

# DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE MÁQUINA VENDING INVERSA PARA LA ACEPTACIÓN, COMPACTACIÓN Y ALMACENAMIENTO DE BOTELLAS PET DE 250 A 3000cm<sup>3</sup> PARA SERPRA CÍA. LTDA.

Pablo Alejandro Del Hierro Calvachi, Rubén Emiliano Albán Naranjo.

Ing. Pedro Merchán, Ing. Alexander Ibarra.

Departamento de Energía y Mecánica - Carrera de Ingeniería Mecatrónica

Escuela Politécnica del Ejército. Marzo-2013

Av. El Progreso S/N, Sangolquí, Ecuador.

## 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 3000cm<sup>3</sup>.

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 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 cumpliendo así con el funcionamiento y características de una máquina inversa dedicada a la actividad del reciclaje adecuado de botellas PET.

## INTRODUCCIÓN

**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. Máquina *vending* dispensadora de bebidas calientes

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.
- Máquinas de juegos de azar.
- Dispensación de prensa escrita.
- *Reverse Vending Machines* para el reciclaje de desechos sólidos.

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 2. Reverse Vending Machine de botellas PET.**

**PET.-** El PET (denominado técnicamente como Polietilén Tereftalato o Politereftalato de Etileno) perteneciente al grupo de los materiales sintéticos denominados poliésteres. En general, el PET, se caracteriza por su elevada pureza, alta resistencia y tenacidad. 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.

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

**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.

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 3. Inspección de nivel de líquido y sellado de botellas utilizando software de Visión Artificial.**

## DISEÑO MECÁNICO

En base a las siguientes especificaciones técnicas de construcción se establece los componentes de la RVM a diseñar la cual debe trabajar en lugares con alta concurrencia de público en ambientes cerrados y adecuados como centros comerciales, parques nacionales, áreas protegidas y centros de instrucción educativa de cualquier tipo. A continuación se presentan las especificaciones con las cuales se parte el diseño tanto de la estructura y los mecanismos de transporte y compactación.

**Tabla 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 <sup>3</sup> .
Capacidad de almacenamiento máximo con mecanismo de compactación	600 botellas de 500cm <sup>3</sup> .

Fuente: SERPRA CÍA. LTDA.

Dadas las características requeridas por la empresa auspiciante se realiza el diseño del mecanismo piñón-cremallera para realizar el transporte de las botellas.



**Figura 4. Sistema Piñón-Cremallera implementado**

Para determinar la fuerza necesaria de compactación se realizó un ensayo con diferentes ejemplares de botellas vacías PET obteniendo un valor de fuerza de 5466N como el necesario para realizar la compactación de las botellas a un tercio de sus dimensiones originales.



**Figura 5. Ensayo de Compresión de botellas PET**

Tomando en cuenta las especificaciones requeridas por la empresa auspiciante se encuentra los siguientes datos para la selección de un cilindro neumático el cual realiza la compactación de las botellas vacías PET de 250 a 3000cm<sup>3</sup>.

**Tabla 2 Especificaciones teóricas del cilindro**

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

Fuente: Propia

Utilizando las cotizaciones de proveedores locales se encuentra un cilindro ISO1500x100 de la marca CHANTO el cual satisface las condiciones de trabajo necesarias para realizar la compactación de los envases. A continuación se muestra el sistema de compactación implementado en la RVM.



**Figura 6. Montaje del Cilindro de Doble Efecto Seleccionado**

Finalmente se realiza las operaciones de montaje de todas las partes y piezas constitutivas de la RVM dando como resultado una máquina compacta y de altas prestaciones.



**Figura 7. Estructura de la RVM – Toma Frontal**

# DISEÑO ELECTRÓNICO AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL

El proceso de control y la automatización de la RVM se basan principalmente en el siguiente flujograma el cual posee se ejecuta con una comunicación constante entre el dispositivo embebido de control y la interfaz interactiva que dispone el usuario.

