

Automation of the control process of a fruit labeler using state machines

(cover page)

Izler Friss Valdivia Lajo, Bach. , Jorge Leonardo Huarca Quispe, Mag. y Juan Carlos Cutipa Luque, Phd
Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa - Perú, ivaldivial@unsa.edu.pe
Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa - Perú, jhuarcaq@unsa.edu.pe
Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa - Perú, jcutipalu@unsa.edu.pe

Abstract – *In this article the automation of a label dispenser system for fruits using a programmable logic controller PLC is presented. The finite state machine method is used for the system and programming design, the boolean algebra and the Karnaugh maps allow simplifying the transition table of a Moore state machine. These methods permit a simplified implementation process for the Ladder language using industrial IEC 61131-3 standard. Experimental results performed with a prototype have validated the propose in acceptable levels, enabling the labeling of the fruits transported in the process.*

Keyword: *state machines, Ladder language, label dispenser, digital systems simplification.*

Automatización del proceso de control de una etiquetadora de frutas usando máquinas de estados

Izler Friss Valdivia Lajo, Bach. , Jorge Leonardo Huarca Quispe, Mag. y Juan Carlos Cutipa Luque, Phd
Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa - Perú, ivaldivial@unsa.edu.pe
Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa - Perú, jhuarcaq@unsa.edu.pe
Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa - Perú, jcutipalu@unsa.edu.pe

Abstract – El presente artículo presenta la automatización de un sistema dispensador de etiquetas para frutas utilizando un controlador lógico programable PLC. Se usa el método de máquinas de estado finitas para el diseño del sistema y su programación, el álgebra booleana y los mapas de Karnaugh permiten simplificar la tabla de transiciones de una máquina de estados de tipo Moore. Estos métodos permiten un proceso de implementación simplificado para el lenguaje Ladder, estándar industrial IEC 61131-3. Los resultados experimentales, realizados en un prototipo, validaron la propuesta de forma aceptable, permitiendo etiquetar las frutas que transporta el proceso.

Keyword: máquinas de estados, lenguaje Ladder, dispensador de etiquetas, simplificación de sistemas digitales.

I. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, en países en vías de desarrollo como es el caso de Perú, existe la necesidad de automatizar procesos agro-industriales o parte de ellos, como es el caso del etiquetado de frutas.

Existen diferentes métodos o soluciones para la automatización de un proceso con PLC (controlador lógico programable) como es el caso de [1] "Diseño, Construcción y Automatización de Sistema de Etiquetado de Envases Pet para Proceso de Producción de Bebidas en la Empresa Yoguis SRL.", que realizó el proceso de etiquetado mediante un sistema de transporte de envases, un sistema de etiquetado y un sistema envolvente. Así como el en caso [2] que tuvo como objetivo obtener un etiquetado de cajas, mediante un sistema electrónico automatizado y utilizando el chasis de una máquina etiquetadora brindado por la empresa SISCODE S.A. cuyo resultado fue la implementación del sistema automático etiquetador. En varios de estos trabajos no hacen hincapié en la metodología de la programación, es por esta razón que se utilizan las herramientas que nos proporciona electrónica digital como el caso de álgebra booleana, máquinas de estado, mapas de Karnaugh, etc. para el control de sistemas lógico secuencial.

Las máquinas de estado son comunes en procesos de circuitos digitales, sin embargo, hoy en día son usados en el control industrial. La metodología de usar una máquina de estados finitos (FSM) proporciona al programador un formalismo necesario al momento de programar automatismos

de eventos secuenciales discretos, el cual utiliza una lógica matemática, por ejemplo, en un proceso industrial se presenta una secuencia de instrucciones a ser ejecutadas, donde cada instrucción depende del estado actual o un estado anterior de la máquina, y a su vez cada estado depende de las entradas y salidas de esta. Viendo esta ventaja, la FSM se utiliza en distintas aplicaciones de autómatas con máquinas de estados finitos, como el control de asesores, el control en la industria automotriz, el control de operaciones de semáforos, control de sistemas de envasados y etiquetados, etc. [8]

Por ende, este documento trata de automatizar el etiquetado de frutas controlado por un PLC utilizando en la programación el método de máquinas de estado en lenguaje Ladder aportando la simplificación de las ecuaciones de control y ser objetivos a la hora de la programación en lenguaje Ladder.

