utilizan son dos los cuales controlan individualmente el sentido ya sea anti-horario y en sentido horario. Los controladores de posición son independientes para cada uno de los sentidos de giro.

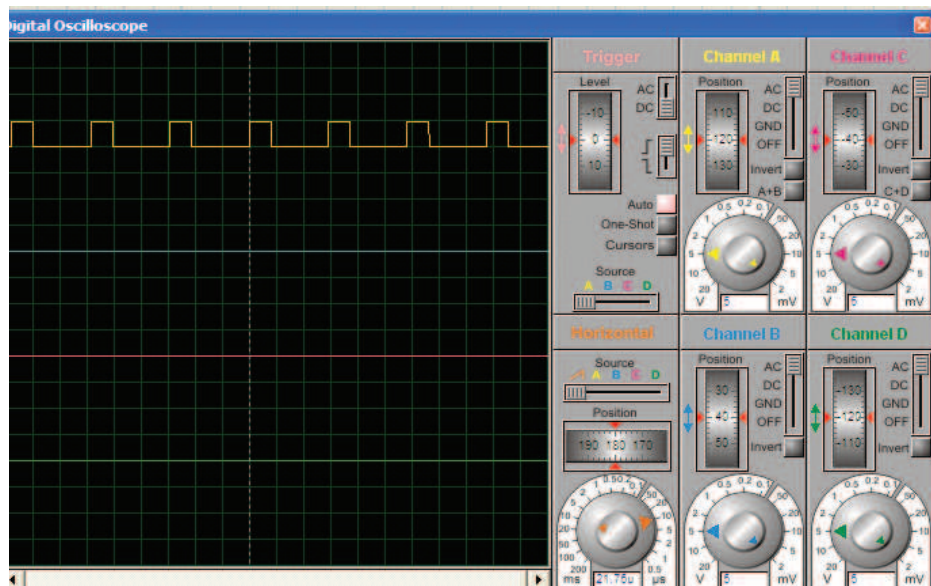


Figura 3.90 Simulación de la señal de control PWM para el motor DC

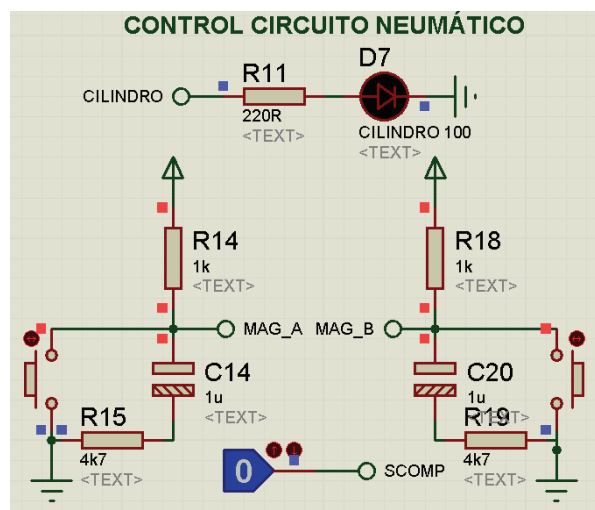


Figura 3.91 Simulación del circuito de control para la Etapa de Compactación y Almacenamiento

Como se puede visualizar en la figura se dispone de dos señales digitales de los sensores magnéticos instalados en la posición de inicio y final de carrera del cilindro el cual se halla simulado como una señal de control digital emulada por un led indicador. Además se destaca la entrada de una señal digital que proporciona el sensor infrarrojo instalado en la cavidad de almacenamiento.

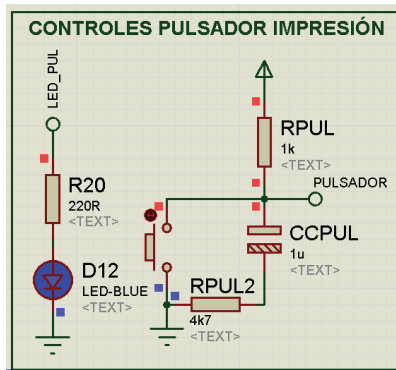


Figura 3.92 Simulación de la Etapa del Sistema de Pago.

Se denota en la figura la utilización de un pulsador normalmente abierto que tiene como objetivo enviar una señal a la interfaz de control principal para proceder a la impresión del ticket emitido como forma de pago en la RVM. Se dispone además de un led indicador el cual sirve de notificación que la impresión se la puede realizar al momento que las etapas de identificación, clasificación y almacenamiento han sido completadas con éxito.

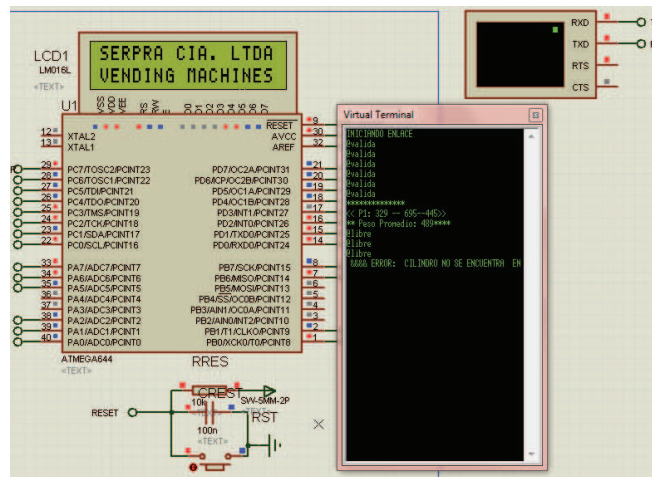


Figura 3.93 Simulación de la Visualización de Mensajes y Comunicación de datos a través del Terminal Virtual Serial.

La visualización de los mensajes y estados del proceso de automatización de la RVM se la puede visualizar mediante una pantalla LCD alfanumérica 16x2 y por medio de la interfaz de simulación del protocolo RS232 incorporada en el simulador ISIS de la suite Proteus 7 la cual permite enviar y recibir los datos que posteriormente se comunicarán con la interfaz principal detallada en el capítulo 4.

3.5. SELECCIÓN DE FUENTES DE ALIMENTACIÓN ELÉCTRICA

Dado que el sistema de control implementado en la tarjeta electrónica basa su funcionamiento en un microcontrolador que utiliza corriente continua o DC, se utiliza una fuente rectificadora de corriente. Para ello a continuación se detalla el consume energético total de los principales componentes utilizados en la RVM.

3.5.1. DETERMINACIÓN DE CONSUMO ENERGÉTICO

Para la determinación del consumo se considera lo siguiente:

Tabla 3.12 Consumo Energético de los dispositivos utilizados

ETAPA	DISPOSITIVO (Voltaje de Alimentación)	CANTIDAD	CONSUMO INDIVIDUAL [mA]	CONSUMO TOTAL [mA]
Identificación y Transporte	Sensor Infrarrojo (12V)	2	30	60
	Celda de Carga (12V)	1	50	50
	Motor DC (12V)	1	1000	1000
	Encoder Incremental (5V)	1	120	120
	Final de Carrera (5V)	1	50	50
Compactación y Almacenamiento	Sensor Magnético (5V)	2	10	20
	Electroválvula (12V)	1	250	250
	Sensor Infrarrojo (12V)	1	30	30
Sistema de pago	Pulsador (5V)	1	10	10
	Impresora Térmica Zebra (24V)	1	2500	2500
Varios	Pantalla LCD (5V)	1	200	200
	Pantalla TFT de 8 pulgadas (12V)	1	2000	2000
	Leds indicadores (5V)	14	10	140
	Microcontrolador (5V)	1	0.4	0.4
	Elementos (semiconductores, resistivos y capacitores) varios	1	500	500

Fuente: Propia

Por lo tanto se necesita una fuente rectificadora de al menos 115W con voltajes independientes de salida en corriente continua de los siguientes valores: 5V/12V/24V. Por consiguiente se selecciona la siguiente fuente rectificadora de voltaje de con las siguientes características:

Tabla 3.13 Características Requeridas para la Selección de la Fuente de Poder

CARACTERÍSTICA	DESCRIPCIÓN
Voltaje de Entrada	110VAC/60Hz
Voltajes de Salida	5VDC / 12VDC / 24VDC
Tipo de Fuente	Switching con bajo Voltaje de rizo
Amperaje a suministrar a 5V	3 A
Amperaje a suministrar a 12V	1.5 A
Amperaje a suministrar a 24V	2.5 A
Protecciones	Sobretensiones/Cortocircuitos
Peso	No superior
Otros	Calibración nivel voltaje 5VDC

Fuente: Propia

En base a las características requeridas para la aplicación se selecciona una fuente Switching del catálogo de productos de la empresa HUAI-Electronics tomando en cuenta la siguiente tabla de los modelos disponibles en las serie P15.

Tabla 3.14 Características Fuentes Switching WEI-YA Serie P15

Contenido del producto:
<ul style="list-style-type: none"> • Dimensiones (L * W * H): 188 * 130 * 54 (mm) • Tamaño del embalaje (L * W * H): 410 * 410 * 305 (mm) • Peso: 740g (P15D), 670g (OTROS) / Taiwán • 18.8KGS (P15D) 17.0KGS (OTROS) / 24 unidades / caja depende del modelo seleccionado, no son tres o cuatro tensión de salida, potencia de salida máxima • 100 ~ 200W • Bajo costo, alta confiabilidad • Alta eficiencia • Protección contra sobretensiones • Protección de sobrecorriente • Bajo rizado y ruido • La baja temperatura de trabajo • La luz verde indica que el voltaje en el rango de +5 V ~ 5.3V • La luz roja indica que la tensión supera el rango de +5 V ~ 5,3 V (rojo / verde)

Modelo	Especificación			Seguridad	RoHS (Opcional)
	AC de entrada	DC entrada	SSR		
P15C	110/220V ~	+5 V 15A / +12 V 2.5A 1A /-5V		CE CUL	•
P15C1	110/220V ~	+5 V 15A / +12 V 1A 4A /-5V		CE	
P15CA	110/220V ~	9A +5 V / +12 V 2A / +24 V 1.5A		CE	
P15CA1	110/220V ~	9A +5 V / +12 V 4A / +24 V 1.5A		CE	•
P15CB	110/220V ~	9A +5 V / +12 V 4A /-5V 1A			
P15CF	110/220V ~	+5 V 20A / +12 V 5A /-5V 2A (FAN)		CE	
P15CF1	110/220V ~	+5 V 15A / +12 V 1A 4A /-12V			
P15CF2	110/220V ~	9A +5 V / +12 V 6A / 12V-1A			
P15CG2	110/220V ~	+5 V 15A / +12 V 8A / +24 V 5A			•
P15CG3	110/220V ~	+5 V 15A / +12 V 8A / +24 V 5A (FAN)			•
P15D	110/220V ~	+5 V 4A / +12 V 2A / +24 V 2A / +48 V 1.8A		CE	•
P15D1	110/220V ~	9A +5 V / +12 V 4A / +24 V 1.5A /-5V 1A			
P15D3	110/220V ~	+5 V 1-5A / +12 V 4A / +24 V 2A / +36 V 1A			

Fuente: Catálogo en línea productos WEI-YA Huai Yi Electronics⁴²

Por lo tanto el modelo P15CG2 cumple con las especificaciones requeridas para la aplicación además de poseer la certificación RoHS. A continuación se muestra en la siguiente figura el modelo de fuente seleccionada. Para mayor información acerca de las especificaciones y dimensiones del modelo seleccionado favor referirse al Anexo 8.

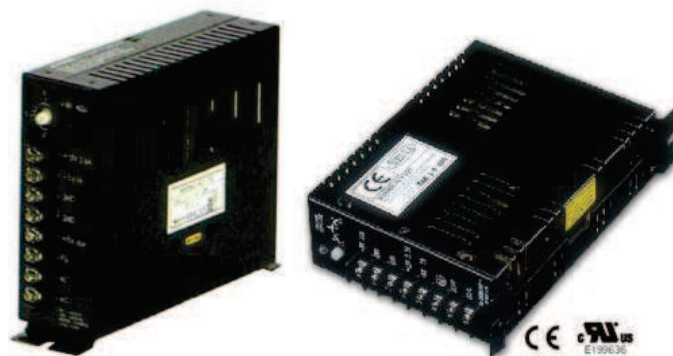


Figura 3.94 Fuente Switching WEI-YA Modelo P15CG2

⁴² (Huai Electronics Corporation, 2010)

3.6. DISEÑO DE CIRCUITOS IMPRESOS

3.6.1. CONSIDERACIONES DE DISEÑO DE PCBs

Una vez realizados los diagramas eléctricos con los componentes a utilizar en cada una de las etapas, se procede a realizar las simulaciones respectivas para verificar su correcto funcionamiento depurando así ciertas fallas o emulando las condiciones normales de operación. Un diagrama electrónico esquemático puede ser parecido al mostrado en la siguiente figura.

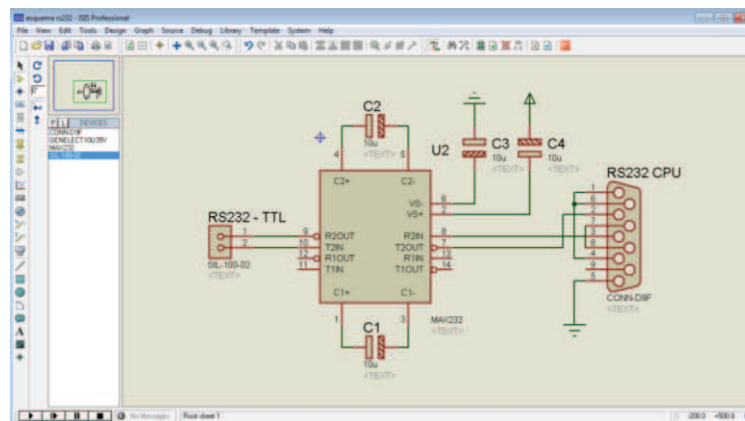


Figura 3.95 Diagrama Esquemático del circuito convertidor de RS232 Estándar a RS232 TTL diseñado en ISIS Professional-Proteus

Posteriormente se procede a realizar el diagrama físico de los componentes electrónicos para realizar la imagen física de las conexiones eléctricas que posteriormente formaran el PCB. Algunas de las consideraciones técnicas, que el desarrollador debe tener en cuenta al momento de diseñar un circuito impreso, pueden ser las siguientes:

- Ancho de pistas conductoras en función de la corriente.
- Disposición física geométrica de los componentes en el PCB.
- Tamaño y orientación de la placa electrónica.
- Espaciamiento mínimo y máximo entre componentes y pistas contiguas.
- Número de capas constitutivas del PCB.
- Ubicación de planos de tierra.
- Posicionamiento de agujeros referenciales y de sujeción.

Una de las normas más importantes que guían a los diseñadores es la norma IPC-2221⁴³, la cual detalla, entre otras consideraciones a tomar en cuenta, que los elementos de empaquetados similares deben tener la misma orientación física en la placa. A continuación se muestra una tabla de consideraciones para la fabricación de PCBs.

Tabla 3.15 Consideraciones de fabricación.

Consideraciones para la Fabricación de los Diseños	Bueno, Malo. <u>Consecuencias por no seguir las consideraciones, Otros</u>
Relación Agujero-Área de perforación: El área de perforación debe ser por lo menos 0.6mm mas grande que el tamaño de la broca que se utilizara para hacer el agujero	Provee un área suficiente para evitar posibles cortes, fisuras o que al momento de hacer el hueco, éste ocasione que no exista lugar donde soldar. <i>Ocupa mas espacio en la placa.</i>
Agregar una gota al camino de cobre	Provee un área suficiente para evitar posibles cortes y fisuras debidas a vibraciones o calentamiento. <i>Ocupa mas espacio en la placa.</i>
Espesor de la Placa: 0.8mm a 2.4mm son valores típicos en el cobre	<i>Al no seguir esta recomendación puede ocurrir que los elementos a soldar no sean lo suficientemente largos como para atravesar la placa para ser soldados.</i>
Relación entre el espesor de la placa y el diámetro del agujero: Preferible < 5:1	Al ser mas pequeños los agujeros se garantiza no romper o fisura la superficie de la placa además de que resultan ser uniformes al momento de perforar.
Simetría del espesor de la placa	<i>Puede ocasionar que la placa tienda a pandearse o arquearse.</i>
Tamaño de la Placa	Mientras más pequeña es mas difícil que se arquee o pandee. <i>No se podría levantar un esquema de la placa por el reducido tamaño cuando se las utiliza en paneles grandes con componentes pequeños.</i> <i>El tamaño determina el costo.</i>
Espacios entre líneas conductoras: >=0.1mm	<i>Puede ocasionar que el liquido acido que remueve el cobre no pueda quitar el cobre entre los caminos muy pegados ocasionando que estos queden unidos.</i>
Espesor de líneas conductoras: >=0.1mm	<i>Espesores más pequeños que estos puede ocasionar el rompimiento de los mismos al ser expuestos al proceso de remoción de cobre.</i>

Fuente: Traducción Tabla 5.1 Norma IPC 2221⁴⁴

Finalmente el diseñador debe considerar las condiciones de manufactura con las medidas de la placa escogida para evitar costos adicionales de espacio

⁴³ (IPC D-275-Task Group, 1998)

⁴⁴ (IPC D-275-Task Group, 1998)

físico en donde se la va a realizar o el tamaño y características físicas y técnicas de los equipos a utilizar.

3.6.2. ESQUEMAS PCB FINALES

Los esquemas de los circuitos impresos (PCB siglas del inglés *Printed Circuit Board*) se las realiza en el software de diseño ARES® de la suite Proteus 7® en base a las simulaciones utilizadas en el proceso de programación. Los esquemas PCB finales y sus vistas 3D digitalizadas se las muestra a continuación las cuales han sido diseñadas tomando en cuenta las consideraciones establecidas en la norma anteriormente citada en la sección anterior.