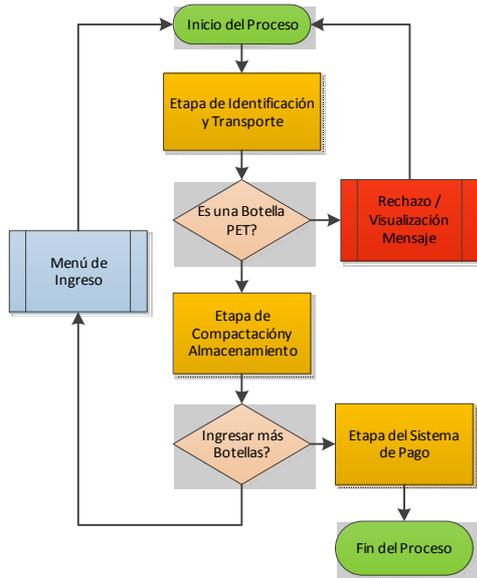


Figura 8. Diagrama de Flujo del Proceso de Automatización

Posteriormente se establecen las etapas a ser controladas y monitoreadas siendo la más importante la de identificación y transporte dado que en dicha etapa se realiza la discriminación de cualquier objeto ingresado en la RVM ya sea botellas PET vacías o cualquier otro objeto que los usuarios pretendan ingresar. Los parámetros físicos a detectarse por medio de los dispositivos de instrumentación que dispone la RVM son los siguientes:

- Detección de Presencia del objeto ingresado.
- Peso del envase vacío (entre 12 a 50 gramos)
- Forma del envase (variable).

Determinados los parámetros que podrán ser identificados los sensores y dispositivos implementados se necesita procesar la información de cada uno de las etapas recurriendo a los sistemas de control que son monitoreados y supervisados por un dispositivo programable que pueda ser capaz de obtener las lecturas de los sensores digitales, analógicos y discretos de cada una de las etapas. El dispositivo de control

seleccionado es un microcontrolador dadas las prestaciones que se necesitan para la presente aplicación del prototipo.

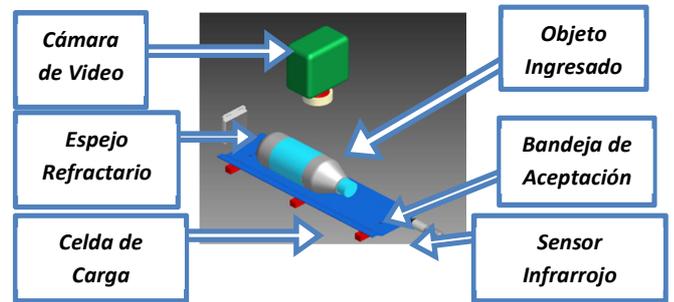


Figura 9. Componentes del Sistema de identificación.

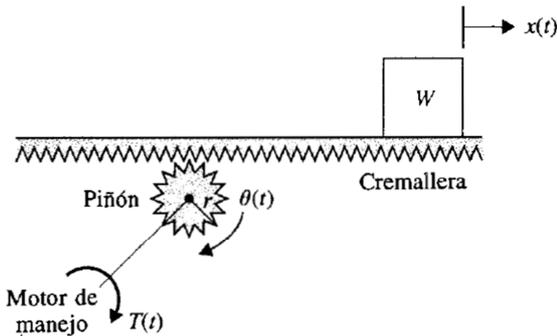
**Etapas de Identificación y Transporte:** En dicha etapa se realiza dos acciones principales, la identificación del objeto ingresado y el transporte del mismo ya sea a la cavidad destinada para la compactación o hacia la cavidad de rechazo.

El sistema de identificación verifica si existe la presencia de un objeto en la cavidad de aceptación de la RVM, lo pesa utilizando una celda de carga acondicionada y posteriormente realiza una inspección basada en visión artificial utilizando para éste proceso el software *Vision Builder® 2009* de *National Instruments®* en su versión a prueba en el desarrollo del presente prototipo de RVM. Los resultados de la inspección arrojan datos filtrados digitalmente de las imágenes, capturadas mediante una cámara USB, comparando cada una de ellas con las clases de todas las formas de los diferentes envases y marcas de botellas PET de los volúmenes especificados disponibles en el mercado nacional a reconocer como válidas comunicando el resultado de la inspección al dispositivo principal de control.