II. MARCO TEÓRICO

A. Etiquetadoras de frutas

El etiquetado en frutas facilita al comprador obtener información sobre las características de dichos productos: naturaleza, país de origen, fecha de vencimiento, calidad, entre otras; esto permite al consumidor adquirir y consumir con conocimiento pleno el producto que compra [3]. Hoy en día se emplean diferentes alternativas para el etiquetado de frutas, en este proyecto nos centramos en la automatización del etiquetado de contacto directo mediante etiquetas autoadhesivas. Este tipo de etiquetado se puede realizar de varias maneras: a mano, con máquina etiquetadora manual o con máquina etiquetadora automática.



Fig. 1. Tipos de etiquetado sobre fruta desnuda. [4]

B. Mapa de Karnaugh

Un mapa de Karnaugh es una herramienta gráfica que se utiliza para simplificar una ecuación lógica o para convertir una tabla de verdad en un circuito lógico. Esta gráfica,

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).
DO NOT REMOVE

generalmente, se usa para resolver problemas con cualquier número de variables. [5]

C. Máquinas de estados

En relación a la automatización por medio de máquinas de estado, existen dos tipos Moore y Mealy, La máquina tipo Moore las salidas del sistema dependen únicamente del estado en el que encuentran, mientras que en el caso tipo Mealy las salidas del sistema dependen del estado activo y de las entradas del sistema. [6].

III. METODOLOGÍA

En este trabajo se realizará la automatización de un sistema dispensador de etiquetas utilizando un controlador PLC por medio del modelo de programación máquina de estados. En una primera etapa, se obtendrá la representación del funcionamiento del sistema dispensador de etiquetas por medio de un diagrama de flujo. En una segunda etapa, se elaborará el diseño de la máquina de estados del proceso, para esto se utiliza el modelo de máquina de estados tipo Moore, la cual contará con 3 estados: detenido, buscar etiqueta y buscar blanco. En una tercera etapa, se obtendrá las expresiones lógicas simplificadas del sistema tanto para la evolución de los estados, así como para las salidas del sistema, para realizarlo nos apoyamos de las tablas de transiciones (para la evolución de estados) y de salidas, para la simplificación nos apoyaremos por medio del método de mapas de Karnaugh y álgebra booleana. Finalmente, ya teniendo las ecuaciones del sistema, se procederá a traspasarlas a lenguaje Ladder, simuladas en este caso por medio del PLC AMX-FX3U, donde se realizarán simulaciones comprobando el correcto funcionamiento de la máquina de estados para controlar el sistema dispensador de etiquetas.

IV. DESARROLLO

Para validar el funcionamiento se ha realizado un prototipo de máquina etiquetadora de frutas se basará en dos sistemas: el sistema transportador de frutas y el sistema dispensador de etiquetas.

- **Sistema transportador de frutas**

El control del sistema transportador en el cual se desplazan las frutas, se basa en una faja transportadora accionada por un motorreductor trifásico. Este motor es gobernado por un variador de frecuencia SINAMIC V20, que a su vez es controlado por el PLC ANSAMOTION AMX-FX3U mediante el protocolo de comunicación MODBUS.

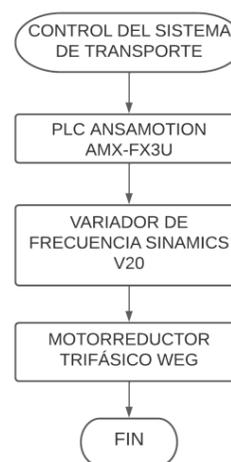


Fig.2. Diagrama de flujo accionamiento del motor trifásico.

