

SISTEMA DE MONITOREO PARA UN EQUIPO DE ESTUDIOS DE TIEMPOS Y MOVIMIENTOS

José Antonio Lara Chávez

Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco *jalch@correo.azc.uam.mx*

Miguel Magos Rivera

Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco
mrm@correo.azc.uam.mx

Miguel Ángel Figueroa Sánchez

Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco
miguelfisan@gmail.com

Miguel Ángel López Ontiveros

Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco
mlopez@correo.azc.uam.mx

Lisaura Walkiria Rodríguez Alvarado

Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco
lwra@correo.azc.uam.mx

Jesús Loyo Quijada

Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco
lqj@correo.azc.uam.mx

Resumen

Los laboratorios de Ingeniería Industrial de la UAM-Azcapotzalco cuentan con equipos que sirven como apoyo para la enseñanza de asignaturas relacionadas con el estudio y mejoramiento de la productividad de procesos industriales. En este artículo se describe el diseño y construcción de un sistema que permite desplegar en una pantalla información asociada al desarrollo de experimentos relacionados con el estudio de tiempos y movimientos. El prototipo construido obtiene información del equipo encargado de controlar la secuencia de operación del sistema didáctico. A partir de estos datos se despliegan diversas pantallas que

permiten a los operadores conocer información de las principales variables asociadas al ejercicio como son: modo de operación, tiempos de ciclo, tiempos por estación, número de piezas elaboradas, etc. El sistema basa su funcionamiento en una computadora embebida Raspberry, el intercambio de información entre ésta y el Controlador Lógico Programable del equipo didáctico se realiza mediante el protocolo Modbus. Pruebas realizadas han demostrado una operación correcta del prototipo, mismo que se empezará a utilizar en el siguiente período lectivo.

Palabras Claves: Controladores Lógicos Programables, Modbus IP, Monitoreo de la Producción, Raspberry, Sistema Andon.

Abstract

The Industrial Engineering Laboratories of the UAM-Azcapotzalco have equipment that serves as support for the teaching of subjects related to the study and improvement of the productivity of industrial processes. This article describes the construction of a system to display on screen, information associated with the development of experiments related to time and motion studies. This prototype obtains information from the controller in charge of the sequence of operation of the teaching system. Based on these data, several screens are displayed that allow operators to know information about the main variables associated with the exercise such as: operation mode, cycle time, time per work station, number of elaborated pieces, etc. The system bases its operation on a Raspberry embedded computer, the exchange of information between it and the Programmable Logic Controller of the teaching equipment is done through the Modbus protocol. Tests carried out have shown a correct operation of the prototype, which will begin to be used in the next school period.

Keywords: Andon System, Modbus IP, Production Monitoring, Programmable Logic Controller, Raspberry.

1. Introducción

Los mercados actuales imponen a las empresas productivas un alto grado de competitividad para de esta forma dar respuesta a sus exigencias.

Todo proceso productivo está expuesto a una diversa cantidad de situaciones que reducen su capacidad de producción. Algunos de estos problemas son: tiempos muertos, flujo de producción errónea, demoras, acumulación de inventarios y personal en exceso, entre muchos más [Prokopenco, 1987], [Boysen *et.al.*, 2007]. En el denominado estudio de tiempos y movimientos se realiza un análisis del funcionamiento de una línea de producción. Este estudio permite balancear las actividades, tanto del personal como de los equipos, para lograr una operación eficiente del proceso productivo.

El balanceo de líneas de producción ha sido ampliamente estudiado y diversas metodologías han sido propuestas [Kumar *et.al.*, 2013], [Kucukkoc *et.al.*, 2015], [Rincón *et.al.*, 2014], [Ramírez *et.al.*, 2010], [Zupan *et.al.*, 2015], [Wei *et.al.*, 2011]. El estudio de tiempos y movimientos y su aplicación en el balanceo de líneas de producción, es considerado desde hace varios años como un instrumento necesario para el funcionamiento eficaz de la industria [Arias, 2000].