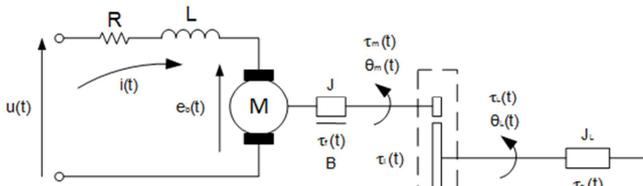
Figura 10. Resultados Obtenidos en la Fase de Validación de Forma para una botella PET de 500cm<sup>3</sup> con *Vision Builder® AI 2009*

El sistema de transporte se encuentra compuesto del mecanismo piñón-cremallera diseñado para ubicar el objeto identificado como válido en la cavidad de compactación, y caso contrario trasladarlo a la cavidad de rechazo. Para llevar a cabo esta acción se diseña un sistema de control de posición en lazo cerrado para el motor eléctrico DC seleccionado para realizar el movimiento rotacional del piñón que transforma mediante la cremallera a un movimiento de desplazamiento lineal.



**Figura 11. Carga mecánica del Sistema Piñón – Cremallera transmitida al motor de corriente continua**

Realizando el modelado matemático del sistema representado en la figura anterior se establece lo siguiente:



**Figura 12. Esquema mecánico y eléctrico del motor DC con carga**

Sistema puede ser representado por las ecuaciones diferenciales que siguen:

Ecuación eléctrica – Leyes de Kirchhoff:

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

Ecuación mecánica – Leyes de Newton:

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

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 carga visto en el eje del motor
- $\tau_f(t)$ : Par de fricción
- $R$ : Resistencia eléctrica
- $L$ : Inductancia eléctrica
- $J_e$ : Momento de inercia eficaz

Aplicando la transformada de la Laplace a las ecuaciones eléctricas y mecánicas respectivamente 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 para la posición angular del motor:

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

La función de transferencia  $G_u(s)$  puede ser escrita como un sistema realimentado en el que el acoplo eléctrico se encuentra en el lazo realimentado y el acoplo mecánico en el lazo directo como se ilustra en la figura 12 donde  $G_u(s)$  es una función de transferencia de los circuitos eléctrico y mecánico de un motor de corriente continua desacoplado<sup>1</sup>,

$$G_u(s) = \frac{1}{(Ls + R) \cdot (J_e \cdot s + B)}$$

Tomando las muestras del sistema implementado y analizándolas con la herramienta "ident" del software Matlab<sup>®</sup> se puede llegar a identificar los posibles controladores de la función de transferencia encontrada.

<sup>1</sup> (Monasterio Huelin & Gutiérrez, 2012, pág. 8)

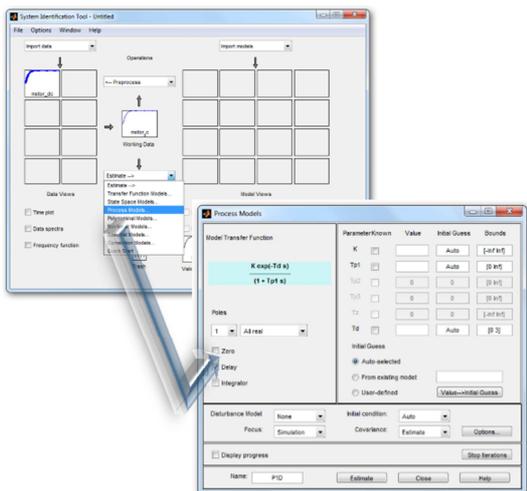


Figura 13. Ventana de proceso de modelado de sistemas

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 significativas<sup>2</sup>.

Considerando los parámetros de desempeño como el tiempo de subida, el tiempo de establecimiento se ejecuta las posibles acciones de control proporcionales, integrales y derivativas analizando cada una de las posibles combinaciones obteniendo el controlador PI como el más óptimo para la presente aplicación.