Para la fabricación de la faja transportadora se usó la correa de goma, colocando las 10 bases de las botellas de plástico a lo largo de la correa de goma dentada; esto con el fin de servir como recipiente para cada fruta. El eje del motor trifásico estará conectado a un rodillo transportador mediante la correa de transmisión industrial, esto permitirá el movimiento de la faja transportadora.



Fig.3. Vista de la estructura del sistema de transporte de frutas

- **Sistema dispensador de etiquetas**

El sistema dispensador de etiquetas funciona mediante el control del motor paso a paso que es comandado por el driver de control 2DM542. El movimiento de este motor está sujeto a las señales que emiten el sensor de frutas y el sensor de etiquetas.

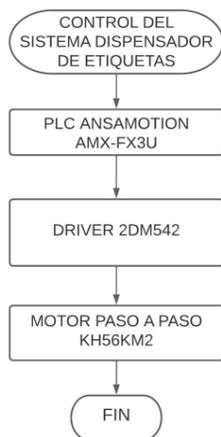


Fig. 4. Diagrama de flujo de accionamiento del motor paso a paso.

El sistema dispensador de etiquetas se divide en 2 partes:

- ❖ Sistema alimentador: Este sistema está conformado por la posición de pernos que servirán de guía a la cinta de etiquetas hasta llegar a una posición óptima para etiquetar las frutas. El rollo de etiquetas se mantendrá en estado inerte esperando el accionamiento del sistema recolector.
- ❖ Sistema recolector: Este sistema actúa en sincronía con el sistema alimentador, el cual es accionado por el motor paso a paso que sigue los órdenes del PLC y sensores. El sistema recolector es encargado de recibir el residuo de la cinta de etiquetas mediante la polea de distribución, además, se encarga de tensar y tirar de la cinta de etiquetas cada vez que se haya etiquetado una fruta. Se realiza un tensado en la cinta que contiene las etiquetas de tal manera que las etiquetas se puedan despegar de la cinta que los contiene.

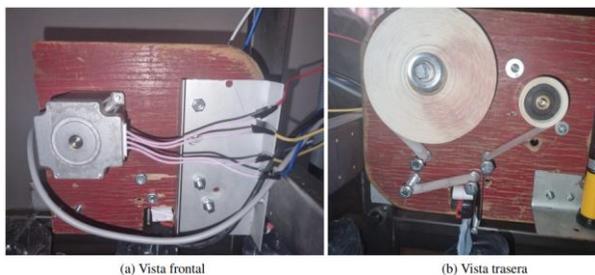


Fig. 5. Vista de la estructura del sistema dispensador de etiquetas.

En este trabajo nos enfocaremos en el control del sistema dispensador de etiquetas. Como se explicó anteriormente, este sistema será controlado por un motor paso a paso, que a su vez será comandado por el driver de control 2DM542, este obedecerá las órdenes del PLC AMX-FX3U según la emisión de señales del sensor de etiquetas y sensor de frutas.

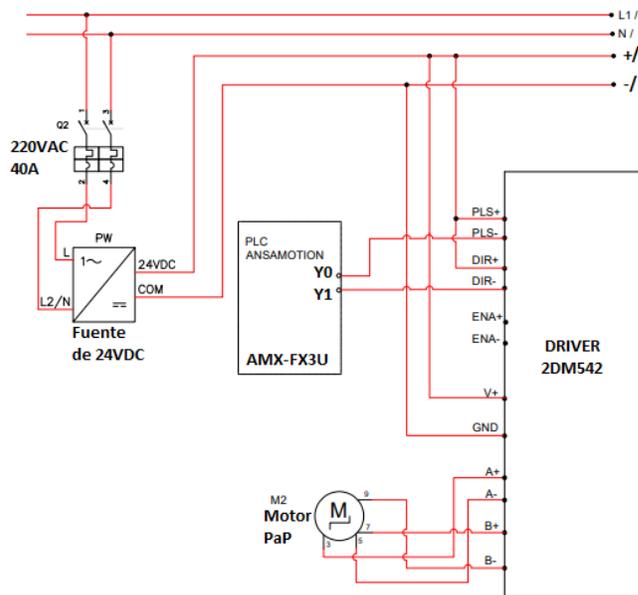


Fig. 6. Conexión eléctrica de PLC, driver 2DM542 y motor paso a paso.