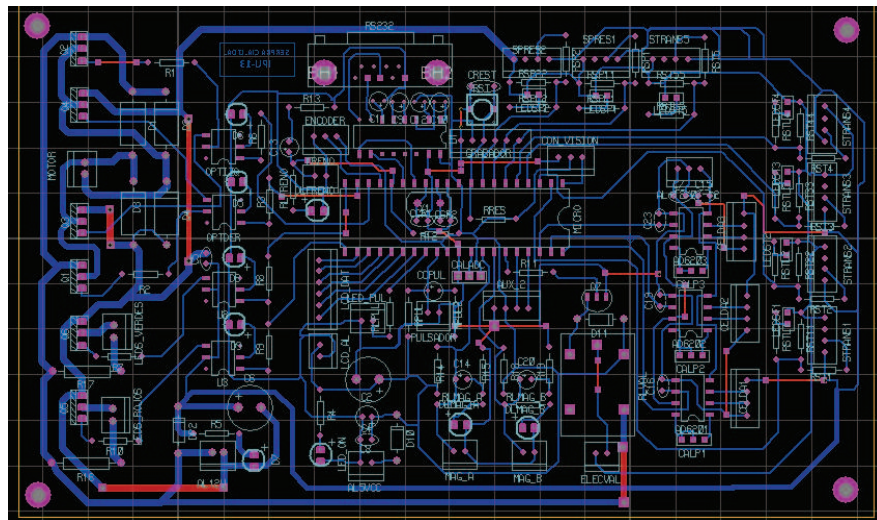


Figura 3.96 Diseño Esquemático de la Tarjeta de Control.

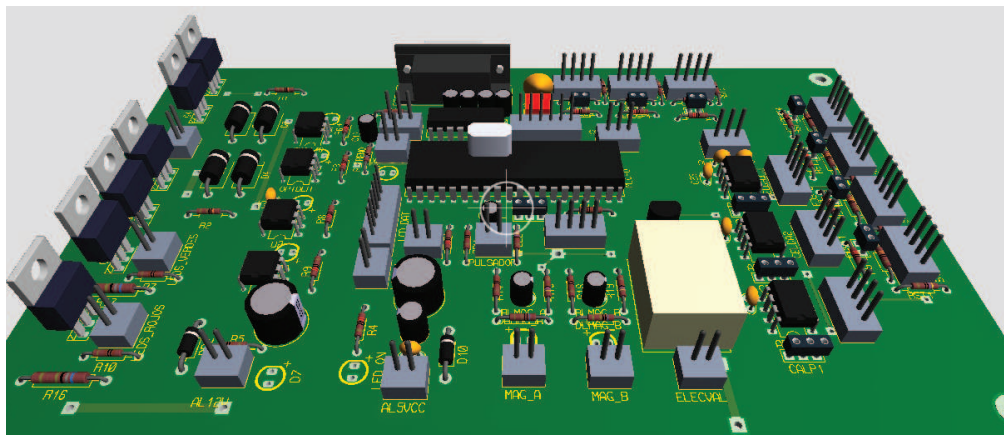


Figura 3.97 Visualización 3D del diseño de la Tarjeta de Control.

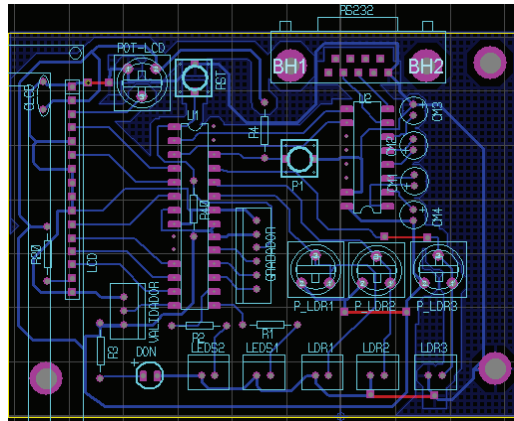


Figura 3.98 Diseño Esquemático de la Tarjeta de Comunicación con el software *Vision Builder*® AI 2009.

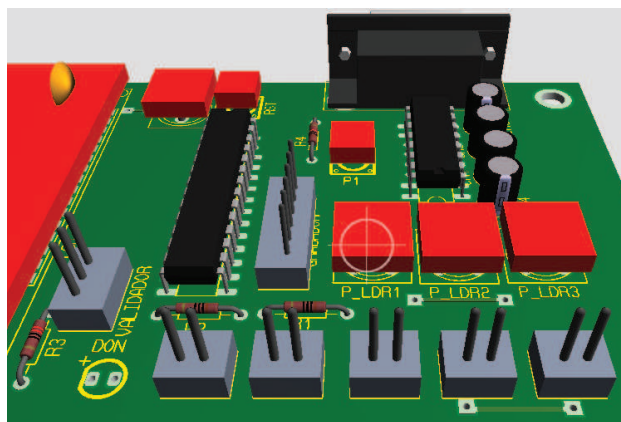


Figura 3.99 Visualización 3D de la Tarjeta de Comunicación con el software *Vision Builder*® AI 2009.

CAPITULO IV

4. DESARROLLO DE INTERFAZ COMPUTACIONAL

En el presente capítulo se desarrollará la interfaz computacional y de monitoreo de la máquina vending inversa. Se establecerá el diseño conceptual de la misma y se determinarán los componentes principales. Se establecerán los lazos de control de entrada y salida con el dispositivo embebido de control desarrollado en el capítulo anterior.

Posteriormente se determinará el lenguaje más adecuado para el desarrollo de la interfaz y el sistema operativo que se utilizará para la ejecución del programa.

A continuación se realizarán la programación en código fuente del mismo considerando los formatos de audio y video a utilizar. Se definirán los protocolos de control con la máquina y se realizará las pruebas de funcionamiento de la misma.

Por último se identificarán las características de la inicialización de la máquina para determinar ciertos problemas de arranque de la aplicación y proceder a una correcta depuración de los mismos para un óptimo funcionamiento.

4.1. DISEÑO CONCEPTUAL

4.1.1. REQUERIMIENTOS DE LA INTERFAZ

Los requerimientos con los que deberá contar la interfaz computacional se derivan de las etapas anteriormente detalladas en el capítulo anterior para que éstas sirvan de guía y enlace en el desarrollo de la misma para que pueda brindar las siguientes prestaciones:

- ✓ Deberá contar con imágenes animadas que garanticen una fácil y adecuada utilización de la máquina.
- ✓ Dispondrá de comandos de audio en español e inglés en el caso de que el usuario sea una persona visualmente discapacitada.
- ✓ Servirá como un enlace eficaz entre la tarjeta principal de control y la ejecución de los diferentes pasos y etapas del proceso de aceptación, compactación, almacenamiento y sistema de pago.
- ✓ Deberá brindar al programador un entorno visual fácil de manipular y cambiar en el caso que se necesite cambiar los mensajes visuales o animaciones presentadas.

- ✓ El tamaño de las ilustraciones, gráficos y videos mostrados deberán tener una resolución de por lo menos 600dpi y ser proyectados en una pantalla LCD de mínimo 8 pulgadas.
- ✓ Contará con la conectividad adecuada y el uso de dispositivos periféricos como impresoras térmicas o matriciales.
- ✓ Garantizar un funcionamiento adecuado optimizando el tiempo de uso de la máquina.
- ✓ Deberá arrancar la aplicación programada sin incurrir a accesos por teclado o mouse auxiliares.
- ✓ Facilitar puertos de conexión de audio, video, y por lo menos 4 puertos USB.

4.1.1.1. Componentes Principales

Para cumplir con los requerimientos anteriormente mencionados se ve la necesidad de utilizar un computador que posea los siguientes componentes:

- MainBoard
- Procesador
- Disco Duro
- Memoria Ram
- Fuente de Poder
- Puertos periféricos audio, video, USB.

4.1.1.2. Lazos de Programación

Una vez determinados los requerimientos de la interfaz y sus componentes principales, se deben establecer los ciclos o bucles de programación. A continuación se muestran los lazos principales del algoritmo a implementar en el desarrollo de la aplicación.

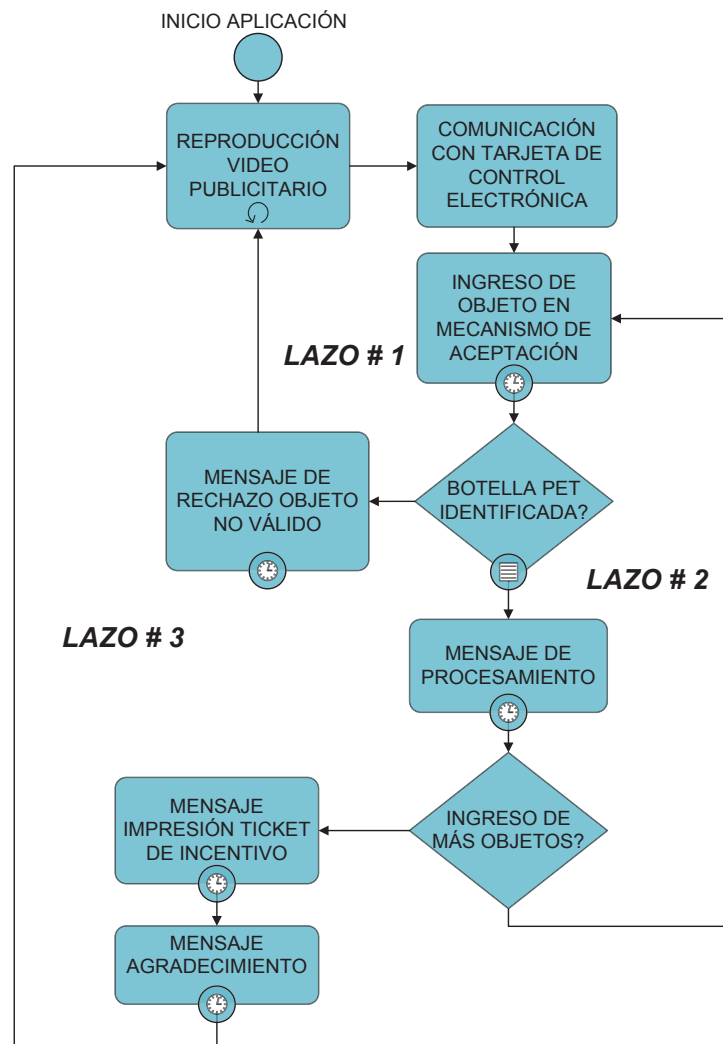


Figura 4.1 Lazos de programación

Cabe recalcar que se puede generar lazos alternativos resultantes de alguna de las combinaciones de los tres lazos principales indicados en la figura anterior. Por otra parte, se resalta en cada uno de los procesos, tareas y decisiones que poseen un tiempo de ejecución dada la característica de reproducción continua del bucle de reproducción del video publicitario inicial.

En detalle los tiempos de cada ciclo se determinarán en base al tiempo que demore cada una de las etapas definidas en el capítulo anterior dadas por las condiciones de identificación, aceptación y compactación las cuales serán controladas por la tarjeta electrónica de control.

4.1.1.3. Selección de dispositivos adicionales

Determinadas las etapas y lazos de programación es importante tomar en cuenta los dispositivos que se necesitarán utilizar para llevar a cabo las diferentes funciones de comunicación e interacción que existirá entre la tarjeta electrónica de control y la interfaz.

A continuación se listan los dispositivos adicionales a utilizar con una breve descripción.

- **Elementos de un ordenador de escritorio:** Como lo son el mainboard, el disco duro, la fuente de poder, la memoria RAM, la tarjeta de audio y video y puertos periféricos como los más destacados para lograr ejecutar la aplicación de la RVM en un determinado sistema operativo
- **Cable Conversor USB-RS232:** Este tipo de cable transforma el protocolo universal de comunicación serial (Universal Serial Bus) a una comunicación serial estándar (RS232) sirviendo así como el medio físico de conexión y transmisión de datos entre la interfaz principal de la RVM y la tarjeta electrónica de control.
- **Impresora Térmica:** Este tipo de impresora posee la característica de realizar la impresión de caracteres, imágenes y texto mediante la impregnación térmica que facilita el resalte de los mismos en un tipo especial de papel con sensibilidad al efecto de incremento de temperatura. La conexión y la instalación de los drivers del modelo seleccionado ZEBRA® TTP 2231 se la realizará como cualquier otro tipo de impresora conectada a un puerto USB del computador.
- **Pantalla TFT:** Las pantallas TFT son utilizadas en aplicaciones que necesitan ser instaladas en espacios reducidos. Un ejemplo de estas pantallas son las que se utilizan en reproductores de video de automóviles. Comercialmente se las encuentra en diferentes tamaños

4.2. ANÁLISIS DE ENTORNOS DE PROGRAMACIÓN

4.2.1. SELECCIÓN DEL LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN

Tomando en cuenta la preselección realizada en el capítulo 1 en la tabla 1.9 acerca de la selección de posibles soluciones para el desarrollo de la interfaz computacional se destacaron dos lenguajes de programación actuales que se listan a continuación.

- Programación en *Java NetBeans*[®].
- Programación en *Visual Basic*[®] 2010 Express.

Ambos compiladores son completamente compatibles con el sistema operativo a utilizar (Microsoft Windows XP[®]), sin embargo la suite de programación de *Visual Basic*[®] 2010 Express desarrollada por Microsoft posee librerías y vínculos directos a ciertas herramientas propias de Windows XP[®] como el reproductor de video y la opción de envío directo a la bandeja de impresión de la impresora predeterminada y no requieren la instalación adicional de paquetes descargados de internet como complementos en el caso de Java para el sistema operativo escogido. Por estas razones se escoge como compilador de interfaz a la suite *Visual Basic*[®] 2010 Express para realizar la implementación de la misma.

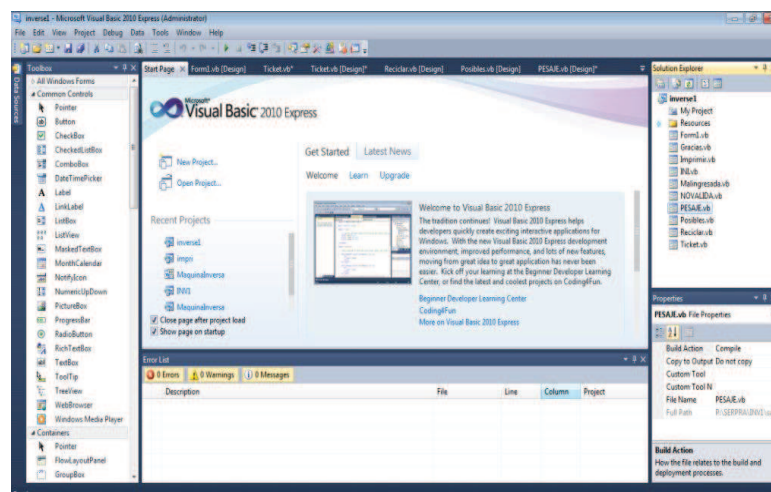


Figura 4.2 Ventana Principal del Compilador utilizado⁴⁵

⁴⁵ (Microsoft Corporation, 2010)

4.2.2. DISEÑO DEL ENTORNO DE LA INTERFAZ

4.2.2.1. Determinación de componentes de audio y video

Los componentes principales de la interfaz son los siguientes:

- ✓ Pantallas con indicaciones de uso e imágenes del estado de la máquina.
- ✓ Video promocional o corporativo de la empresa cuando la máquina se encuentre en estado inactivo o stand-by.
- ✓ Proceso secundario de conectividad con la tarjeta electrónica de control de la RVM
- ✓ Instrucciones auditivas en inglés y español acerca del uso de la máquina y el estado operativo de la misma.

4.3. DESARROLLO Y PROGRAMACIÓN

El desarrollo de la programación se basa en pantallas interactivas las cuales se abren y cierran cuando un determinado proceso termina o inicia. Por otra parte el compilador utilizado brinda ciertas herramientas de programación a continuación listadas las cuales permiten crear una aplicación sistemática y con diferentes servicios como por ejemplo el de reproducción de video y la opción de impresión de documentos que sirve para expender el ticket de incentivo que la RVM entrega al cliente si es que el objeto ingresado es una botella PET válida.

4.3.1. HERRAMIENTAS DE PROGRAMACIÓN UTILIZADAS

Las herramientas utilizadas para el desarrollo de la programación del programa de la interfaz son las siguientes:

- **Temporizadores o Timers:** Permiten dedicar un tiempo específico en la ejecución del programa para realizar una acción determinada o esperar

dentro de un bucle de programación la recepción de alguna variable enviada desde la tarjeta electrónica de control. El elemento Timer se lo encuentra en el Toolbox en la sección de Componentes.



Figura 4.3 Herramienta Timer o Temporizador de Eventos⁴⁶.

- **Herramientas de Ejecución de Video:** Permiten cargar un determinado archivo de video para la reproducción del mismo en un espacio establecido de pantalla. La herramienta de reproducción de video se la encuentra en el Toolbox en la sección de Controles Comunes.



Figura 4.4 Herramienta de reproducción de video⁴⁷.

- **Barras de progreso:** Son elementos visuales que indican el estado de ejecución de un proceso para que pueda tener una idea clara del tiempo que se necesita esperar para que se concluya una determinada tarea. La barra de progreso se la encuentra en el Toolbox en la sección de Controles Comunes.



Figura 4.5 Barra de progreso de tareas⁴⁸.

- **Elementos visibles y no visibles:** Como por ejemplo texto o imágenes que se ocultan o aparecen solamente en un instante determinado al pasar de ventana o tarea. A continuación se muestra los íconos de las herramientas de etiquetas y de imágenes para ser mostradas activando las propiedades de visualización de cada una de ellas las cuales se encuentran ubicadas en el Toolbox en la sección de Controles Comunes.

⁴⁶ (Microsoft Corporation, 2010)

⁴⁷ (Microsoft Corporation, 2010)

⁴⁸ (Microsoft Corporation, 2010)



Figura 4.6 Herramientas de etiquetas y texto e imágenes⁴⁹.