Otra herramienta ampliamente utilizada en las plantas industriales es el denominado sistema Andon. En las líneas de producción se genera una gran cantidad de información parte de la cual es señalada a los operadores mediante elementos de visualización. Esta forma de comunicación utilizada en el ámbito industrial es conocida como ANDON, término japonés que significa lámpara.

Un sistema ANDON puede ser una alarma, la cual, al ocurrir un problema en algún punto de la planta, lo informa por medio de señales visibles y audibles. Lo anterior permite dar una rápida solución a la situación que se presenta en el proceso. También puede ser una torreta que, mediante un código de colores, indica el estado en una estación de trabajo. Así mismo puede ser un tablero de información que da seguimiento al plan de producción y que puede apoyar en la toma de decisiones [Socconini, 2011], [Brill, 2003].

Un sistema ANDON garantiza una comunicación efectiva ya que despliega información específica para las distintas áreas involucradas en el proceso de producción en la planta [Suárez, 2015]. La utilidad de estos sistemas ha sido demostrada a nivel industrial en diversas aplicaciones [Liker, 2011], [Ohno, 1991]. La formación de recursos humanos con conocimientos profundos en el manejo de

herramientas que permitan establecer procesos de producción más eficientes, rápidos y precisos ha cobrado gran importancia en las últimas décadas. Cada vez más las escuelas de ingeniería están incluyendo en sus programas de estudios, cursos relacionados con estas temáticas. Así mismo, se puede mencionar que La tendencia educativa en ingeniería está dirigida no sólo a la adquisición de conocimientos teóricos, sino también a la práctica y al manejo de equipos similares a los que los futuros ingenieros se encontrarán en la industria. El enfrentar a los estudiantes a situaciones reales durante su formación, implica que las instituciones cuenten con laboratorios provistos con equipos de experimentación los cuales tienen costos elevados.

El Centro de Investigación y Formación Integral de Ingeniería Industrial (CIFIII) de la UAM-Azcapotzalco cuenta con dos equipos didácticos en los cuales se simula el ensamblado de un producto. Estos equipos apoyan a los profesores en la enseñanza de temas relacionados con el mejoramiento de la productividad en procesos industriales [Lara *et.al.*, 2016].

El equipo está compuesto por una banda transportadora y tres estaciones de trabajo colocadas a un costado de ésta, figura 1.

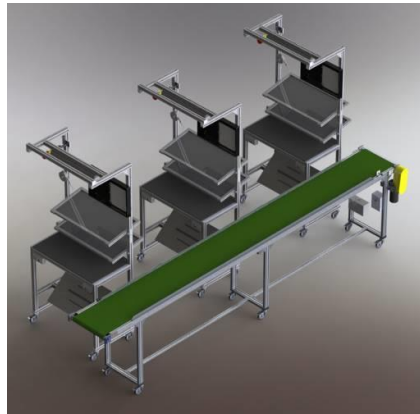


Figura 1 Sistema didáctico para estudio de tiempos y movimientos.

En cada estación de trabajo un operador realiza una tarea específica sobre la pieza recibida. El tiempo que los operadores tienen para realizar su tarea es llamado “tiempo de ensamble”, mientras que el tiempo en que las bandas están en movimiento recibe el nombre de “tiempo de recorrido”. Las estaciones de trabajo

cuentan con dos botones pulsadores, mediante los cuales cada operador indica que terminó su tarea correspondiente o que desea pausar el proceso. Por su parte, en el extremo final de la banda se encuentra un sensor de proximidad que envía una señal cuando una pieza ha sido completada. La operación del equipo se lleva a cabo bajo el mando de un Controlador Lógico Programable (PLC, por sus siglas en inglés).