La figura 4 muestra el diagrama de flujo del accionamiento del motor paso a paso. Luego se procede a realizar el conexionado entre el PLC, el driver de control y el motor paso a paso, como muestra la figura 6.

Ya teniendo el conexionado, se procede a la programación del sistema dispensador de etiquetas. Esta se basará en controlar el motor paso a paso mediante las señales que emitirán el sensor de etiquetas y el sensor de frutas.

- ❖ El sensor de etiquetas emite una señal de conmutación en el espacio libre entre etiquetas (detecta blanco y no etiqueta).



Fig. 7. Señal de conmutación del sensor de etiquetas

- ❖ Por otro lado, el sensor de frutas emite una señal de conmutación al detectar una fruta.

La tabla 1 muestra las señales de conmutación del sensor de etiquetas y del sensor de frutas.

TABLA I
SEÑALES DE CONMUTACIÓN DE LOS SENSORES

Sensor	Señal de conmutación
Sensor de etiquetas: SE	1 : detecta blanco 0 : detecta etiqueta
Sensor de frutas: SF	1 : detecta fruta 0 : no detecta fruta

La figura 8 muestra un diagrama de flujo que indica el funcionamiento del dispensador de etiquetas. En primer lugar, el motor paso a paso inicia en estado de reposo, esto quiere decir, que el sensor de etiquetas está detectando un espacio blanco. Si el sensor de etiquetas no detecta espacio en blanco, el motor paso a paso pasará a encenderse hasta encontrar un espacio en blanco, y así volverá en estado de reposo. Por otro lado, si el sensor de frutas detecta una fruta, el motor paso a paso se moverá y el sensor de etiquetas detectará una etiqueta; una vez que se ha detectado una etiqueta, el motor paso a paso seguirá moviéndose hasta que el sensor de etiquetas detecte un espacio en blanco, donde finalmente el motor permanecerá en estado de reposo.

Con el diagrama de flujo mostrado anteriormente y según Jack [7] en su libro "Automating Manufacturing Systems with PLCs.", es posible solucionar el sistema de control del dispensador de etiquetas utilizando una máquina de Moore, la cual es una máquina de estados finitos que será simplificada mediante mapas de Karnaugh obteniendo ecuaciones lógicas del sistema, las cuales se traspasaran a lenguaje Ladder. La figura 9 muestra la máquina de estados del sistema dispensador, la cual contará con 3 estados, detenido, buscar etiqueta y buscar blanco; dos entradas, sensor de etiquetas (SE) y sensor de frutas (SF); y una salida, motor paso a paso (Q).