- **Herramienta de Comunicación Serial:** Permite enviar y recibir datos tipo String (cadena de caracteres) mediante el protocolo de comunicación RS232 utilizando un puerto físico o emulado dedicado para este tipo de comunicación de datos. Para ello se debe configurar la velocidad de transmisión de datos y otros parámetros como paridad y bits de parada propios de éste tipo de comunicación. Dicha herramienta se la encuentra en la sección de Componentes del Toolbox.



Figura 4.7 Herramienta de Comunicación Serial⁵⁰.

- **Función de Impresión:** Ésta herramienta permite imprimir el contenido de una pantalla la cual puede contener texto o imágenes enviando directamente el documento a la bandeja de impresión de la impresora predeterminada de Windows. Se puede encontrar la herramienta de impresión en la sección de impresión en el Toolbox.

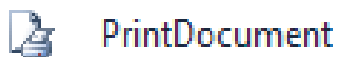


Figura 4.8 Herramienta de impresión⁵¹.

Dichas herramientas en conjunto con las sentencias de control propias de la sintaxis del compilador utilizado brindan todos los componentes que el programador necesita para el desarrollo de la interfaz visual que se ejecutará en función de un algoritmo del programa establecido que la RVM utilizará para llevar a cabo tareas específicas según el proceso que deba realizar en base a las condiciones de control y variables que se transmiten mediante la comunicación con la tarjeta electrónica de control.

⁴⁹ (Microsoft Corporation, 2010)

⁵⁰ (Microsoft Corporation, 2010)

⁵¹ (Microsoft Corporation, 2010)

4.3.2. PROGRAMACIÓN DE LA INTERFAZ

Una vez conocidas las herramientas a utilizar en el compilador Visual Studio® Express se procede a determinar el diagrama de flujo de la interfaz. El diagrama de flujo permite al programador diseñar los diferentes parámetros y condiciones en las cuales las pantallas aparecerán o desaparecerán de la pantalla de reproducción para que el usuario pueda comprender claramente las instrucciones visuales y auditivas de los diferentes procesos llevados a cabo por la RVM. El flujograma de la programación de la interfaz gráfica es el siguiente:

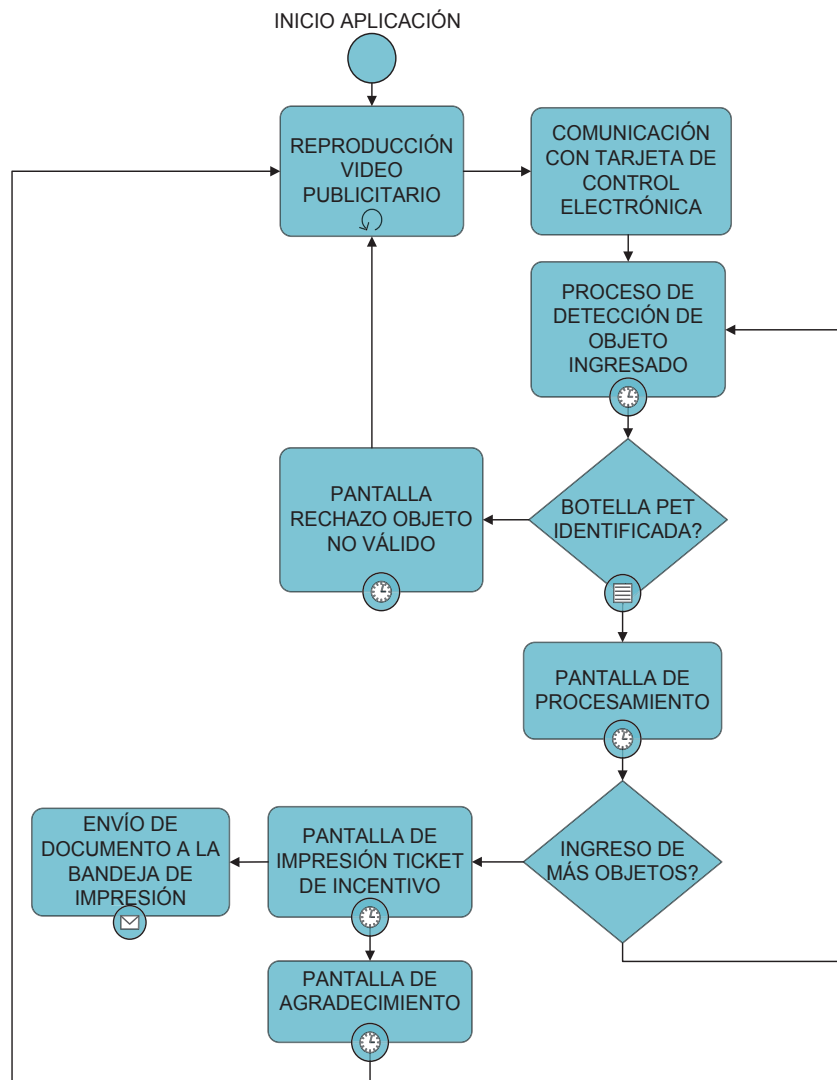


Figura 4.9 Diagrama de Flujo de la Interfaz Visual.

Para entender secuencialmente las etapas del algoritmo de programación antes mencionado, se visualizará bloque por bloque las capturas de pantallas de cada uno de ellos indicando además las herramientas de programación detalladas en la Sección 4.3.1.

REPRODUCCIÓN VIDEO PUBLICITARIO: En este bloque de programación se proyecta la publicidad de la RVM en forma secuencial. Para ello se reproduce un video que se visualiza hasta que algún objeto sea ingresado en la cavidad de identificación.

De igual manera se envía una variable la cual es procesada en la tarjeta electrónica para identificar la secuencia del proceso en el que se encuentra la interfaz. Se utilizan las herramientas de reproducción de video, comunicación RS232 y temporizadores en esta pantalla.



Figura 4.10 Reproducción del Video Publicitario

DETECCIÓN DE OBJETO INGRESADO E IDENTIFICACIÓN: En este bloque de programación los sensores de presencia instalados en la cavidad de identificación detectan que un objeto ha sido ingresado para su posterior análisis de forma y su respectivo pesaje. De igual manera se envía una variable la cual es procesada en la tarjeta electrónica para identificar la secuencia del proceso en el que se encuentra la interfaz.

Si el objeto no fue validado la barra de progreso tendrá un tiempo específico de espera para la respuesta de validación o rechazo proveniente del análisis de forma y peso. Si la tarjeta de control no envía una señal de validación o rechazo, se procede a mostrar de nuevo el video publicitario. En

esta etapa se utilizan las herramientas de reproducción de audio, visualización de imágenes, comunicación RS232, temporizadores y una barra de progreso.



Figura 4.11 Proceso de Detección del Objeto Ingresado

IMPRESIÓN DE TICKET O INGRESO DE OBJETOS: En esta secuencia de programación se establece un flujo de decisión determinada por la acción del usuario. Una de las opciones es que el usuario ingrese más objetos los cuales son detectados por los sensores de presencia instalados en la cavidad de identificación para su posterior análisis de forma y su respectivo pesaje, mientras que si el usuario decide presionar el pulsador instalado en la parte frontal para la impresión la interfaz acciona la secuencia de impresión de la cantidad de botellas recicladas.

De igual manera se envía una variable la cual es procesada en la tarjeta electrónica para identificar la secuencia del proceso en el que se encuentra la interfaz. Si el usuario no realiza ninguna de las dos acciones de impresión o ingreso de más objetos en un intervalo de tiempo de 10 segundos se procede a mostrar de nuevo el video publicitario. En esta etapa se utilizan las herramientas de reproducción de audio, visualización de imágenes, comunicación RS232, temporizadores y una barra de progreso.

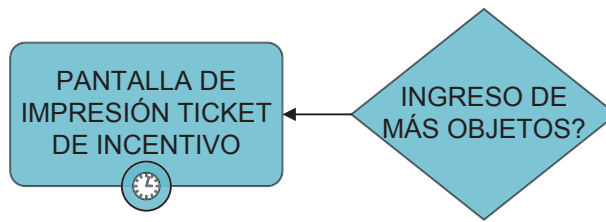


Figura 4.12 Impresión de Ticket o Ingreso de Objetos

IMPRESIÓN DE TICKET: En ésta etapa la interfaz envía a la cola de impresión de la impresora predeterminada el documento definido a ser impreso. La información que se imprime en el ticket contiene la cantidad de botellas recicladas correctamente, la hora y la fecha actual del sistema y logos de publicidad autorizados. En esta etapa se utilizan las herramientas de impresión de documentos, visualización de imágenes y temporización.



Figura 4.13 Impresión de Ticket

PANTALLA DE AGRADECIMIENTO: En ésta etapa la interfaz muestra un mensaje de agradecimiento visualizada en un tiempo determinado para posteriormente proceder a la reproducción del video publicitario. En esta etapa se utiliza la herramienta de temporización y visualización de imágenes.



Figura 4.14 Pantalla de Agradecimiento

OBJETO MAL INGRESADO O NO VÁLIDO: En este bloque de programación los sensores de presencia instalados en la cavidad de identificación detectan que un objeto ha sido ingresado de forma incorrecta o si es que existe la presencia de objetos interfiriendo la tolva de ingreso como puede ser la presencia de la mano del usuario.

Por otra parte si el análisis de forma y pesaje del objeto ingresado resultó como no válido se visualizará la pantalla de rechazo de objetos. De igual manera se envía una variable la cual es procesada en la tarjeta electrónica para identificar la secuencia del proceso en el que se encuentra la interfaz. Transcurrido un tiempo determinado se procede a visualizar el video publicitario. En esta etapa se utilizan las herramientas de reproducción de audio, visualización de imágenes, comunicación RS232, temporizadores y una barra de progreso.



Figura 4.15 Pantallas de Rechazo de Objetos

4.3.3. FORMATOS DE AUDIO, VIDEO E IMÁGENES

Los formatos de imágenes que se visualizarán en las pantallas de la interfaz que son soportados por el compilador utilizando la herramienta PictureBox del Toolbox se listan a continuación:

- Gif.
- Jpg.
- Jpeg.
- Bmp.
- Wmf .
- Png.

Entre los múltiples formatos de audio y video que son válidos para ser reproducidos con la herramienta de Windows Media Player soportados por el compilador se destacan los más conocidos:

- Mp4.
- Wav.
- Mpeg.

- Avi.
- Wmv.
- Wma.
- Mov.

Para la reproducción del video publicitario se utiliza el formato *.wmv por la buena capacidad de compresión y por la alta calidad de video. Por otra parte, las instrucciones de utilización de la RVM en idioma inglés y español poseen un formato de audio *.wav.

4.3.4. PROTOCOLOS Y CONECTIVIDAD CON DISPOSITIVOS DE CONTROL

Dado que la interfaz desarrollada necesita ser reproducida de inmediato una vez concluidas las tareas de arranque del sistema operativo, se necesita que todos los dispositivos auxiliares a ser utilizados por la RVM sean cargados completamente y estén enlazados con la interfaz de manera óptima y efectiva. Al iniciar el proceso de carga de la interfaz comienza la reproducción del video publicitario, de las instrucciones de utilización de la máquina y al mismo tiempo se ejecuta un proceso secundario de comunicación con la tarjeta electrónica de control. Por lo tanto todos los dispositivos auxiliares necesitan exitosamente enlazados con la interfaz principal para evitar errores de acceso a las librerías controladoras de los mismos. Los dispositivos auxiliares que la RVM dispone para la ejecución de tareas adicionales son los siguientes:

- Impresora Térmica.
- Cable conversor USB-RS232.
- Tarjeta de Audio y Video
- Pantalla TFT.

4.3.4.1. Conectividad y enlace con dispositivos periféricos auxiliares

A continuación se detalla las librerías y los métodos de instalación de los drivers y controladores de los dispositivos auxiliares a utilizar respectivamente.

Impresora térmica: La conectividad con éste tipo de impresora se la realiza mediante un puerto USB de la computadora. Para que la impresora sea enlazada correctamente por la herramienta de impresión del compilador es necesario instalar los drivers y librerías controladoras de la misma en el sistema operativo. Para la presente aplicación se utiliza la impresora térmica adquirida por la empresa auspiciante de la marca Zebra con conexión USB modelo es el KR203 para dimensiones de papel de 58 a 80mm.



Figura 4.16 Impresora Térmica⁵²

Cable Conversor USB-RS232: Dado que los modelos actuales de mainboard de computador actuales ya no poseen el conector estándar DB9 para la conexión a dispositivos que utilicen el protocolo RS232, se utiliza un cable conversor de protocolo conectado a un puerto USB estándar el cual en su otro extremo posee el conector DB9 macho que sirve para la comunicación con la tarjeta electrónica de control mediante el protocolo de comunicación serial antes mencionado. La instalación de los controladores del cable conversor de protocolo se la realiza utilizando los programas incluidos en el CD de instalación del mismo. Para la presente aplicación se utiliza el cable conversor de la marca TrendNet.

⁵² (Zebra Technologies, 2011)



Figura 4.17 Cable Conversor USB-Serial⁵³.

Tarjeta de Audio y Video: Tarjeta incorporada en el mainboard del computador de la RVM que se encarga de reproducir los archivos de audio y video llamados por la interfaz según el proceso que se ejecute proporcionando al usuario las respectivas instrucciones de uso de la RVM o a su vez el video publicitario de la misma.

Pantalla TFT: De igual forma que con la tarjeta de audio, las librerías de Windows® que se encargan de reproducir las imágenes y video compilados en la interfaz mediante el puerto de salida de video VGA a la pantalla TFT seleccionada.

CAPÍTULO V

En el presente capítulo se realiza un resumen de las todas las pruebas realizadas en cada una de las etapas y sus respectivos resultados. Las pruebas y resultados arrojados serán indicados mediante fotografías reales tomadas en la RVM implementada o capturas de pantalla en cada uno de los diferentes procesos. Posteriormente se determinan los factores que ocasionan desperfectos o resultados inesperados en el proceso de automatización implementado. El presente capítulo será la base para determinar la funcionalidad del prototipo además de arrojar las conclusiones y

⁵³ (TRENDnet, 2012)

recomendaciones a seguir para futuros desarrollos de modelos similares de máquinas vending inversas.

5. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO Y RESULTADOS

Las pruebas y resultados del funcionamiento del prototipo de RVM han sido divididas en cada una de sus etapas, teniendo así:

- Pruebas y resultados de la etapa de identificación y transporte.
- Pruebas y resultados de la etapa de compactación y almacenamiento.
- Pruebas y resultados de la etapa del sistema de pago.

5.1. PRUEBAS Y RESULTADOS DE LA ETAPA DE IDENTIFICACIÓN Y TRANSPORTE

Para la realización de pruebas y la obtención de resultados encontrados en la etapa de identificación y transporte se ha dividido dicha sección en los sistemas y subsistemas clasificados en el capítulo 3 para un mejor entendimiento. De esta forma se detallan los resultados obtenidos en el sistema de identificación (Subsistema de Detección de Objetos, Subsistema de Pesaje y Subsistema de Validación de Forma) y en el sistema de transporte.

5.1.1. SISTEMA DE IDENTIFICACIÓN

El sistema de identificación es el sistema más determinante de la RVM dado que la mayoría de sensores utilizados se encuentran incorporados en él. Por lo tanto los resultados de cada una de las pruebas realizadas se las detallarán separándolos en cada uno de las fases a continuación listadas:

- Fase de Detección de Objetos.
- Fase de Pesaje.
- Fase de Validación de Forma.

5.1.1.1. Fase De Detección De Objetos

En la presente fase se encuentran incorporados los dos sensores infrarrojos para verificar la presencia de objetos ingresados en la cavidad de identificación para ser procesados posteriormente. En la siguiente figura se puede visualizar claramente la disposición de los sensores infrarrojos OPTEX CRD-300P utilizados.

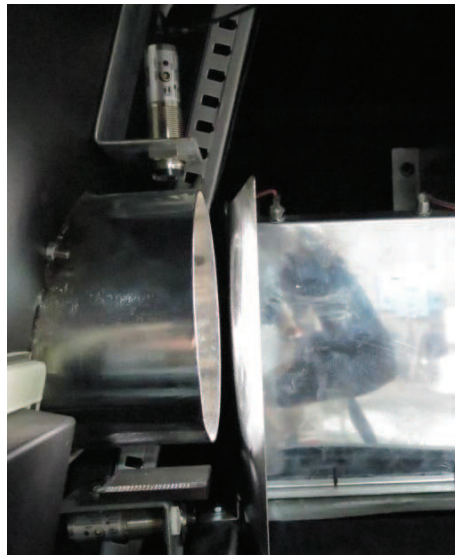


Figura 5.1 Disposición de Sensores Infrarrojos en Tolva de Ingreso

Los resultados obtenidos para la disposición de los sensores mostrada anteriormente se visualizan en las siguientes imágenes.



Figura 5.2 Condición de Detección de Interferencia en la Tolva de Ingreso

En la figura anterior se muestra la condición en la que un objeto, en este caso la mano del usuario, interfiere la señal emitida por el sensor infrarrojo superior detectando así la presencia de un obstáculo el cual impide el funcionamiento correcto de las siguientes fases y etapas. En la condición indicada no se procede a realizar ninguna acción de control salvaguardando así seguridad del usuario y garantizando una detección adecuada del objeto ingresado.