El simulador de líneas de ensamble opera bajo uno de tres distintos modos de operación, mismos que se describen a continuación:

Tiempo fijo

La banda transportadora del simulador desplaza las piezas hasta los puestos de trabajo y permanece en esa posición durante el tiempo de ensamble establecido por el usuario al inicio del experimento. Dentro de este intervalo, los operadores toman las piezas proporcionadas, realizan sobre estas la acción que le corresponde y las depositan de nuevo en el transportador. Transcurrido el tiempo de ensamble, el motor de la banda se activa automáticamente y permanece en este estado durante el tiempo de recorrido especificado durante la configuración del experimento, lo anterior permite posicionar las piezas frente al siguiente puesto. La secuencia se repite hasta completar el número de piezas a producir establecido al momento de configurar la operación del sistema.

Botones terminado

La banda transportadora del simulador desplaza las piezas hasta los puestos de trabajo y permanece en esa posición hasta que cada uno de los tres operadores señaló, mediante un botón, que ha terminado la tarea correspondiente y que la pieza que trabajó ha sido devuelta a la banda. Al cumplirse esta condición, el motor de la banda se activa automáticamente y permanece en este estado durante el tiempo de recorrido especificado durante la configuración del experimento, lo anterior permite posicionar las piezas frente al siguiente puesto. La secuencia se repite hasta completar el número de piezas a producir establecido al momento de configurar la operación del sistema.

Combinado

La banda transportadora del simulador desplaza las piezas hasta los puestos de trabajo y permanece en esa posición durante el tiempo de ensamble establecido por el usuario al inicio del experimento o cada uno de los tres operadores haya señalado mediante un botón, que ha terminado la tarea correspondiente y que la pieza que trabajó ha sido devuelta a la banda. Al cumplirse esta condición, el motor de la banda se activa automáticamente y permanece en este estado durante el tiempo de recorrido especificado durante la configuración del experimento, lo anterior permite posicionar las piezas frente al siguiente puesto. La secuencia se repite hasta completar el número de piezas a producir establecido al momento de configurar la operación del sistema.

Los equipos tienen más de un año de ser empleados en los laboratorios como apoyo en distintas asignaturas de las carreras de ingeniería. Con la finalidad de ampliar las posibilidades de uso del equipo descrito, se planteó el incluir algún sistema de tipo Andon. Al inicio de este proyecto, cada uno de los simuladores contaba con una torreta con indicadores luminosos que señalaban el estado en cada puesto de trabajo. Por su parte, el PLC empleado en el control de cada equipo, cuenta con una pequeña pantalla en la cual se despliega información respecto al avance en el proceso de ensamblado. El inconveniente es que se trata de una pantalla de 2.4" ubicada en el tablero de control lo cual no permite que los operadores puedan observar la información.

En este artículo se describe el diseño y construcción de un sistema Andon que permite desplegar, en una pantalla de 49", información asociada al desarrollo de los experimentos realizados en el equipo didáctico. El sistema establece comunicación con el PLC que controla la secuencia de operación del simulador didáctico, para obtener información respecto del avance del experimento. Con base en los datos recibidos, se despliega en la pantalla diversos mensajes que permiten a los operadores conocer los valores de las principales variables asociadas al ejercicio como son: modo de operación, tiempos de ciclo, tiempos por estación, número de piezas elaboradas, etc. El equipo basa su operación en una computadora embebida Raspberry. El intercambio de información entre ésta y el

Controlador Lógico Programable del equipo didáctico se realiza mediante el protocolo Modbus. Este estándar de comunicación industrial está basado en una arquitectura Cliente/Servidor y permite el intercambio de entre equipos dedicados a la automatización de procesos [Kumar-Sen, 2014].

Existen en el mercado diversas pantallas de uso general empleadas para el despliegue de información. Sus aplicaciones son diversas: publicidad, información de tráfico, horarios de transporte, etc. La información, generalmente video o texto, se genera en una computadora y se transmite al dispositivo mediante cable USB, conexión Ethernet o algún cable especial. En el caso de un sistema para el monitoreo de la producción a nivel industrial, la información a desplegar es generada por los equipos de control. Lo anterior implica no solo protocolos de comunicación especiales, sino también la necesidad de contar con entradas para sensores y señales de salida para alarmas.