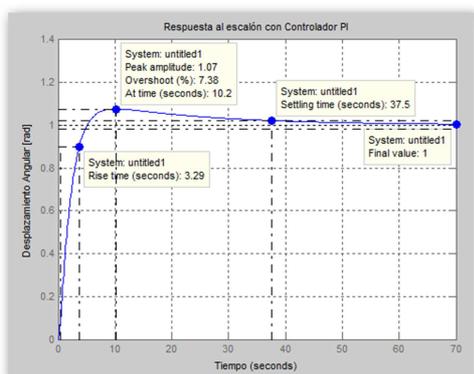


Figura 14. Parámetros de desempeño obtenidos del sistema implementado con un controlador PI

**Etapas de Compactación y almacenamiento:** En dicha etapa se realiza dos acciones principales, la compactación de la botella PET válida utilizando el sistema neumático accionado por un cilindro de doble efecto y la comprobación del almacenamiento de la botella en la cesta destinada para la recolección.

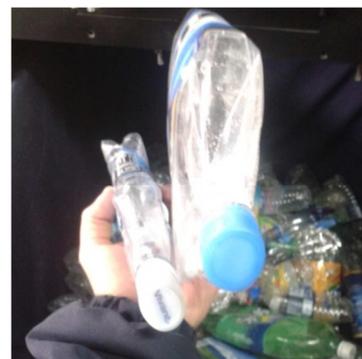


Figura 15. Botellas PET de 500 y 3000cm<sup>3</sup> compactadas a un tercio de su tamaño original.

**Etapas del Sistema de Pago:** En la presente etapa se realiza la emisión de un ticket impreso en papel térmico cuando el usuario haya terminado de ingresar las botellas que requiera reciclar.



Figura 16. Ticket Impreso para tres botellas almacenadas.

El correcto funcionamiento de cada una de etapas monitoreadas y controladas por el dispositivo embebido seleccionado comunica los resultados de cada una de ellas a la interfaz visual y auditiva que el usuario percibe en la parte frontal de la máquina.

Por último se realiza la programación del microcontrolador de cada sistema de control de cada una de las etapas las cuales al pasar satisfactoriamente por las condiciones destinadas a la validación y el correcto funcionamiento de la RVM comunicando el estado operativo de la máquina a la interfaz para el conocimiento del

<sup>2</sup> (Dorf & Bishop, pág. 723)

usuario mediante la utilización del protocolo serial estándar RS232.

## DESARROLLO DE LA INTERFAZ COMPUTACIONAL

Los requerimientos con los que deberá contar la interfaz computacional se derivan de las etapas de la RVM para que sirvan de guía y enlace en el desarrollo de la misma para que pueda brindar al usuario las siguientes prestaciones:

- ✓ Deberá contar con imágenes animadas que garanticen una fácil y adecuada utilización de la máquina.
- ✓ Disponer de una comunicación constante con la tarjeta electrónica de control mediante el protocolo RS232.
- ✓ 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.