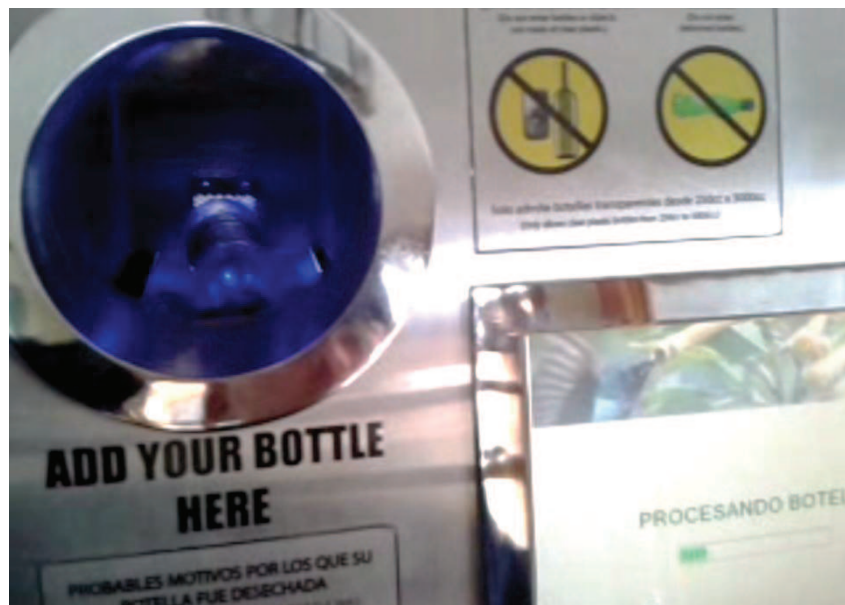


Figura 5.3 Condición de Detección de Presencia de Objeto Ingresado Correctamente


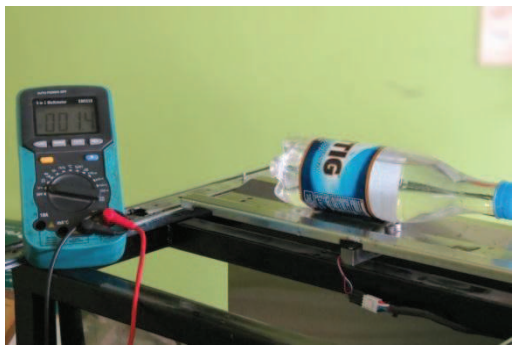

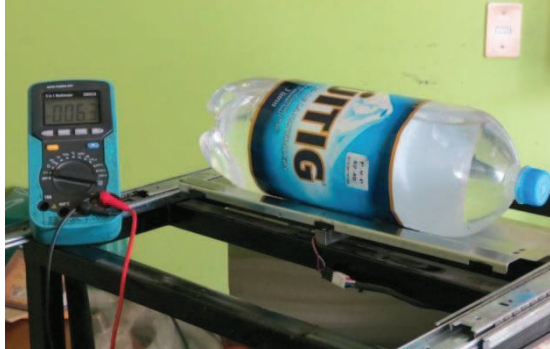
En la condición anterior, se ilustra claramente que el objeto ingresado, en este caso una botella PET vacía, ha sido ingresado y que no existe ningún objeto que obstaculice la entrada a la cavidad de identificación. Dado éste caso se procederá a continuar con los siguientes pasos para la identificación del objeto ingresado.

5.1.1.2. Fase de Pesaje

La fase de pesaje consta principalmente de una celda de carga acondicionada con un amplificador operacional de instrumentación, las

imágenes de las mediciones realizadas con y sin acondicionamiento se muestran a continuación tomando como muestras para el pesaje dos botellas PET vacías de la marca Coca-Cola® (una de 500cm³ y otra de 3000cm³) y dos ejemplares de la marca Güitig (una de 500cm³ y otra de 3000cm³) llenos de agua. Además se muestran las mediciones tomadas en un multímetro digital claramente visualizadas en su pantalla LCD.

Tabla 5.1 Pruebas de la Fase de Pesaje sin Acondicionamiento de Señal

PRUEBAS SIN ACONDICIONAMIENTO	
TIPO DE PRUEBA: Sin Acondicionamiento de Señal	Instrumento de Medición: Multímetro Digital E-Sun EM5510
BOTELLAS VACÍAS	BOTELLAS LLENAS DE LÍQUIDO
	
Valor Medido: 0.5 mV	Valor Medido: 1.4 mV
	
Valor Medido: 0.5 mV	Valor Medido: 6.3 mV
<p>Observaciones: Las mediciones fueron realizadas en la bandeja destinada al pesaje de las botellas la cual, para esta prueba, se encuentra fuera de la estructura de la máquina para una mejor visualización. La celda de carga utilizada se encuentra en una configuración física de voladizo sin aplicar ningún tipo de filtraje o amplificación de señal.</p>	

Fuente: Propia

Tabla 5.2 Pruebas de la Fase de Pesaje con Acondicionamiento de Señal

PRUEBAS CON ACONDICIONAMIENTO	
TIPO DE PRUEBA: Con Acondicionamiento de Señal	Instrumento de Medición: Multímetro Digital E-Sun EM5510
BOTELLAS VACÍAS	BOTELLAS LLENAS DE LÍQUIDO
	
Valor Medido: 259.1 mV	Valor Medido: 306.7 mV
	
Valor Medido: 261.3 mV	Valor Medido: 545 mV
<p>Observaciones: Las mediciones fueron realizadas en la bandeja destinada al pesaje de las botellas la cual, para esta prueba, se encuentra ubicada dentro de la estructura de la máquina. La celda de carga utilizada se encuentra en una configuración física de voladizo cuya señal está acondicionada mediante un amplificador operacional en configuración diferencial incorporado en la tarjeta electrónica de control. Las mediciones de voltaje son tomadas directamente en el pin de entrada de la señal de voltaje del canal ADC del microcontrolador utilizado.</p>	

Fuente: Propia

Tabla 5.3 Resultados de la Fase de Pesaje Con y Sin Acondicionamiento de Señal

BOTELLA	TIPO DE PRUEBA	ACONDICIONAMIENTO	MEDICIÓN [mV]
Coca Cola 500cm ³	Vacía	Ninguno	0.5
Coca Cola 500cm ³	Vacía	Amplificador Operacional	259.1
Güitig 500cm ³	Llena de Agua	Ninguno	1.4
Güitig 500cm ³	Llena de Agua	Amplificador Operacional	306.7
Coca Cola 3000cm ³	Vacía	Ninguno	0.5
Coca Cola 3000cm ³	Vacía	Amplificador Operacional	261.3
Güitig 3000cm ³	Llena de Agua	Ninguno	6.3
Güitig 3000cm ³	Llena de Agua	Amplificador Operacional	545

Fuente: Propia

Los valores de la señal arrojada por la celda de carga debidamente acondicionados son ingresados a un canal de conversión analógica a digital en el microcontrolador seleccionado en el capítulo 3, el cual analiza la medición en los rangos definidos para el pesaje de los objetos ingresados a ser validados correctamente los cuales muestran una tendencia lineal incremental en función del volumen del envase. La resolución utilizada en el microcontrolador es de 10 bits tomando un voltaje de referencia de 300mV, por lo tanto se tiene que la resolución utilizada para la conversión es:

$$Resolución = \frac{Volt\ Ref.}{2^{\# Bits}} = \frac{300[mV]}{1024 [bits]} = 0.29 \left[\frac{mV}{bit} \right] \quad \text{Ecuación 5.1}$$

Por lo tanto el rango en bits leídos por el microcontrolador entre un envase vacío de 500cm³ y uno de 3000cm³ es de utilizando los valores anteriormente mencionados para el voltaje de referencia y la cantidad de bits es:

$$\text{Rango de Lectura} = \frac{V_{Bot\ 3000} - V_{Bot\ 500}}{\text{Resolución.}} = \frac{(261.3 - 259.1)[mV]}{0.29 \left[\frac{mV}{bit} \right]} = 7.6 \text{ bits}$$

Dicho rango se utilizará para la medición de pesaje a nivel digital dentro de la programación del microcontrolador en el caso de los envases vacíos. Para los valores de objetos pesados o botellas PET llenas de líquido las variaciones serán descartadas automáticamente pues exceden el rango de voltaje de referencia como se indica en la tabla de resultados.

5.1.1.3. Fase de Validación de Forma

Para la realización de la verificación de forma, cabe recalcar que se utilizó el software de inspección automática *Vision Builder*® AI 2009 de National Instruments® en su versión de prueba de 30 días. Los resultados arrojados al utilizar el procesamiento de imágenes detallado en el flujograma de la Sección 3.2.2.3 son los siguientes:

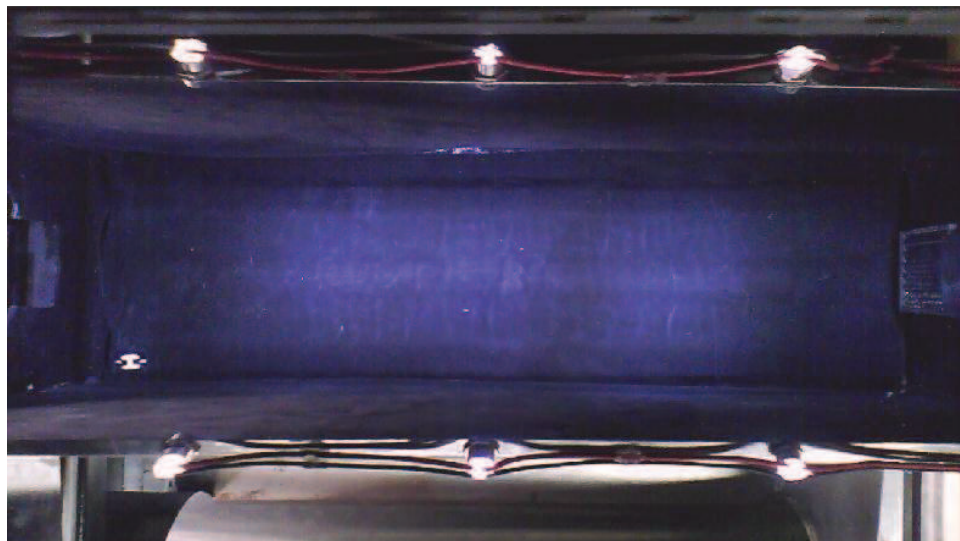


Figura 5.4 Imagen a Color de la Bandeja de Identificación Vacía sin ningún tipo de Filtraje

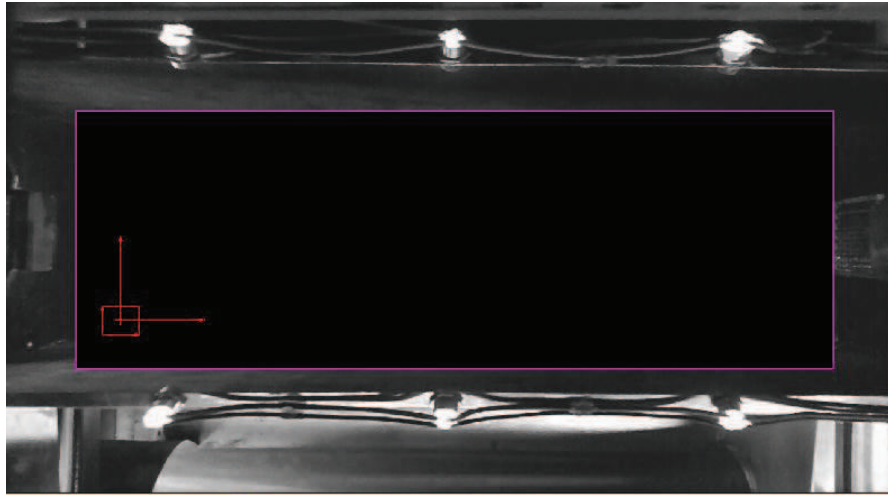


Figura 5.5 Imagen Filtrada de la Bandeja de Identificación Vacía

En las siguientes imágenes se detallan cada uno de los filtros utilizados en el procesamiento realizado para la validación de forma. Todas las imágenes han sido adquiridas por la cámara USB FaceCam 3000 en una resolución de 1024x768 a una velocidad de 30 cuadros por segundo.

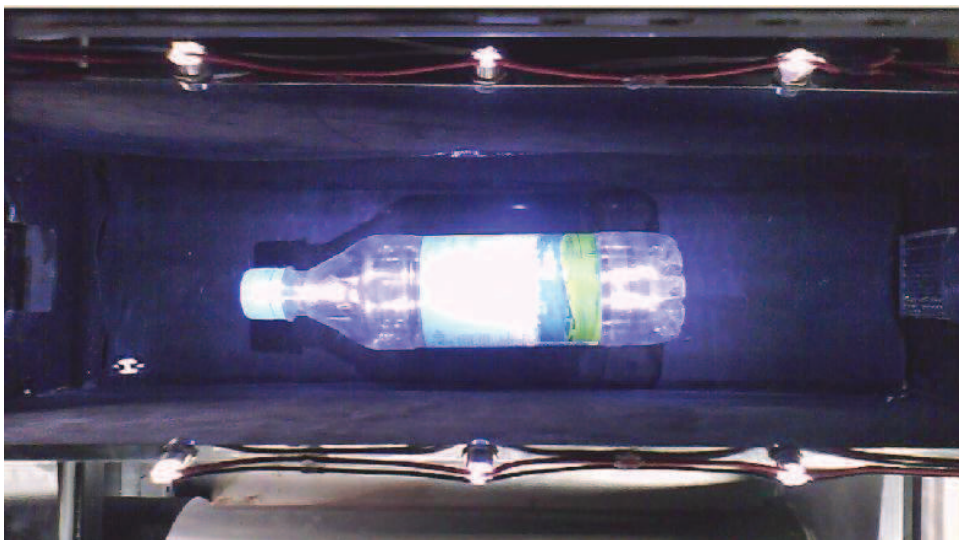


Figura 5.6 Imagen sin Filtrar de una Botella PET de 500cm³

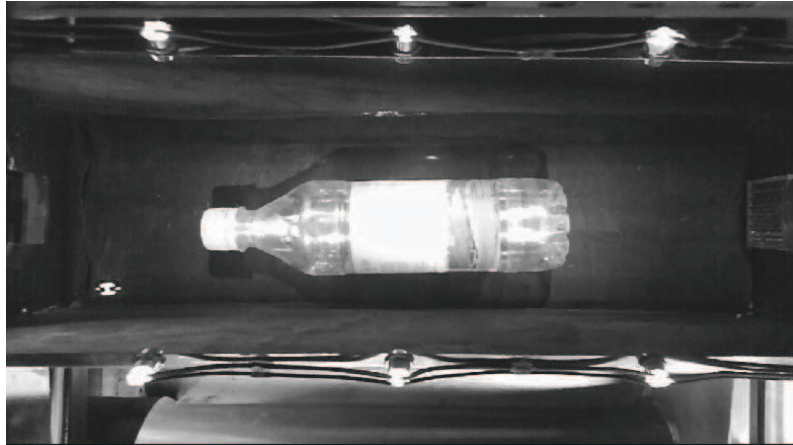


Figura 5.7 Imagen obtenida Extrayendo el Plano de Luminosidad en una Botella PET de 500cm³



Figura 5.8 Imagen obtenida utilizando un Filtro Binario de Umbral en una Botella PET de 500cm³

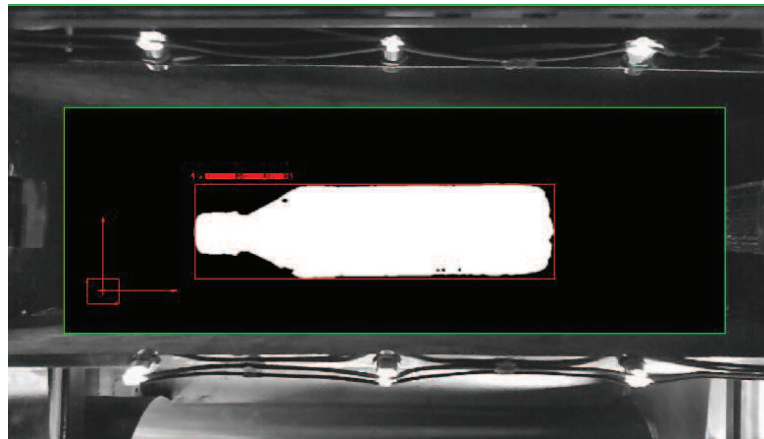


Figura 5.9 Imagen Finalmente Procesada y Almacenada con la herramienta de Clasificación de Objetos para validar la forma de una Botella PET de 500cm³

Los resultados arrojados por el procesamiento de imágenes llevado a cabo son comunicados a través del protocolo RS232 directamente a la tarjeta de acondicionamiento utilizada para determinar si el resultado de la inspección ha sido válido si es que el objeto ingresado coincide con alguna de las clases

guardadas para las formas de los diferentes envases PET almacenados en la memoria del programa de inspección o que a su vez no sean reconocidos como válidos para posteriormente comunicar a la tarjeta de acondicionamiento que el resultado arrojado por la inspección del objeto ha sido incorrecto.