Son pocos los fabricantes que ofrecen pantallas para el monitoreo de producción. La compañía Vorne Industries Inc. propone el modelo XL800-32080T, se trata de un equipo que visualiza diversos indicadores de productividad en una pantalla de LED's [Vorne Industries Inc., 2016]. El tamaño de este dispositivo es de 13.7" de altura por 26.2" de largo. Maneja tres colores y cuenta con puertos de comunicación Ethernet y RS-485, así como entrada para 8 sensores. A su vez Electro-Matic Visual Inc., cuenta con la serie Factory Vision FV4000 cuyo gabinete soporta polvo y humedad comunes en la industria manufacturera [Electro-Matic Vision Inc., 2017]. Las pantallas de esta serie tienen un tamaño de 30" de altura por 45" de ancho. Al igual que el dispositivo anterior, cuenta con puertos de comunicación Ethernet y RS-485. Adicionalmente maneja protocolos industriales de intercambio de datos como: Modbus y Profibus.

2. Métodos

Como ya se mencionó, el equipo para estudios de tiempos y movimientos cuenta con un Controlador Lógico Programable (PLC), el cual es el encargado de controlar la secuencia de operación del sistema. La información respecto a número de piezas a producir y producidas, así como tiempos programados y

transcurridos, entre otros parámetros, se encuentran en la memoria del controlador. Para la construcción del sistema Andon que se describe en este artículo, se agregaron subrutinas al programa original del PLC. Estos segmentos de código tienen como función el agrupar los datos de interés y transmitirlos mediante el protocolo Modbus IP a una Red de Área Local (LAN, por sus siglas en inglés). Una computadora embebida conectada a la red lee la información transmitida y después de procesar los datos, determina y configura la ventana a desplegar en el monitor.

En el diagrama de la figura 2, se muestra el diagrama de bloques del sistema desarrollado, cada una de las partes que lo componen se describe en el resto del artículo.

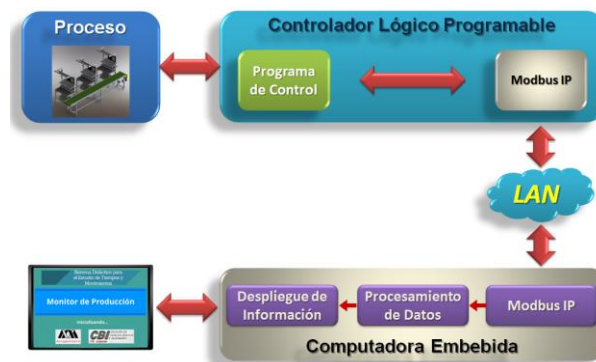


Figura 2 Diagrama de bloques del sistema desarrollado.

Controlador Lógico Programable

El Controlador Lógico Programable instalado en el equipo didáctico es el modelo Vision 130 de la marca Unitronics, el cual cuenta con 22 entradas digitales y 12 salidas de tipo relevador. Una característica importante de este aparato es que tiene integrado un panel compuesto por 20 teclas además de una pantalla blanco y negro de 2.4", en la cual es posible desplegar imágenes, texto y gráficos en tiempo real [Unitronics Inc., 2010]. Es mediante estos elementos que se configura el experimento a realizar y se monitorea el avance del mismo.

Como ya ha sido mencionado, el programa original del controlador no fue modificado, únicamente se agregaron secciones de código que permiten configurar la comunicación Modbus del PLC, así como responder a las peticiones

de información recibidas. En la figura 3, se muestra el diagrama de flujo del programa en el PLC del sistema.