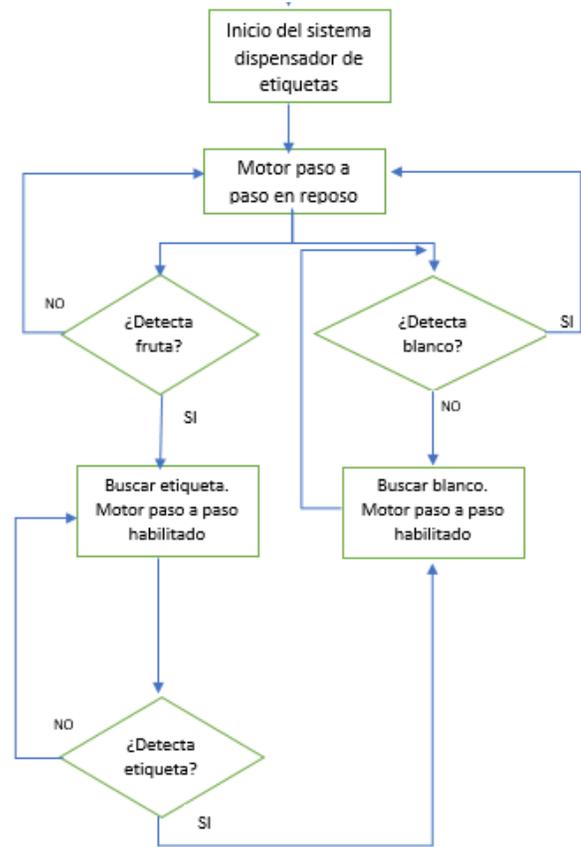


Fig. 8. Diagrama de flujo del funcionamiento del sistema dispensador de etiquetas.

- **Estado detenido 00:** En este estado el motor está detenido ($Q=0$). Para que esto se cumpla, el sensor de etiquetas debe detectar blanco ($SE=1$) y el sensor de fruta no debe detectar fruta ($SF=0$). Luego para pasar al estado buscar etiqueta, el sensor de fruta debe detectar una fruta ($SF=1$) y el sensor etiqueta debe detectar blanco ($SE=1$). Finalmente, para pasar al estado buscar blanco, el sensor de etiquetas debe detectar una etiqueta ($SE=0$) y el sensor de frutas debe o no debe detectar una fruta ($SF=0$ o $SF=1$).
- **Estado buscando etiqueta 01:** En este estado se busca una etiqueta, por lo tanto, el motor está encendido ($Q=1$). Para que esto se cumpla, el sensor de etiquetas debe detectar un blanco ($SE=1$) y el sensor de frutas debe o no debe detectar una fruta ($SF=1$ o $SF=0$). Para pasar al estado buscar blanco, el sensor de etiquetas debe detectar etiqueta ($SE=0$) y el sensor de frutas debe o no debe detectar una fruta ($SF=1$ o $SF=0$).
- **Estado buscando blanco 10:** En este estado se busca un blanco, por lo tanto, el motor está encendido ($Q=1$). Para esto que esto se cumpla, el sensor de etiquetas debe detectar etiqueta ($SE=0$) y el sensor de frutas debe o no

debe detectar fruta (SF=1 o SF=0). Para pasar al estado detenido, el sensor de etiquetas debe detectar un blanco (SE=1) y el sensor de frutas debe o no debe detectar una fruta (SE=0 o SF=1).

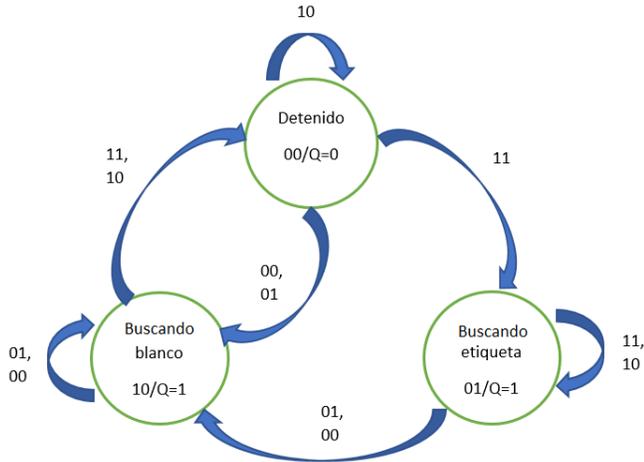


Fig. 9. Máquina de estados del sistema dispensador de etiquetas

Una vez hecha la máquina de estados como muestra la figura 9 se procede a ejecutar la tabla de transiciones, sabiendo que por cada estado deben salir 2^n transiciones, donde n es el número de entradas. Para este caso se tiene 2 entradas, por lo tanto, hay 4 transiciones por estado. Por otro lado, para calcular el número de biestables se tiene la fórmula $2^n \geq N$, en donde N es el número de estados y n es el número de biestables. En este caso se usa 2 biestables, ya que se tiene 3 estados: $2^2 \geq 3$.