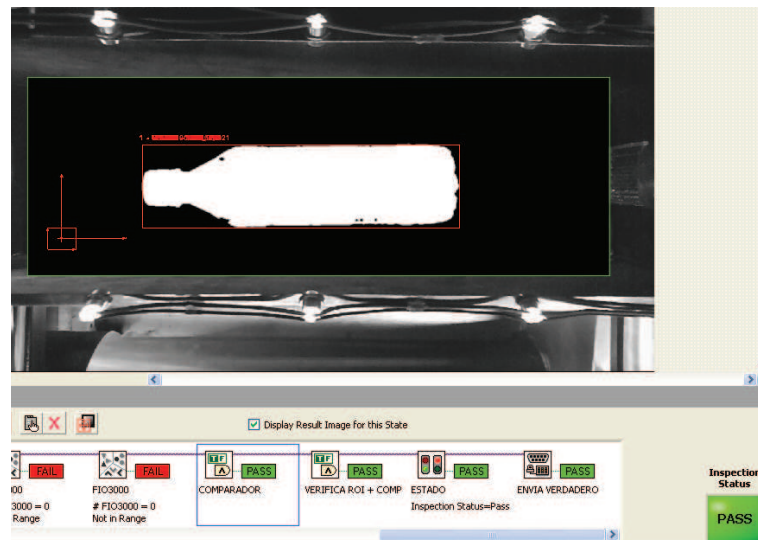


Figura 5.10 Resultado de la Identificación de Forma Válido

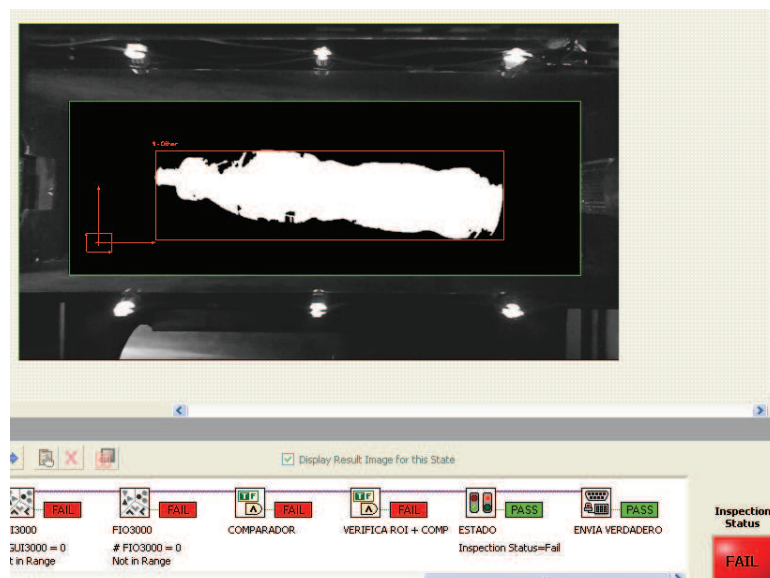
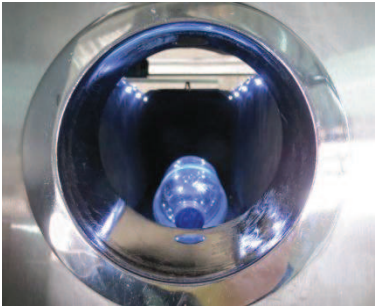


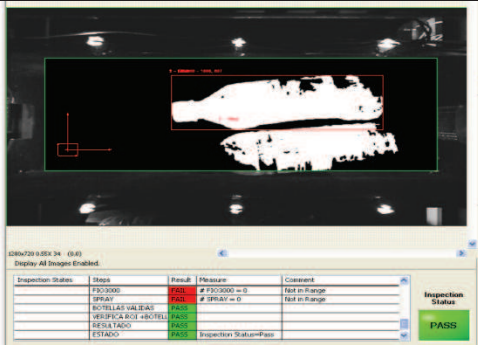


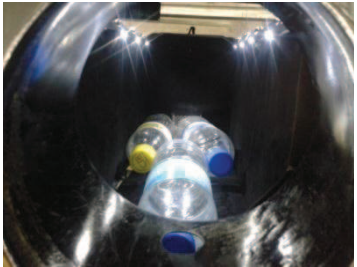
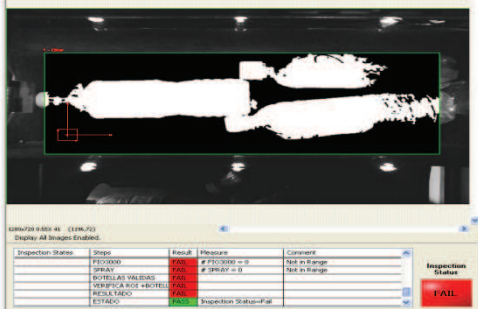
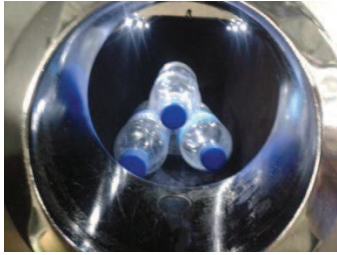


Figura 5.11 Resultado de la Identificación de Forma determinado como No Válido o Incorrecto.

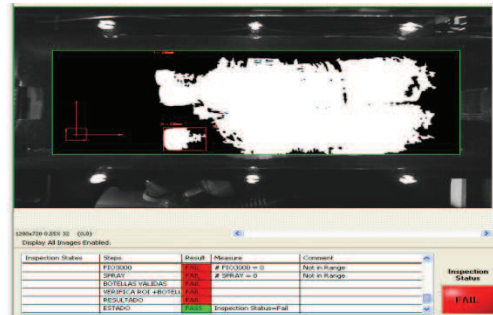
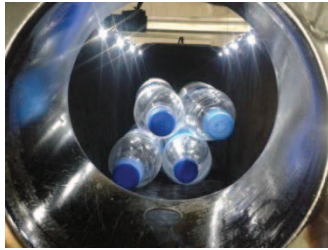
Tabla 5.4 Tabla de Pruebas y Resultados de la Fase de Validación de Forma

PRUEBAS Y RESULTADOS	
VISUALIZACIÓN REAL DE LA CAVIDAD DE IDENTIFICACIÓN	RESULTADO DE LA INSPECCIÓN UTILIZANDO <i>VISION BUILDER</i>® AI 2009
	
1 Botella de 500cm³	Resultado: Pasa
	
2 Botellas de 500cm³	Resultado: Pasa
	
2 Botellas de 500cm³	Resultado: Pasa
	
3 Botellas de 500cm³	Resultado: Falla



3 Botellas de 500cm³

Resultado: Falla



4 Botellas de 500cm³

Resultado: Falla

Observaciones: Dentro de las pruebas realizadas en la fase de validación de forma se destaca el ingreso de más de una botella PET. Para las pruebas se ingresaron hasta 4 botellas de 500cm³ las cuales se han apilado de diferentes maneras para verificar en que disposiciones físicas el resultado de la inspección es válido. Se destaca que el número máximo de botellas a ingresar a ser validadas es un solo envase. Sin embargo se denota que se puede ingresar dos botellas PET donde una es validada y por la disposición física la segunda botella puede ser validada pero el sistema de conteo de la interfaz solamente identifica una sola botella.

Fuente: Propia

Como resultado de las pruebas realizadas se puede destacar que es posible ingresar más de una botella PET y que la fase de validación de forma puede dar como válido hasta dos botellas PET ingresadas en una determinada manera de ingreso. Sin embargo no sería un caso real puesto que el usuario perdería una de las botellas ingresadas si intentara provocar algún tipo de falla viéndose perjudicado a sí mismo.

Por otra parte se identifica que si existiera el caso de que un envase vacío de una botella PET no fuera identificado como válido se puede crear una nueva clase con diferentes muestras para aceptar dicho envase. Esta modificación debe ser realizada en el software de inspección por visión artificial *Vision Builder*® AI 2009 utilizado para la presente aplicación.

5.1.2. SISTEMA DE TRANSPORTE

5.1.2.1. Pruebas de los controladores de posición:

En el Capítulo 3 se llevó a cabo el diseño e implementación teóricos de los controladores. En esta sección se implementarán dichos controladores en el sistema de transporte de manera práctica y con el sistema real. La primera etapa de pruebas se realizará en una interfaz amigable para el usuario, ver Figura 5.22, que permita la modificación en línea de las ganancias del controlador. Las pruebas se realizarán con la carga máxima que manejará el sistema y que corresponde a una botella de 3000 cm³ completamente llena de agua con un peso aproximado de 3kg.

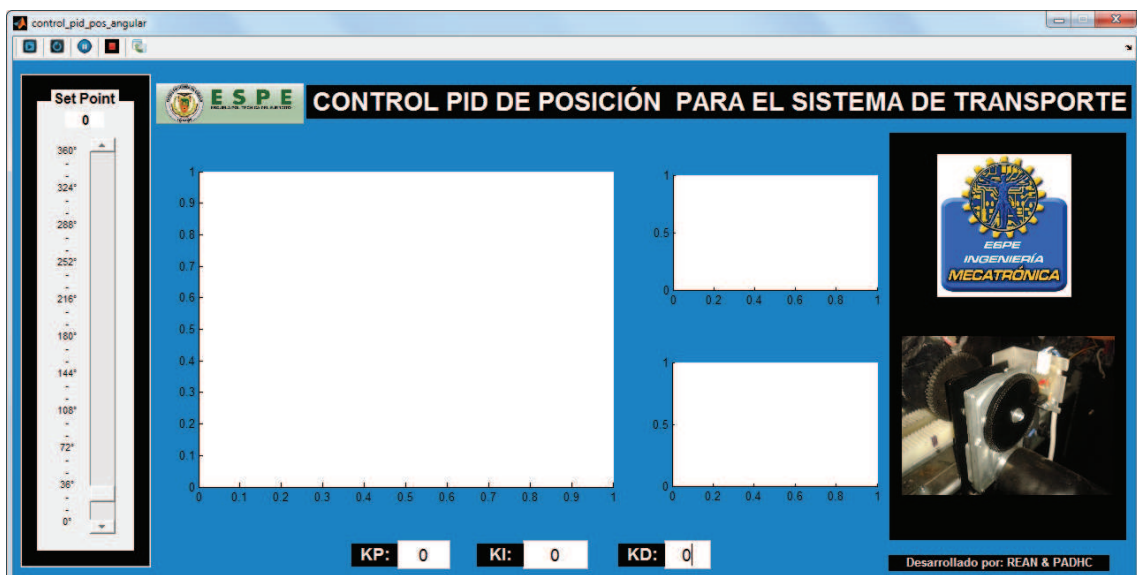


Figura 5.12 Interfaz de Usuario para las pruebas del sistema de transporte

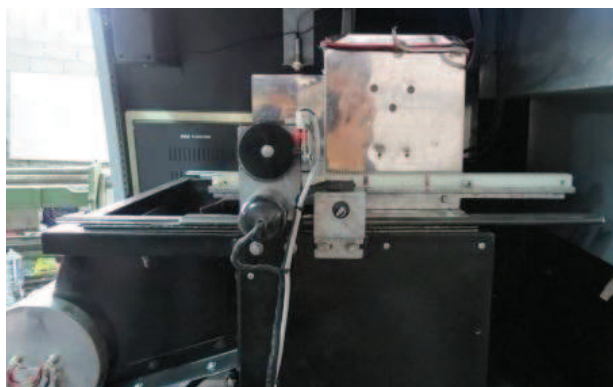
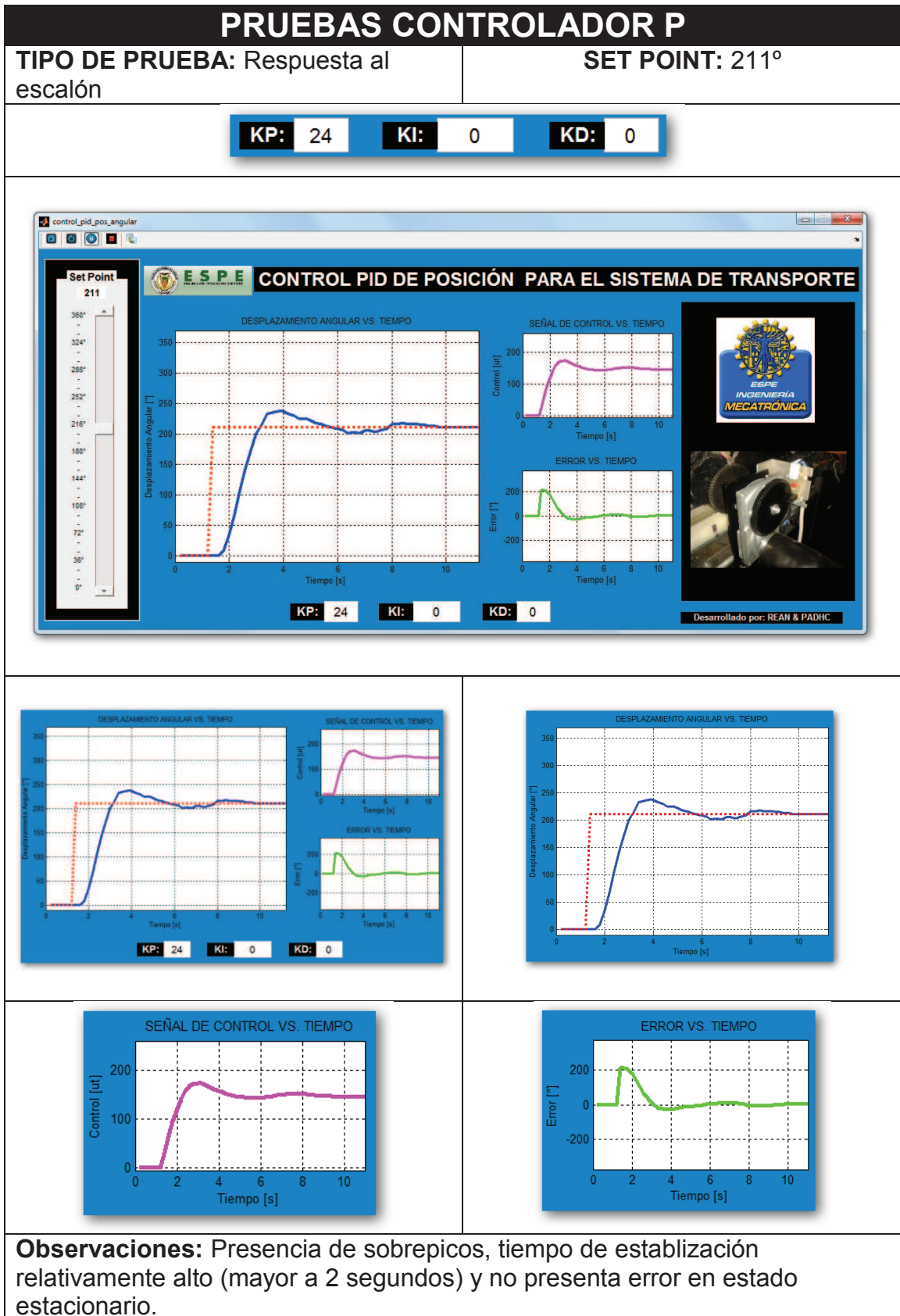


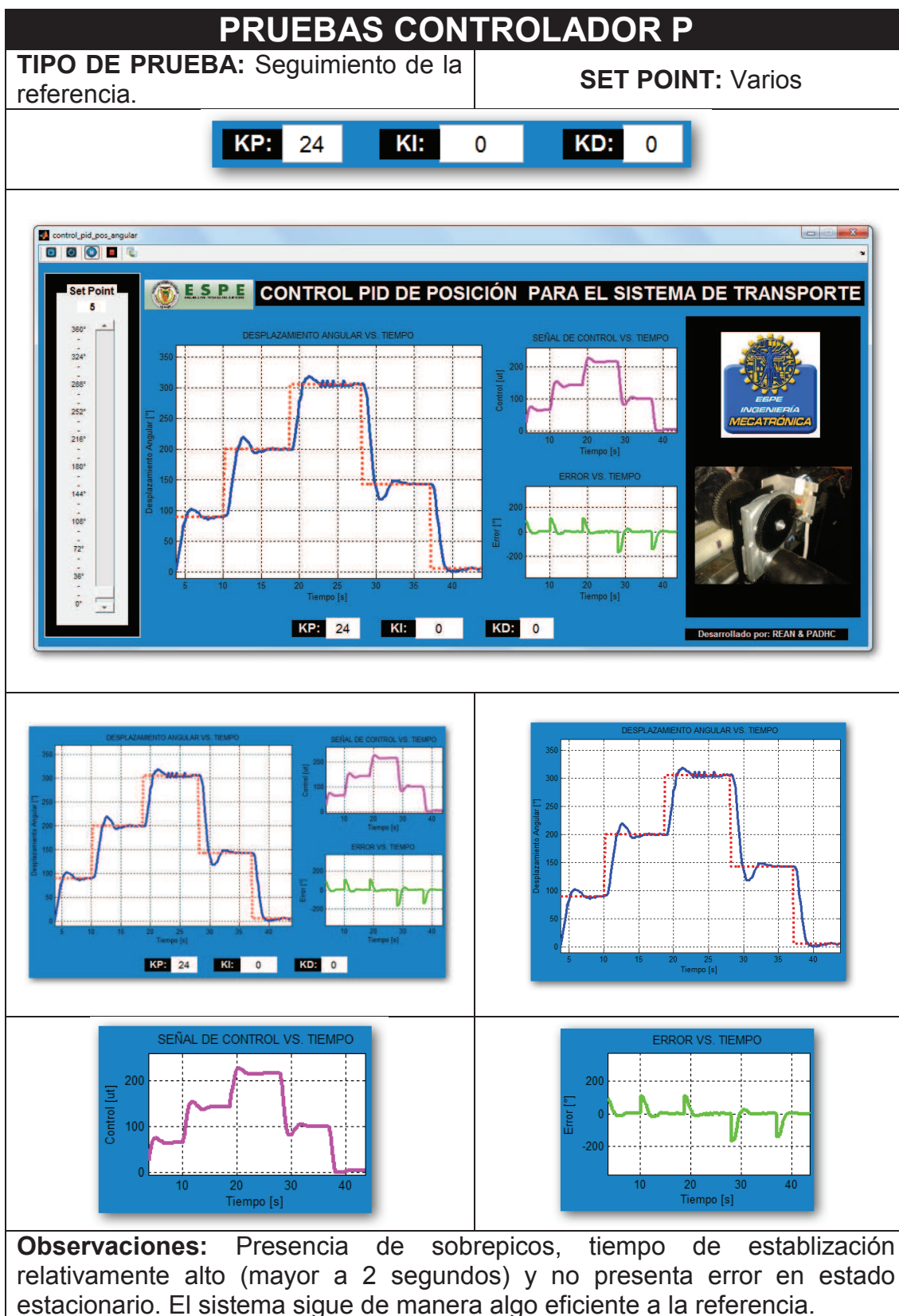
Figura 5.13 Sistema de transporte preparado para las pruebas