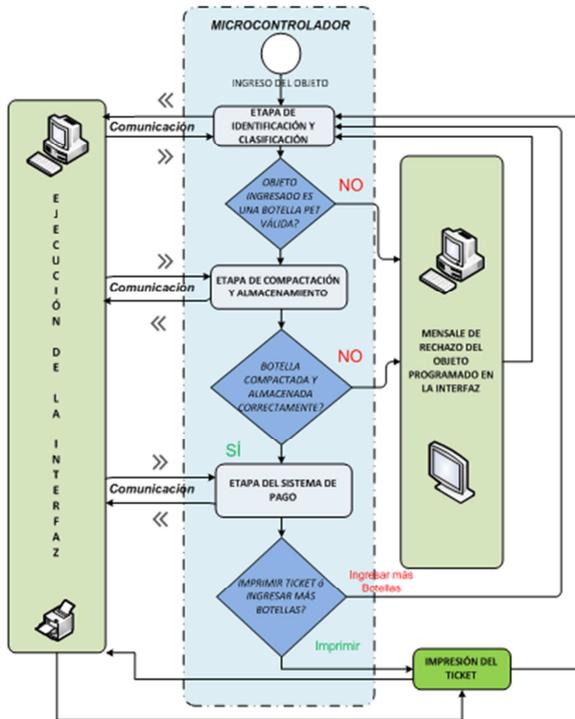
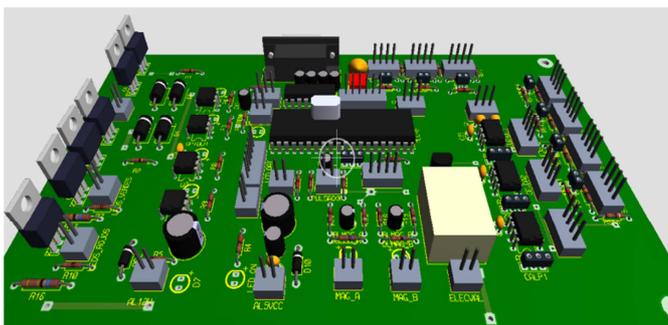


Figura 17. Diagrama de Flujo del Algoritmo de Programación

Finalmente se diseña la tarjeta de control principal tomando en cuenta todos los circuitos de acondicionamiento de señal de cada uno de los sensores utilizados así como a su vez el dimensionamiento de los drivers de control de los actuadores siguiendo las recomendaciones vigentes de la norma ANSI-IPC2221<sup>3</sup> orientadas al diseño de circuitos electrónicos impresos.



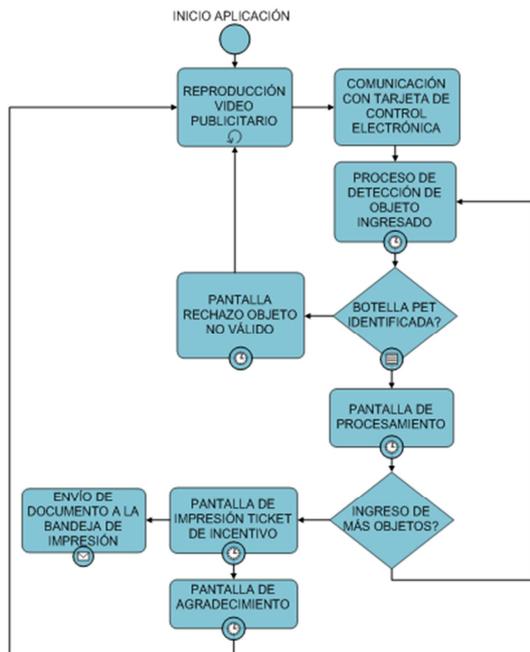


Figura 19. Diagrama de Flujo de la Interfaz Visual.

Se destaca que cada una de las pantallas utilizará herramientas orientadas a la visualización gráfica de imágenes, reproducción de archivos de audio y video, animaciones como barras de progreso y a su vez la comunicación constante del proceso con la tarjeta electrónica de control. A continuación se muestra una de las pantallas que la interfaz despliega en su funcionamiento.



Figura 20. Pantalla visual para impresión de objetos

## CONCLUSIONES Y RESULTADOS

Como resultado final de todas las pruebas realizadas se encontró las siguientes conclusiones y recomendaciones orientadas a mejorar el prototipo de RVM orientado al reciclaje de botellas PET. *(Para información más detallada del presente desarrollo referirse al proyecto de grado completo).*

- 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

3000cm<sup>3</sup> 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.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

*Las referencias listadas a continuación han sido utilizadas para el desarrollo completo de cada uno de los capítulos del proyecto de grado "Diseño y Construcción de un Prototipo de Máquina Vending Inversa para la Aceptación, Compactación y Almacenamiento de Botellas PET de 250 a 3000cm<sup>3</sup>"*

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 Dinamic 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?xItem=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](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](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-Heinemann.
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](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>