TABLA II
TABLA DE TRANSICIONES

Estado actual		Entradas		Estado siguiente	
E1	E0	SE	SF	E1+	E0+
0	0	0	0	1	0
0	0	0	1	1	0
0	0	1	0	0	0
0	0	1	1	0	1
0	1	0	0	1	0
0	1	0	1	1	0
0	1	1	0	0	1
0	1	1	1	0	1
1	0	0	0	1	0
1	0	0	1	1	0
1	0	1	0	0	0
1	0	1	1	0	0
1	1	X	X	X	X
1	1	X	X	X	X
1	1	X	X	X	X
1	1	X	X	X	X

En la tabla 2, se puede observar que son muchas variables, por consiguiente, se procede a simplificar las funciones lógicas mediante mapas de Karnaugh. La figura 10 muestra el mapa de Karnaugh de 4 variables de entrada para hallar la expresión lógica simplificada del biestable E1 del estado siguiente. Una vez llenado el mapa según los valores de la tabla de

transiciones, se forman grupos de unos, cabe resaltar que a la hora de simplificar por Karnaugh, la X, valor indeterminado, tomará el valor 1 o 0 según sea conveniente, para este caso será de valor 1, ya que se formará grupos de celdas que contengan el valor 1.

E1E0		SESF			
		00	01	11	10
00	1	1	0	0	
01	1	1	0	0	
11	X	X	X	X	
10	1	1	0	0	

Fig. 10. Mapa de Karnaugh para el biestable E1+

Luego de formar el grupo rosa de 8 celdas con valor 1, se procede a evaluar qué variables cambian y cuáles permanecen iguales. Las variables E1, E0, SF cambian, por lo tanto, se eliminan; sin embargo, la variable SE no cambia, entonces la expresión lógica simplificada del biestable E1+ es:

$$E1 = \overline{SE}$$

De igual forma, para hallar la expresión lógica simplificada del biestable E0+, se elabora un mapa de Karnaugh, en donde se forman 2 grupos de unos, 1 grupo de 2 celdas con valor 1 y otro grupo de 4 celdas con valor 1, asumiendo que la X vale 1, tal como muestra la figura 11.

E1E0		SESF			
		00	01	11	10
00	0	0	1	0	
01	0	0	1	1	
11	X	X	X	X	
10	0	0	0	0	

Fig. 11. Mapa de Karnaugh para el biestable E0+

Una vez formados los grupos de las celdas con valor 1, se observa qué variables cambian y cuáles permanecen igual. Para el grupo verde, se observa que las variables E1, SE y SF no cambian; y para el grupo rosa, se observa que las variables E0 y SE no cambian, entonces la expresión lógica simplificada del biestable E0+ es:

$$E0 = E0 \times SE + SE \times SF \times \overline{E1}$$

Ya habiendo evaluado y simplificado los biestables E0+ y E1+ de la tabla de transiciones, se procede a evaluar la salida Q como se muestra en la tabla 3, cuyas entradas son los estados actuales según la máquina de Moore.

TABLA III
TABLA DE SALIDAS

Estado actual		Salida
E1	E0	Q
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	X

A comparación de la tabla de transiciones, la tabla de salidas tiene menos variables para evaluar, por lo tanto, se minimiza usando maxtérminos, asumiendo que X vale 1. Finalmente, la expresión lógica simplificada de la salida es:

$$Q = E1 + E0$$

V. RESULTADOS

Teniendo las ecuaciones lógicas simplificadas de los biestables E0+, E1+ y de la salida Q, se procede a traspasarlas en lenguaje Ladder. Según Jack [7] para la compuerta OR o suma, los contactos se conectan en paralelo; y para la compuerta AND o multiplicación, los contactos se conectan en serie. Con esta información, se programa el siguiente Ladder, donde la entrada X6 es el sensor de etiquetas SE, la entrada X5 es el sensor de frutas SF, la marca M21 es el estado E1 y la marca M20 es el estado E0.