Tabla 5.5 Prueba del sistema a una entrada escalón con un controlador P



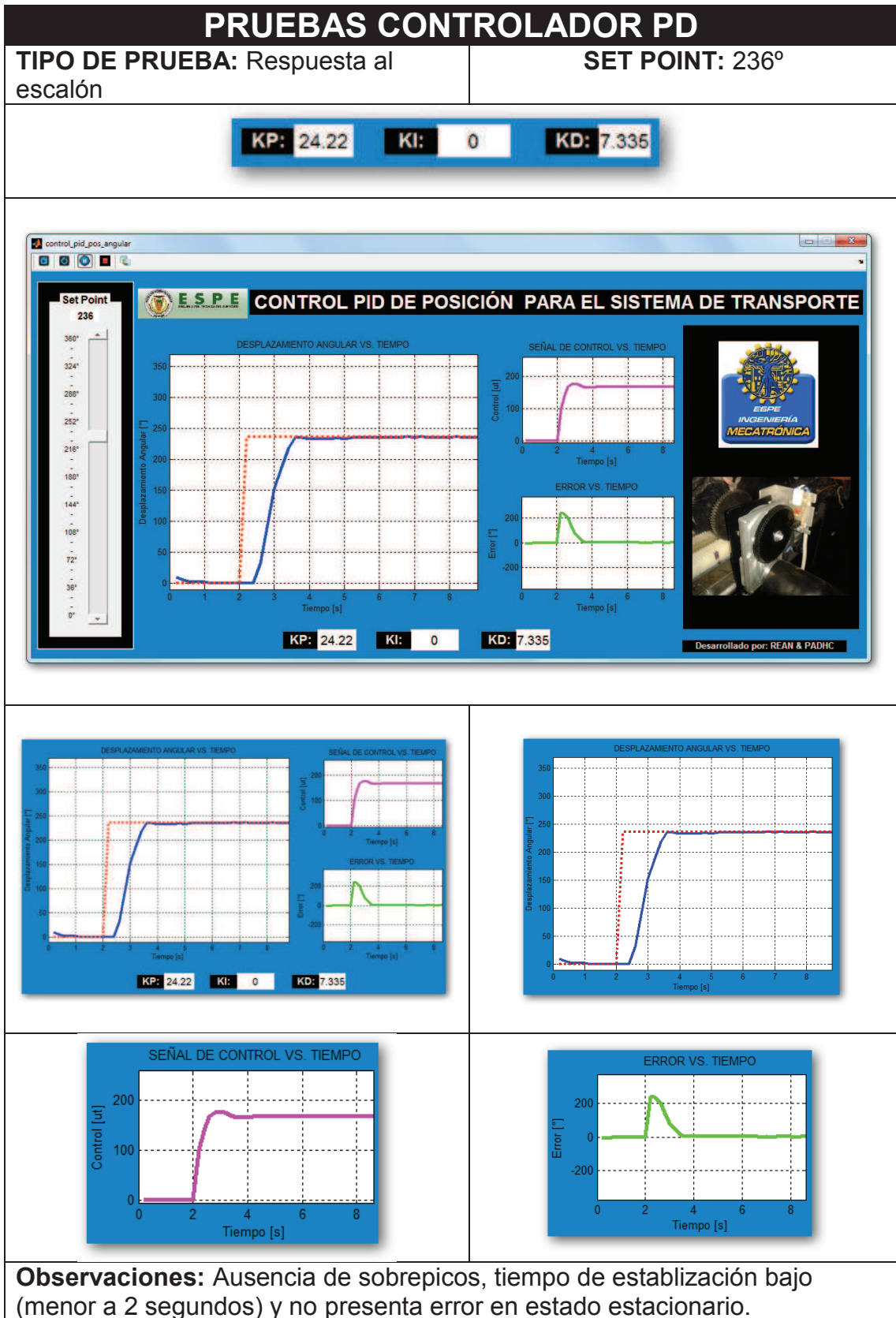
FUENTE: Propia

Tabla 5.6 Prueba de seguimiento de referencia del sistema con un controlador P



FUENTE: Propia

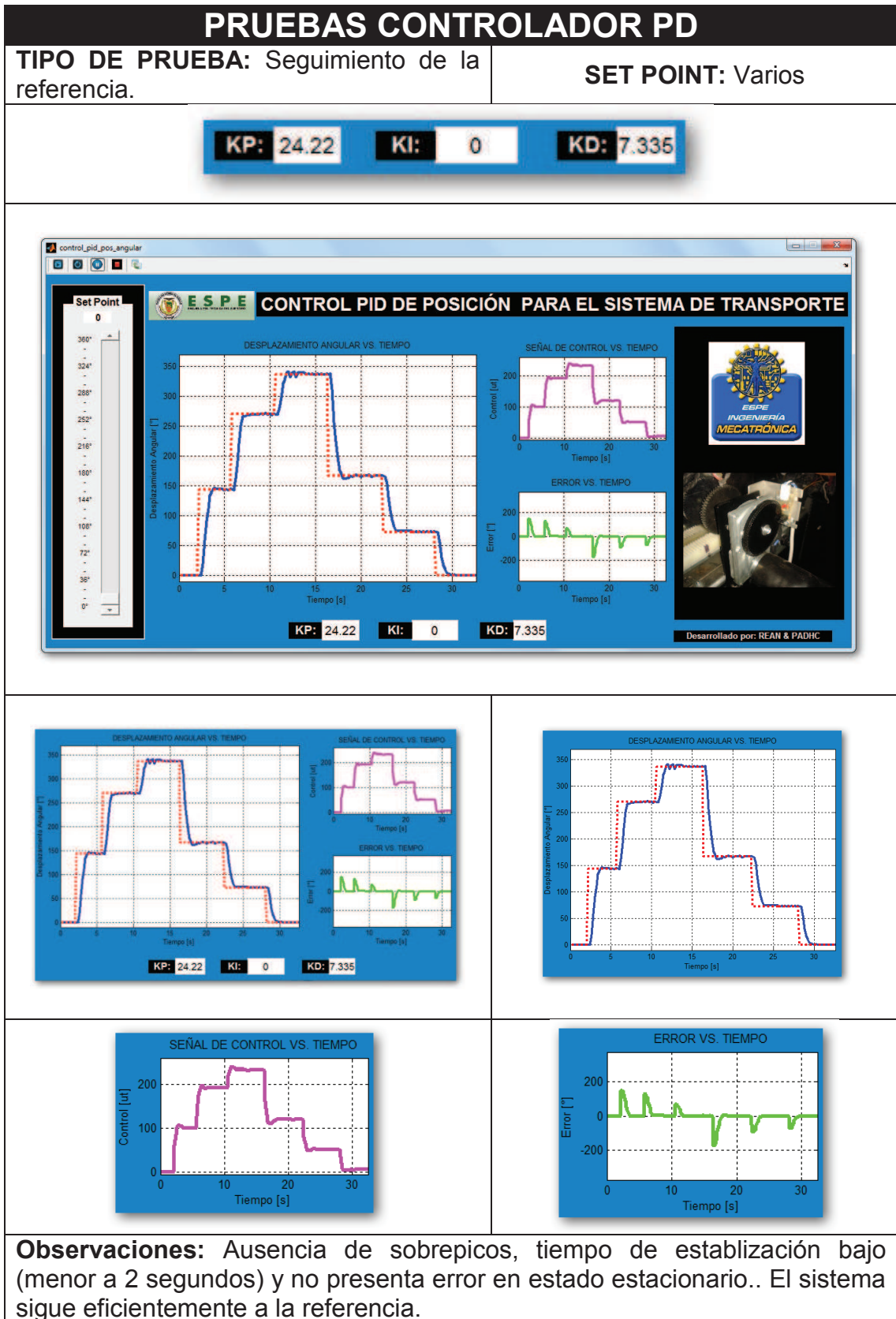
Tabla 5.7 Prueba del sistema a una entrada escalón con un controlador PD



Observaciones: Ausencia de sobrepicos, tiempo de estabilización bajo (menor a 2 segundos) y no presenta error en estado estacionario.