- ❖ La primera rutina indica la activación del biestable E0+ según su ecuación lógica simplificada.

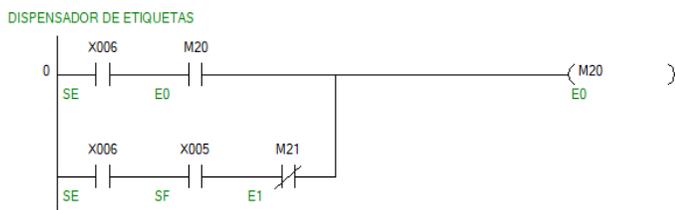


Fig. 12. Primera rutina Ladder para biestable E0+

- ❖ La segunda rutina indica la activación del biestable E1+ según su ecuación lógica simplificada.



Fig. 13. Segunda rutina Ladder para biestable E1+

- ❖ La tercera rutina indica la activación de la salida Q, es decir el motor paso a paso, según su ecuación lógica simplificada. La instrucción de salida PLSV en el Ladder será la encargada de mandar señales al driver 2DM542 para controlar el movimiento del motor paso a paso, cabe resaltar que esta instrucción solo funciona para PLCs con salida a transistor.

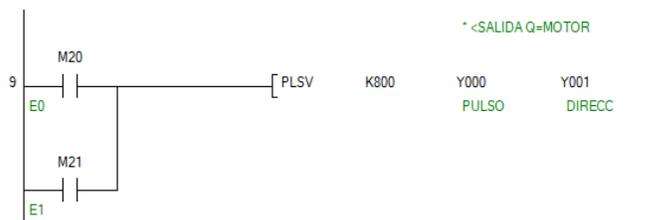


Fig. 14. Tercera rutina Ladder para la salida Q

Las figuras 12, 13 y 14, indican las rutinas de lenguaje Ladder del control del sistema dispensador de etiquetas, el cual, conjuntamente con las rutinas del control del sistema transportador de frutas (control de un variador de frecuencia mediante el PLC para el accionamiento del motor de la faja transportadora), se logró realizar la programación completa para la automatización de la máquina automática etiquetadora de frutas. (Ver Anexo 1)

Para poder evaluar el tiempo del etiquetado automático, primero se debe considerar la frecuencia óptima brindada por el variador SINAMIC V20. La tabla 4 muestra el porcentaje de frutas etiquetadas correctamente en una muestra de 10 a una determinada frecuencia.

TABLA IV

PORCENTAJE DE FRUTAS ETIQUETADAS A UNA DETERMINADA FRECUENCIA

Frecuencia VFD. (Hz)	Frutas etiquetadas correctamente (%)
12	70
16	90
20	80
24	70
28	50

Según la tabla anterior, se puede determinar que, la frecuencia adecuada es 16 Hz, ya que tiene un porcentaje de etiquetado del 90 %. Sabiendo esto, se elabora una prueba de tiempos de cuántas frutas son etiquetadas a la frecuencia de 16 Hz, tal como se puede apreciar en la tabla V.

TABLA V

CANTIDAD DE FRUTAS ETIQUETADAS AUTOMÁTICAMENTE

Frecuencia VFD. (Hz)	Frutas/Minuto	Frutas/Hora
16	14	840

La figura 15 muestra la vista frontal de la máquina automática etiquetadora de frutas, en donde podemos apreciar la integración del sistema transportador de frutas, el sistema dispensador de etiquetas y un tablero eléctrico de control. La figura 16 muestra el tablero eléctrico internamente, en donde podemos apreciar el PLC AMSOMOTION AMX-FX3U, el cual se programa en lenguaje Ladder; un variador de frecuencia SINAMIC V20, que controlara el motor de la faja del sistema transportador de frutas y un Driver de pulso 2DM542, el cual conjuntamente con un motor paso a paso controlara el sistema dispensador de etiquetas.



Fig. 15. Vista frontal máquina etiquetadora de frutas



Fig. 16. Vista interna del tablero de control



Fig. 17. Puesta en marcha de la máquina etiquetadora de frutas

A continuación, se adjunta enlaces de videos donde se puede visualizar el funcionamiento de la máquina etiquetadora automática etiquetadora de frutas.

- Explicación del sistema y componentes.
<https://www.youtube.com/watch?v=dxX1EqG0IRI>
- Puesta en marcha de la máquina etiquetadora de frutas
<https://www.youtube.com/watch?v=Sy7HebmPhz8>

CONCLUSIONES

La automatización de procesos industriales es de alta demanda y cada vez más frecuentes en países en desarrollo. Este trabajo presentó la automatización de un proceso de etiquetado de frutas, basado en el método de máquinas de estados finitas que se apoya en los métodos del álgebra booleana y mapas de Karnaugh en la búsqueda de una simplificación apropiada y simplificada para el lenguaje Ladder.

Se logró diseñar e implementar un prototipo de máquina automática etiquetadora de frutas mediante un controlador programable, teniendo como base de programación el lenguaje Ladder.

Los resultados mostraron una asertividad en el etiquetado automático de frutas, superior a 90%, dependiendo de la velocidad del variador de frecuencia.

Trabajos futuros deben explorar la incertidumbre de los mecanismos para aumentar aún más la asertividad del proceso automatizado.

REFERENCIAS

- [1] Ojeda, "Diseño, Construcción y Automatización de Sistema de Etiquetado de Envases Pet para Proceso de Producción de Bebidas en la Empresa Yoguis SRL.", 2017.
- [2] Broncano, "Diseño e implementación del sistema de control de un equipo etiquetador autoadhesivo automático", 2018.
- [3] M. Moraga, "Normas de información alimentaria etiquetado y marcado de los productos alimenticios", 2017.
- [4] J. J. Martínez Moya, "Etiquetado de frutos ecológicos: Caracterización de la adhesividad de diferentes tipos de etiquetas,," Tesis de grado, Universidad de Almería, 2021.
- [5] Luis Tapia Fabela. "Presentación sobre Método de mapas de Karnaugh"
- [6] Adam Klimowicz. "The Synthesis of Combined Mealy and Moore Machines Structural Model Using Values of Output Variables as Codes of States", 2012
- [7] H. Jack, "Automating Manufacturing Systems with PLCs", 2008
- [8] Alavi, M., Aliaga, S., & Murga, M. Máquinas de Estado Finito. Revista de Investigación Estudiantil Illuminate, 8, 41. 2016
- [9] Provost, Julien, Jean-Marc Roussel, and Jean-Marc Faure. "Testing programmable logic controllers from finite state machines specification." 2011 3rd International Workshop on Dependable Control of Discrete Systems. IEEE, 2011.
- [10] Cohenour, Curtis. "Teaching finite state machines (FSMs) as part of a programmable logic control (plc) course." 2017 ASEE Annual Conference & Exposition. 2017.
- [11] Barkalov, Alexander, et al. "Background of finite state machines and programmable logic." Logic synthesis for fpga-based finite state machines 1-31. 2016
- [12] Bolton, Martin. Digital systems design with programmable logic. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1990.
- [13] Czerwinski, Robert, and Dariusz Kania. Finite state machine logic synthesis for complex programmable logic devices. Vol. 231. Springer Science & Business Media, 2013.

ANEXOS

Anexo 1

Ladder completo de la maquina automática etiquetadora en GXWORK2