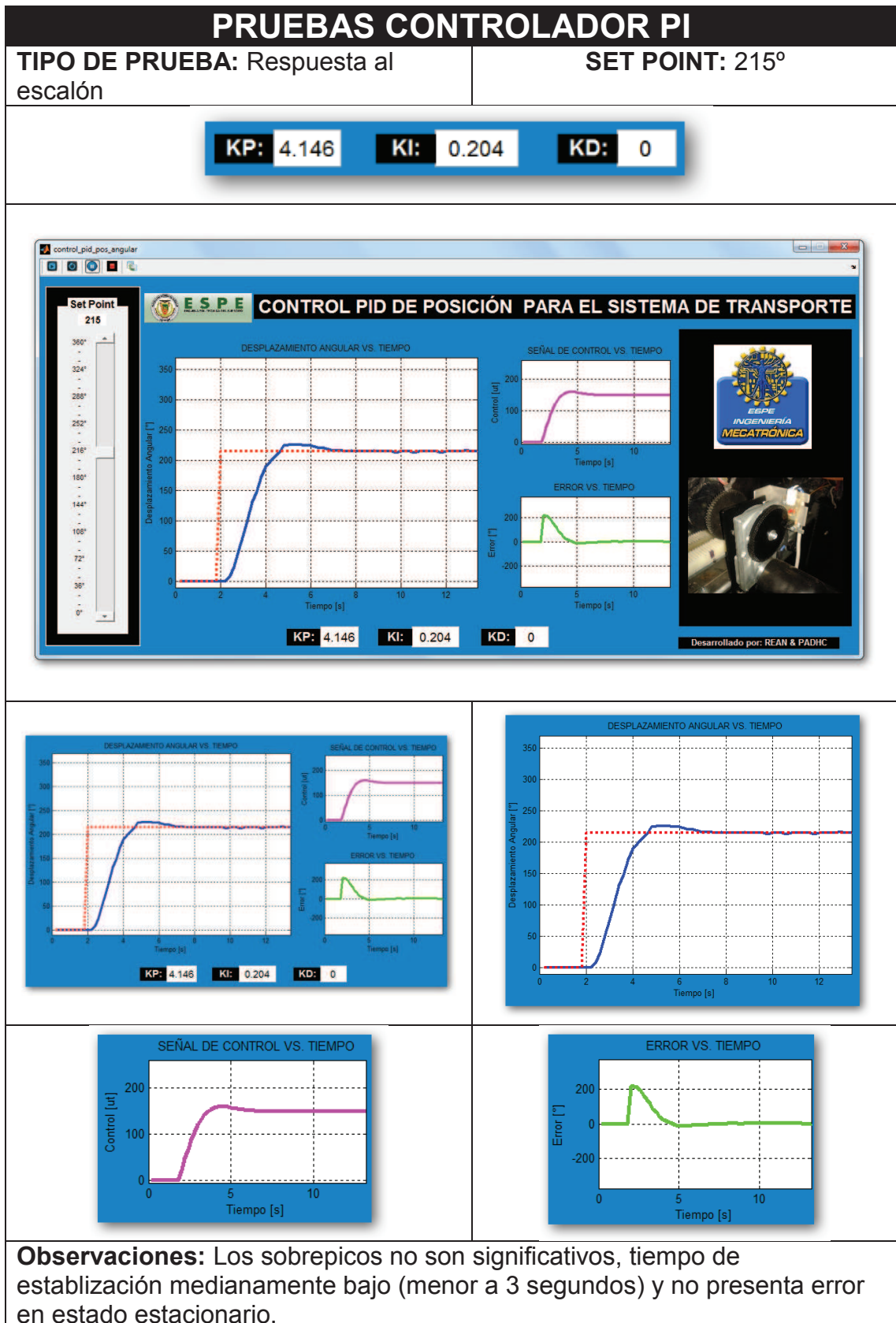
FUENTE: Propia

Tabla 5.8 Prueba de seguimiento de referencia del sistema con un controlador PD



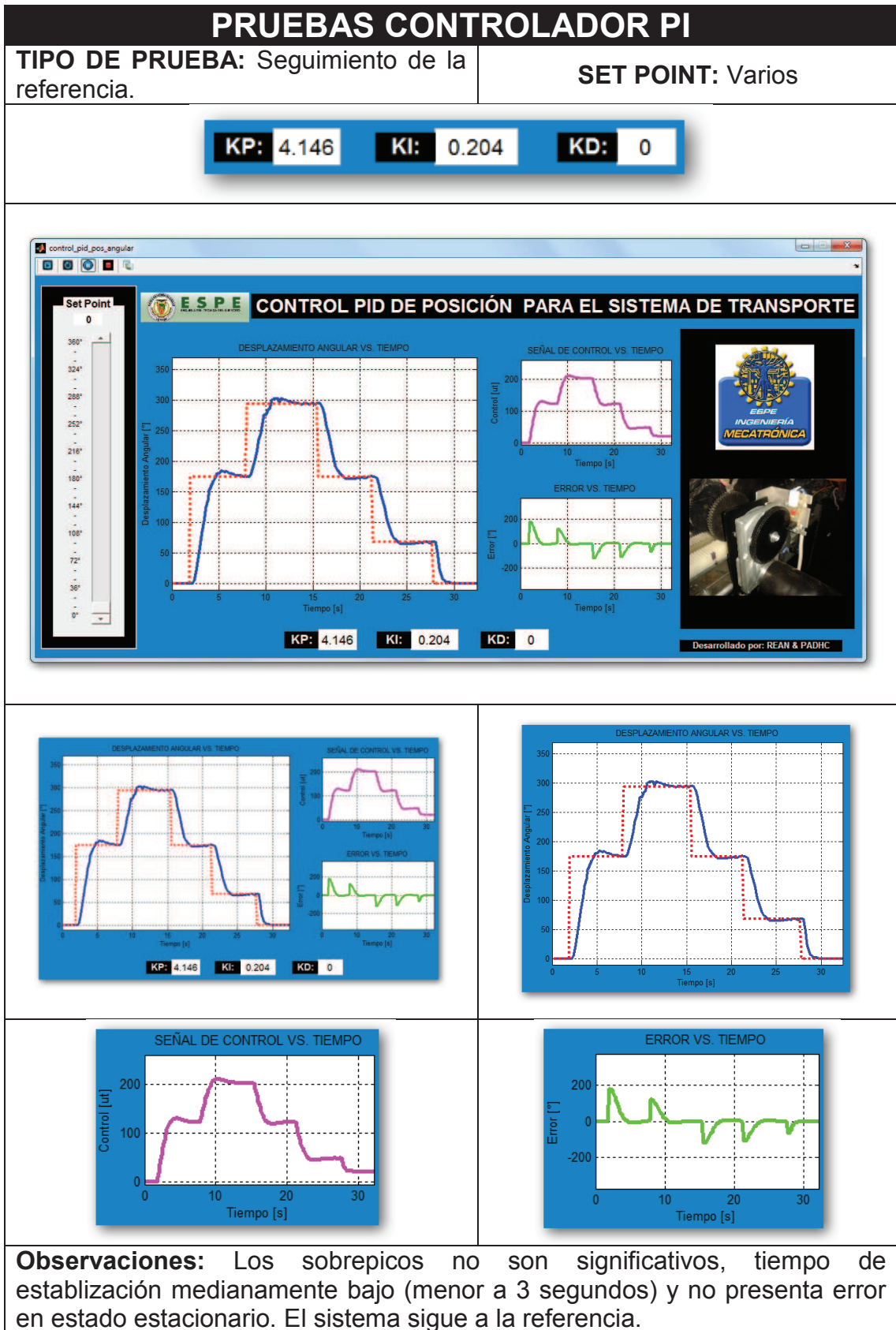
FUENTE: Propia

Tabla 5.9 Prueba del sistema a una entrada escalón con un controlador PI



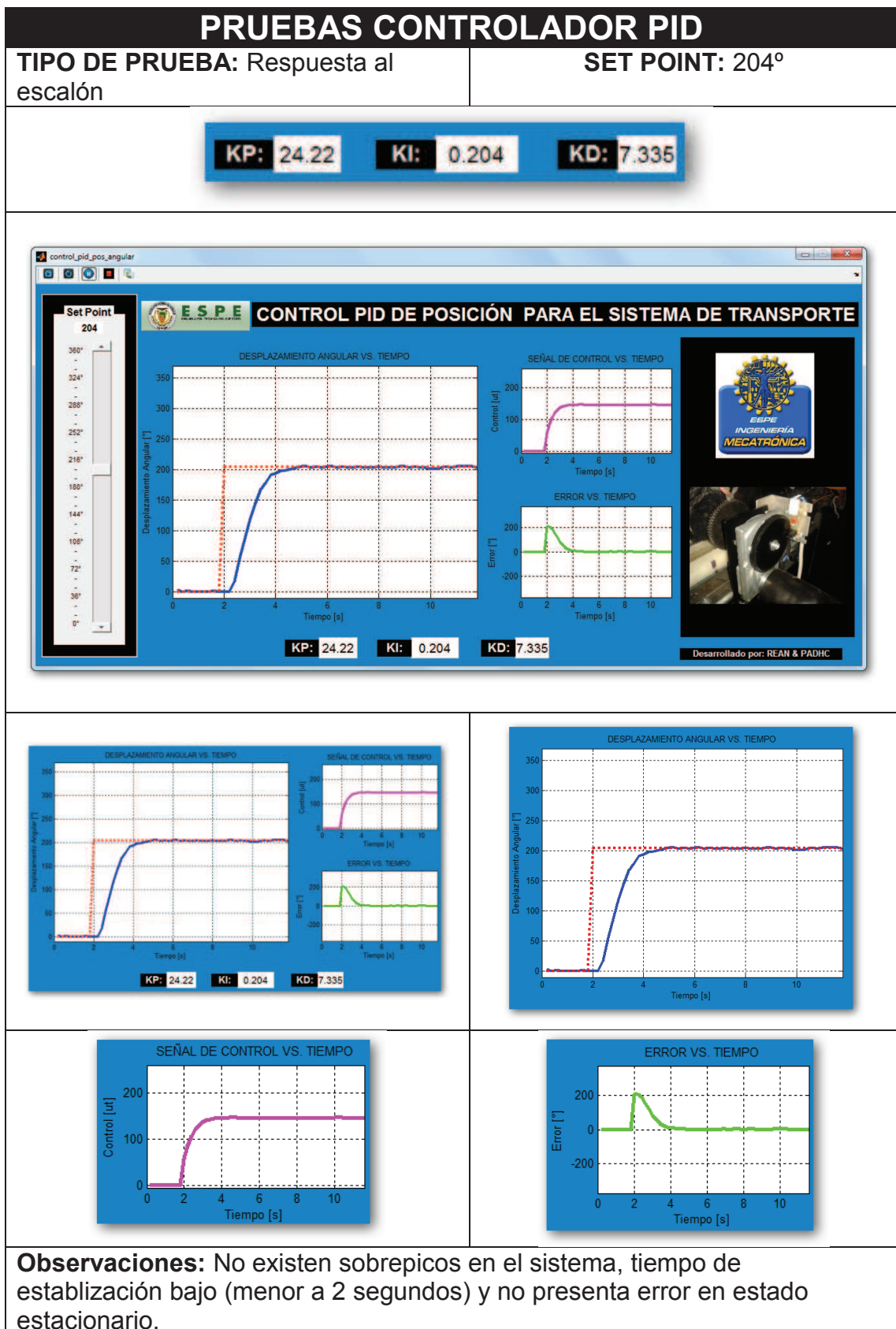
FUENTE: Propia

Tabla 5.10 Prueba de seguimiento de referencia del sistema con un controlador Pi



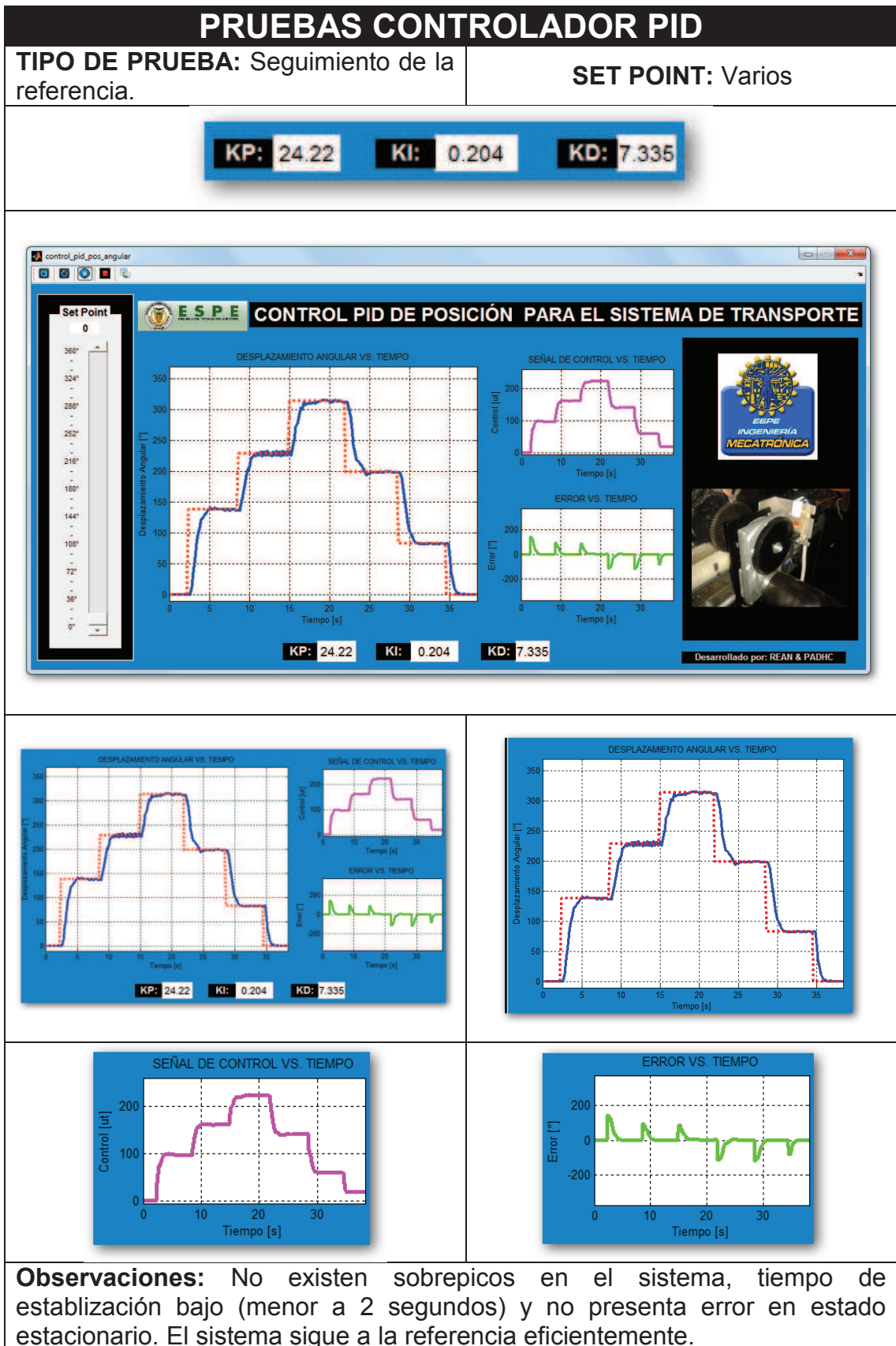
FUENTE: Propia

Tabla 5.11 Prueba del sistema a una entrada escalón con un controlador PID



FUENTE: Propia

Tabla 5.12 Prueba de seguimiento de referencia del sistema con un controlador Pi



FUENTE: Propia

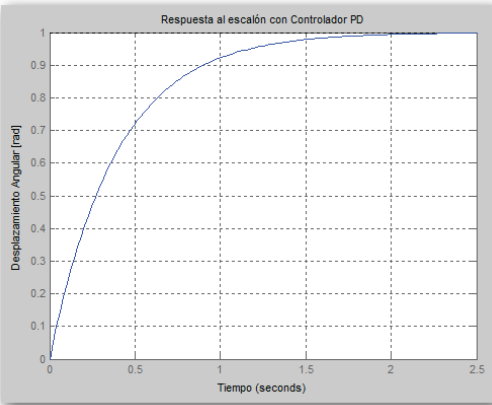
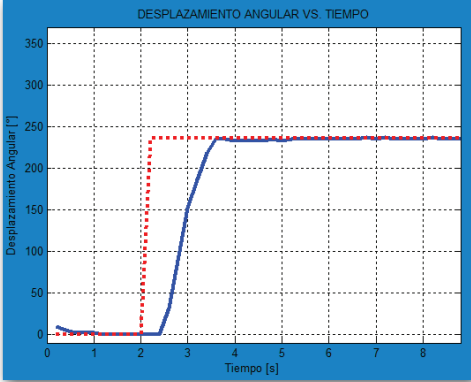
5.1.2.2. Resultados de los controladores de posición

Tabla 5.13 Resultados de las pruebas del sistema con un controlador P

RESULTADOS CONTROLADOR P	
TEÓRICO	EXPERIMENTAL
Parámetros de desempeño	
$t_r = 0.618 \text{ [s]}$ $t_s = 2.03 \text{ [s]}$ $M_p = 11.2 \text{ [%]}$ $e_{ss} = 0 \text{ [rad]}$	$t_r \approx 1 \text{ [s]}$ $t_s \approx 4.5 \text{ [s]}$ $M_p = 14 \text{ [%]}$ $e_{ss} = 0 \text{ [rad]}$
Observaciones: <ul style="list-style-type: none"> • Sistema estable y subamortiguado. • Tiempo de establecimiento alto lo que no conviene en el correcto funcionamiento del sistema. • Presencia de picos en el sistema lo que se convierte en una desventaja respecto a los otros controladores. • No existe error en régimen permanente. 	

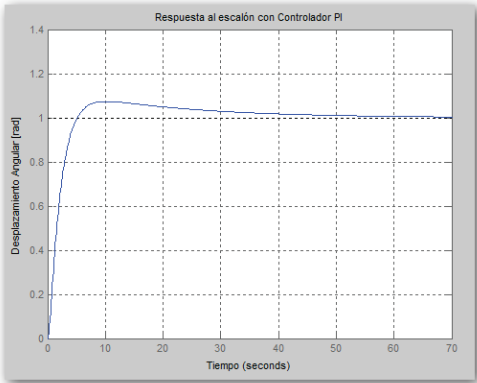
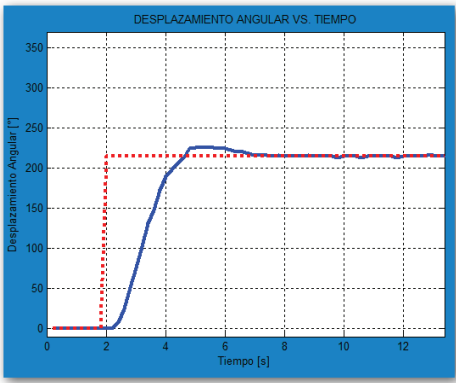
FUENTE: Propia

Tabla 5.14 Resultados de las pruebas del sistema con un controlador PD

RESULTADOS CONTROLADOR PD	
TEÓRICO	EXPERIMENTAL
	
Parámetros de desempeño	
$t_r = 0.86 \text{ [s]}$ $t_s = 1.53 \text{ [s]}$ $M_p = 0 \text{ [%]}$ $e_{ss} = 0 \text{ [rad]}$	$t_r \approx 0.7 \text{ [s]}$ $t_s \approx 1.1 \text{ [s]}$ $M_p = 0 \text{ [%]}$ $e_{ss} = 0 \text{ [rad]}$
<p>Observaciones:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sistema estable y sobreamortiguado. • Tiempo de establecimiento bastante bajo lo que conviene mucho en el correcto funcionamiento del sistema. • El sobrepico es practicamente nulo. • No existe error en régimen permanente. 	

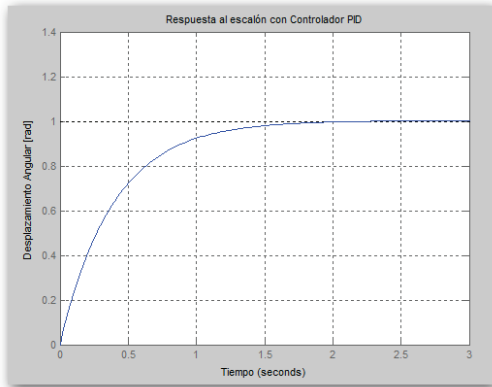
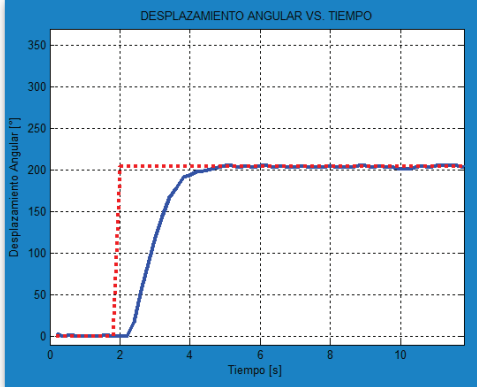
FUENTE: Propia

Tabla 5.15 Resultados de las pruebas del sistema con un controlador PI

RESULTADOS CONTROLADOR PI	
TEÓRICO	EXPERIMENTAL
	
Parámetros de desempeño	
$t_r = 3.26 \text{ [s]}$ $t_s = 37.5 \text{ [s]}$ $M_p = 7.38 \text{ [%]}$ $e_{ss} = 0 \text{ [rad]}$	$t_r \approx 2.3 \text{ [s]}$ $t_s \approx 4.5 \text{ [s]}$ $M_p \approx 5 \text{ [%]}$ $e_{ss} = 0 \text{ [rad]}$
Observaciones: <ul style="list-style-type: none"> • Sistema estable y subamortiguado. • Tiempo de establecimiento alto lo que no aporta mucho en el correcto funcionamiento del sistema. • El sobrepico es bajo. • No existe error en régimen permanente. 	

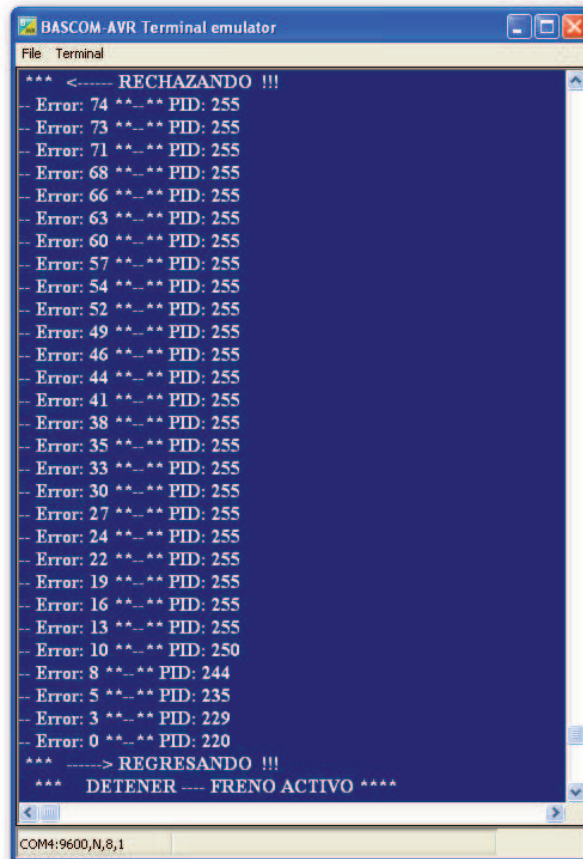
FUENTE: Propia

Tabla 5.16 Resultados de las pruebas del sistema con un controlador PID

RESULTADOS CONTROLADOR PID	
TEÓRICO	EXPERIMENTAL
	
Parámetros de desempeño	
$t_r = 0.855 \text{ [s]}$ $t_s = 1.49 \text{ [s]}$ $M_p = 0.3 \text{ [%]}$ $e_{ss} = 0 \text{ [rad]}$	$t_r \approx 0.8 \text{ [s]}$ $t_s \approx 1.8 \text{ [s]}$ $M_p \approx 0 \text{ [%]}$ $e_{ss} = 0 \text{ [rad]}$
Observaciones: <ul style="list-style-type: none"> • Sistema estable y sobreamortiguado. • Tiempo de establecimiento bajo lo que aporta mucho en el correcto funcionamiento del sistema. • El sobrepico es nulo. • No existe error en régimen permanente. 	

FUENTE: Propia

Se ha comprobado el correcto funcionamiento de todos los controladores en el sistema. A continuación se muestran los resultados del sistema de transporte en la máquina recicladora:



```
BASCOM-AVR Terminal emulator
File Terminal
*** <----- RECHAZANDO !!!
Error: 74 **--** PID: 255
Error: 73 **--** PID: 255
Error: 71 **--** PID: 255
Error: 68 **--** PID: 255
Error: 66 **--** PID: 255
Error: 63 **--** PID: 255
Error: 60 **--** PID: 255
Error: 57 **--** PID: 255
Error: 54 **--** PID: 255
Error: 52 **--** PID: 255
Error: 49 **--** PID: 255
Error: 46 **--** PID: 255
Error: 44 **--** PID: 255
Error: 41 **--** PID: 255
Error: 38 **--** PID: 255
Error: 35 **--** PID: 255
Error: 33 **--** PID: 255
Error: 30 **--** PID: 255
Error: 27 **--** PID: 255
Error: 24 **--** PID: 255
Error: 22 **--** PID: 255
Error: 19 **--** PID: 255
Error: 16 **--** PID: 255
Error: 13 **--** PID: 255
Error: 10 **--** PID: 250
Error: 8 **--** PID: 244
Error: 5 **--** PID: 235
Error: 3 **--** PID: 229
Error: 0 **--** PID: 220
*** -----> REGRESANDO !!!
*** DETENER ---- FRENO ACTIVO ****
COM4:9600,N,8,1
```

Figura 5.14 Despliegue de la ventana de monitoreo de la posición de la bandeja de aceptación

En la Figura 5.24 se muestra la variación del error en el proceso de transporte obteniendo un error fina de cero.



Figura 5.15 Objeto rechazado y transportado a la cámara de rechazo

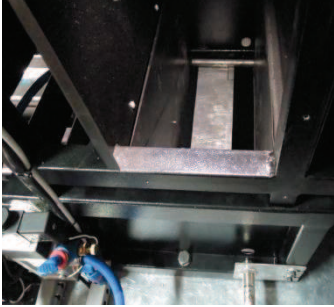

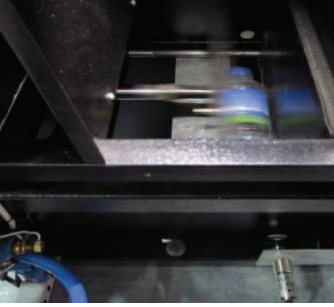
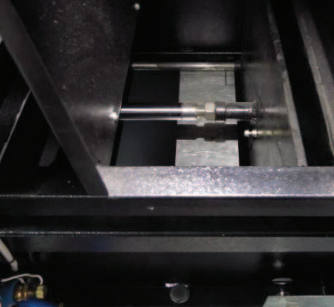
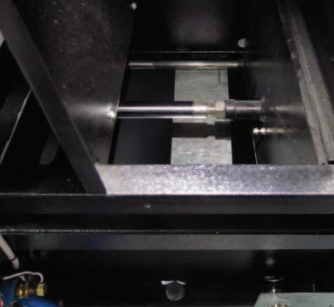
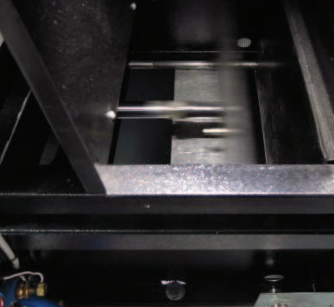
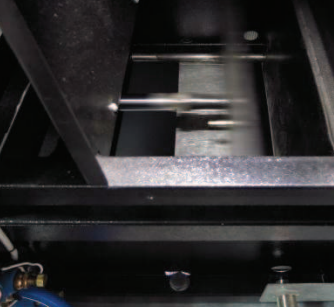
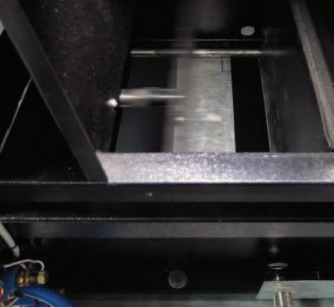
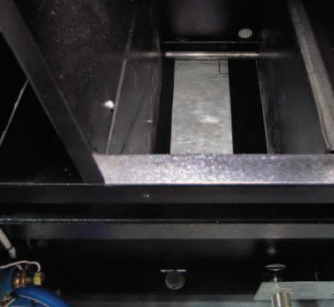


Figura 5.16 Botella aceptada y transportada a la cámara de aceptación

5.2. PRUEBAS Y RESULTADOS DE LA ETAPA DE COMPACTACIÓN Y ALMACENAMIENTO

Las pruebas de compactación y almacenamiento se las ha realizado en la cavidad destinada a realizar ésta acción en donde el actuador principal es el cilindro dimensionado en el capítulo 2. A continuación en la siguiente tabla se muestra la secuencia de compactación con fotografías reales en la secuencia normal de funcionamiento.

Tabla 5.17 Pruebas y Resultados de la Etapa de Compactación y Almacenamiento

PRUEBAS Y RESULTADOS		
		
Cavidad Libre	Objeto a compactar	Compactando
		
Compactando	Compactando	Botella Compactada
		
Retorno del cilindro	Retorno del cilindro	Cavidad libre
<p>Observaciones: Los sensores magnéticos se encuentran ubicados en las cercanías del cilindro de doble efecto. Por otra parte se puede visualizar en las fotografías el sensor infrarrojo instalado el cual emite una señal a la tarjeta electrónica de control para verificar que la cavidad de compactación se encuentre libre. Las botellas almacenadas son recogidas en la cesta de almacenamiento ubicada en la parte baja de la RVM.</p>		

Fuente: Propia

A continuación se muestra la cesta de almacenamiento con capacidad para 600 botellas PET de 500cm³ compactadas, cantidad estimada en base a las pruebas realizadas.

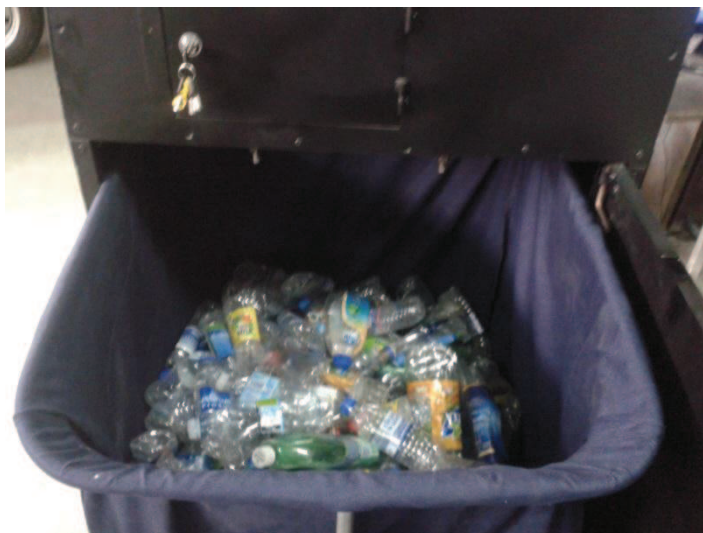


Figura 5.17 Cesta de Almacenamiento de Botellas.

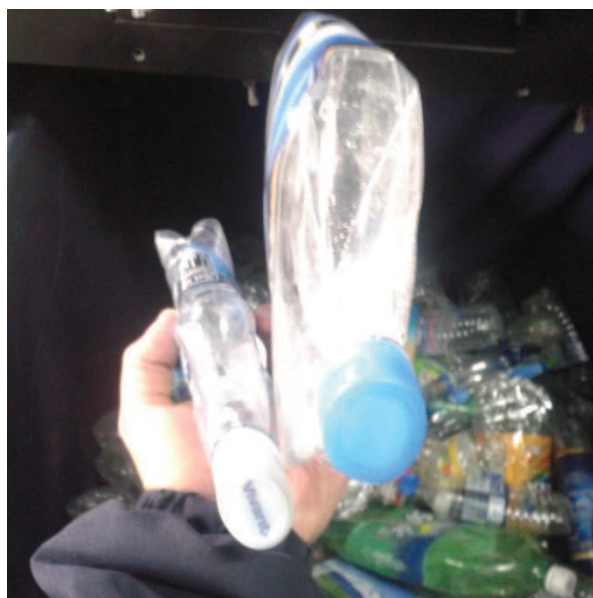


Figura 5.18 Botellas PET de 500 y 3000cm³ compactadas a un tercio de su tamaño original.

5.3. PRUEBAS Y RESULTADOS DE LA ETAPA DEL SISTEMA DE PAGO

Para la presente etapa se han realizado pruebas de impresión del ticket que la RVM oferta al usuario a manera de forma de pago. A continuación se muestra los resultados obtenidos.

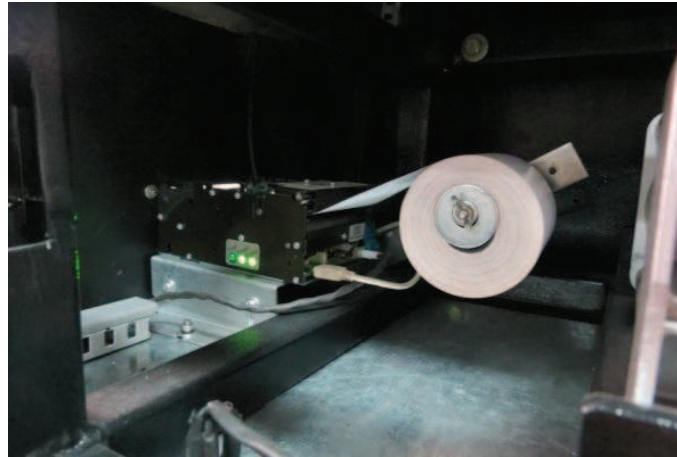


Figura 5.19 Impresora Térmica Instalada en la RVM con Rollo de 80mm.



Figura 5.20 Accionamiento del pulsador de impresión.



Figura 5.21 Ticket Impreso para tres botellas almacenadas.

5.4. DETERMINACIÓN DE FACTORES DE FAL

5.5. LA

Como resultado de las diferentes pruebas realizadas se han detectado ciertas condiciones en las cuales las diferentes etapas de la RVM pueden llegar a fallar. A continuación se indica en la siguiente figura las posibles condiciones en las que cada una de las etapas las condiciones o factores que pueden ocasionar fallas en el funcionamiento óptimo de la RVM.

Identificación y Transporte	Compactación y Almacenamiento	Sistema de Pago
<ul style="list-style-type: none"> • Carencia o exceso de iluminación en la bandeja de identificación. • Forma de botellas no almacenadas como clases válidas en el software de inspección Vision Builder AI 2009. • Coincidencia en formas de ciertos envases de bebidas como yogurt o leche. • Ingreso no adecuado del objeto a identificar. • Posible existencia de brillos no inesperados causados por la reflexión lumínica del PET. • Falta de ajustes mecánicos en piezas sujetas a movimientos rotacionales en el sistema de encoder implementado. • Resolución de imágenes menores a 1024x768. • Velocidades de muestreo menores a 30 cuadros por segundo. • Fallas de calibración del sistema de transporte. • Acondicionamiento inadecuado de la señal en la fase de pesaje. 	<ul style="list-style-type: none"> • Atascamiento de objetos en la cavidad de compactación. • Botellas de 3000cm³ intencionalmente cerradas a presión lo cual presenta una mayor resistencia a la compactación de la botella. • Fallas por ajustes mecánicos no apropiados en los sensores implementados. • Desbordamiento de la cesta de almacenamiento por exceso de botellas compactadas. • Presión de trabajo en el circuito neumático menor a 7 bares. 	<ul style="list-style-type: none"> • Accionamiento inadecuado del pulsador de impresión. • Atascamiento de papel en la impresora. • Problemas de conectividad.

Figura 5.22 Posibles Factores y Condiciones de Falla de la RVM

Como es de esperarse la etapa de identificación y transporte es la más propensa a las diferentes condiciones y factores de falla dado que dispone de la mayor cantidad de sensores los cuales están destinados a detectar, validar la forma y pesar el objeto ingresado para posteriormente trasladarlo a las cavidades de rechazo o de compactación según el resultado de la validación.

Por otra parte se pueden detectar otros factores de falla de carácter general que han sido identificados en las pruebas de funcionamiento a continuación listados:

- ❖ Problemas de conectividad entre la interfaz de usuario y la tarjeta de control.
- ❖ Presencia de ruidos eléctricos externos que puedan provocar fallas de funcionamiento en el microcontrolador.
- ❖ Mala sincronización de envío y recepción de variables entre la interfaz de usuario y la tarjeta de control.
- ❖ Problemas ocasionados por errores inesperados en el sistema operativo utilizado.
- ❖ Mala calidad de energía eléctrica.
- ❖ Acciones vandálicas provocadas por los usuarios con el fin de obtener tickets gratis.
- ❖ Intercambio inadecuado de puertos USB de los diferentes dispositivos.

CAPÍTULO VI

Una vez realizadas todas las modificaciones, pruebas y ensayos pertinentes para determinar las condiciones de falla se puede constatar los resultados obtenidos en la realización del presente proyecto. Las conclusiones obtenidas y las recomendaciones realizadas se detallan a continuación para constancia de las posibles mejoras a ser ejecutadas para posteriores desarrollos del prototipo de RVM diseñada y construida en la empresa auspiciante.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

- El prototipo de máquina vending inversa diseñado y construido es capaz de aceptar, compactar y almacenar exclusivamente envases vacíos de botellas PET de 250 a 3000cm³ gracias a los sistemas de pesaje y

validación de forma implementados para ejecutar de manera fiable la discriminación de cualquier objeto ingresado en la cavidad de compactación brindando al mismo tiempo al usuario las instrucciones de utilización y mensajes del estado de la máquina gracias a la interfaz visual y auditiva integrada.

- La solución implementada con visión artificial en la fase de validación de forma de los objetos ingresados a la RVM brinda una fiabilidad la cual depende directamente de la resolución y a la velocidad de muestreo de la cámara de video utilizada.
- La empresa auspiciante puede orientar el presente prototipo a diferentes modelos de RVM para la identificación y almacenamiento de latas desechables de bebidas comerciales o envases vacíos de botellas de vidrio dado el alto grado de flexibilidad que brindan las soluciones implementadas para el sistema de identificación y transporte.
- El desarrollo de la interfaz visual y auditiva elaborado en Visual Basic Express 2010 brinda al programador herramientas de fácil utilización con las cuales se pueden incluir instrucciones, publicidad y mensajes de concientización enfocados netamente a la captación de público para que el uso de las RVM sea atractivo a los usuarios.
- La cantidad de botellas PET compactadas y almacenadas en la RVM brinda un aporte significativo frente al impacto ambiental que causarían las malas prácticas de reciclaje que posee la población en general gracias a que se oferta un tipo de incentivo al usuario.

6.2. RECOMENDACIONES

- Gracias a las pruebas realizadas en la etapa de identificación y validación de forma se puede recomendar la utilización de la línea de *Smart Cameras* de National Instruments dado que éstos equipos poseen diversas prestaciones como altas velocidades de muestreo de imágenes, lentes especiales de aumento, iluminación incorporada, puertos de entrada y salida digital, y conectividad con dispositivos de control industrial las cuales podrían aportar significativamente a la

mejora del algoritmo de reconocimiento de objetos ingresados en la RVM reduciendo el tiempo utilizado en dicha etapa.

- Se recomienda a la empresa auspiciante invertir en la adquisición de la licencia de desarrollo del software Vision Builder AI 2009 utilizado en su versión de prueba en el desarrollo del presente prototipo, dado que dicho paquete computacional dispone de herramientas de fácil utilización y que además pueden ofertar un alto grado de flexibilidad que puede ser enfocada para diversos modelos de RVM.
- Dadas las características de funcionamiento del sistema de compactación y almacenamiento de botellas implementado en el prototipo, se recomienda a la empresa auspiciante considerar la utilización de sistemas hidráulicos en lugar de sistemas neumáticos buscando reducir el nivel de ruido que ocasiona la activación del compresor.
- Para mejorar los tiempos de muestreo en la etapa de transporte se puede considerar la implementación de una tarjeta de adquisición de datos al igual que dispositivos embebidos de control que oferten una mejor robustez y fiabilidad como por ejemplo PLCs o Compaq-Rio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Bagad, V. S. (2008). Mechatronics. Pune: Technical Publications Pune.
2. Copco, A. (2012). Compressed Air Manual (7th ed.). Wilrijk, Belgium.
3. Dorf, R. C., & Bishop, R. H. (n.d.). Sistemas de Control Moderno (Décima ed.). Prentice Hall.
4. Ferrero Martín, F. J. (2012). Universidad de Oviedo. Retrieved 2013, from <http://www.ate.uniovi.es/5809/Lecci%C3%B3n09.pdf>
5. Franklin, G. F., Powell, J. D., & Workman, M. L. (1998). Digital Control of Dynamic Systems (Third Edition ed.). Addison Wesley Longman.

6. Genius, KYE Systems Corp. (2011). Genius Official Web Page. Retrieved Enero 2013, from <http://www.geniusnet.com/wSite/ct?xltem=45717&ctNode=161>
7. Genius, KYE Systems Corp. (2011). Genius Official Web Page/Products. Retrieved Enero 2013, from Catálogo FaceCam 3000: http://www.geniusnet.com/wSite/public/Data/geniusOnline/upload/support/eCatalogue/Webcam/FaceCam3000//FaceCam_3000_PA.pdf
8. Hesse, S. (2002). Aire comprimido, fuente de energía. Esslingen: FESTO AG & Co.
9. Huai Electronics Corporation. (2010). Official Web Page. Retrieved from http://www.weiya.com.tw/products_detail.asp?le=tchinese&fid=36&pid=176&tCatName=%E9%9B%BB%E6%BA%90%E4%BE%9B%E6%87%89%E5%99%A8
10. IPC D-275-Task Group. (1998). IPC-2221 Generic Standard on Printed Board Design. IPC, 39.
11. Kuo, B. C. (1996). Sistemas de Control Automático (Séptima ed.). Prentice Hall.
12. LPKF Laser & Electronics AG. (s.f.). LPKF Laser & Electronics. Recuperado el 13 de 01 de 2012, de <http://www.lpkf.com/products/rapid-pcb-prototyping/circuit-board-plotter/protomat-s63.htm>
13. Matthews, C. (2002). Aeronautical Engineer's Data Book. Woburn: Butterworth-Heineman.
14. Microsoft Corporation. (2010). Retrieved from <http://www.microsoft.com/visualstudio/esn/products>
15. Monasterio Huelin, F., & Gutiérrez, Á. (2012). Modelo lineal de un motor de corriente continua.
16. National Instruments Corporation. (2012). Soporte en línea/Documentación. Retrieved Enero 2013, from NI Vision Concepts Help: <http://digital.ni.com/manuals.nsf/websearch/16712B9E3D2179698625776E0057700D?opendocument&Submitted&&node=%20>
17. National Instruments Corporation. (2010). Vision Builder for Automated Inspection. Estados Unidos.
18. National Instruments, C. (2010). Estados Unidos.

19. Navarra, U. d. (2008). Laboratorio de Neumática y Oleohidráulica. Cálculos en Instalaciones Neumáticas. Navarra.
20. OPTEX FA CO. LTDA. (2012). Retrieved from <http://www.optex-fa.com/product/cseries/applications.html>
21. Phillips, C. L., & Harbor, R. D. (1996). Feedback Control Systems (third edition ed.). Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall.
22. Riba, C. (2002). Diseño Concurrente. Barcelona: UPC.
23. Solé, A. C. (2007). Neumática e Hidráulica (Primera ed.). México: Alfaomega.
24. TECNALIA. (2013). TECNALIA Página Oficial. Retrieved from <http://www.tecnalia.com/es/industria-transporte/eventos/vision-artificial-aplicada-industria.htm>
25. TRENDnet. (2012). TRENDnet Products. Retrieved 12 17, 2012, from http://www.trendnet.com/products/proddetail.asp?prod=150_TU-S9&cat=49
26. Zebra Technologies. (2011). Zebra Home Page. Retrieved 12 17, 2012, from <http://www.zebra.com/us/en/products-services/printers/printer-type/kiosk/kr200-series.html>

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Para tener el conocimiento de los términos más utilizados se menciona a continuación lo siguiente:

Vending Machine: (Máquina Expendedora) Las máquinas expendedoras o tipo vending ofertan un determinado producto o servicio a cambio de un valor económico o una determinada acción que el usuario realiza. Un ejemplo claro de una máquina tipo vending es una máquina que expende chocolates o snacks a cambio de un tipo de moneda.

RVM ó Reverse Vending Machine: (Máquina Expendedora Inversa)

Este tipo de vending machine expende un tipo de producto o medio económico a cambio de la recepción de un producto que el usuario ingresa en la máquina para posteriormente ser procesado. Un ejemplo de este tipo de máquinas son las RVM dedicadas al reciclaje de envases de cartón a cambio de centavos de dólar o algún tipo de incentivo económico.

Polietileno Tereftalato (PET): Es un tipo de polímero perteneciente al grupo de los poliésteres, el cual es muy utilizado en la elaboración de envases de bebidas y productos alimenticios dado que posee una alta resistencia al desgaste y corrosión y además brinda una buena resistencia química y térmica siendo uno de los plásticos más fáciles de reciclar.