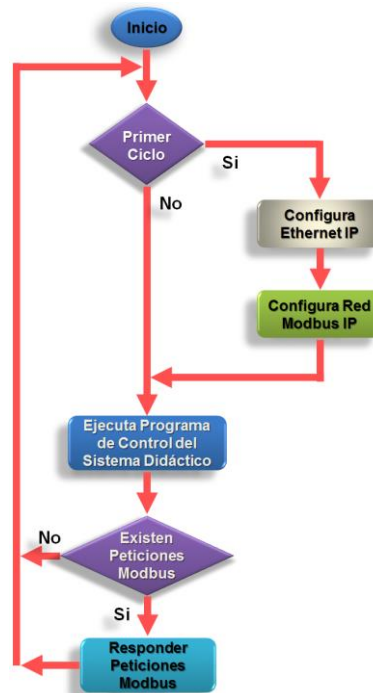


Figura 3 Diagrama de flujo del programa del PLC.

Puede observarse como, una vez que el PLC ha sido encendido y se ejecuta por primera vez el programa, se configura la dirección IP del dispositivo, así como la red Modbus. Es en esta última donde se especifica el puerto de comunicaciones a utilizar. El fabricante señala que para intercambiar información con otros dispositivos mediante el protocolo Modbus, se debe utilizar el puerto con dirección 502. De igual manera en esta sección se seleccionan las localidades de memoria donde se almacenarán los parámetros asociados a la configuración de la red.

Una vez realizada la configuración inicial de los parámetros de comunicación del controlador, se ejecuta el programa de control del equipo didáctico original. Los datos de interés para el sistema de monitoreo se van generando y almacenando en la memoria del PLC conforme la secuencia de control correspondiente al modo de operación seleccionado se va ejecutando.

Por último, si la computadora embebida que actúa como cliente realiza una petición, el PLC responderá enviando la información solicitada.

La secuencia descrita se repite en forma indefinida mientras el sistema de control del equipo didáctico se encuentre encendido.

Computadora Embebida

El dispositivo en el cual se basa este bloque, es una computadora de una sola placa Raspberry Pi 2 B. Se trata de un computador de bajo costo cuyas principales características son: CPU ARM Quad-Core 900 MHz, 1 GB de memoria RAM, 4 puertos USB, puerto HDMI y un puerto Ethernet [Monk, 2015]. El programa para la Raspberry fue elaborado en Python, el cual es un lenguaje de uso libre, de alto nivel e interpretado [Upton, *et.al.* 2016].

La implementación del protocolo Modbus IP en la Raspberry se realizó utilizando la librería llamada "PyModbus", la cual se encarga de crear la trama que será enviada mediante Ethernet al PLC para solicitarle la información requerida. En esta cadena se especifica la dirección del dispositivo al cual se le envía la solicitud y se señalan los datos que se requieren. En el proyecto que se presenta, la Raspberry envía peticiones de lectura de datos de tipo bit que corresponden a las direcciones Modbus en el rango de 0 a 3000 y que se relacionan a las localidades de memoria del PLC MBO a MB3000. De la misma forma, se envían peticiones de lectura de datos que corresponden a las direcciones de registros Modbus de 0 a 4000 relacionadas a las localidades de memoria del PLC MI0 a MI3999.

Básicamente el programa identifica el estado en el cual se encuentra el equipo didáctico, procesa la información correspondiente y despliega las ventanas en el monitor del sistema. En la figura 4, se muestra el diagrama de flujo del programa para la Raspberry.

Puede observarse que al arrancar el programa de la computadora embebida, se inicializan parámetros de operación y de comunicación del dispositivo. Al mismo tiempo se despliega en el monitor del sistema una ventana de identificación. Posteriormente, se verifica en cuál de los tres estados posibles se encuentra el equipo didáctico: Configurándose, Operando o Finalizado. La identificación del estado se realiza mediante banderas solicitadas por la Raspberry (Cliente en la red Modbus) al PLC (Servidor en la red Modbus).

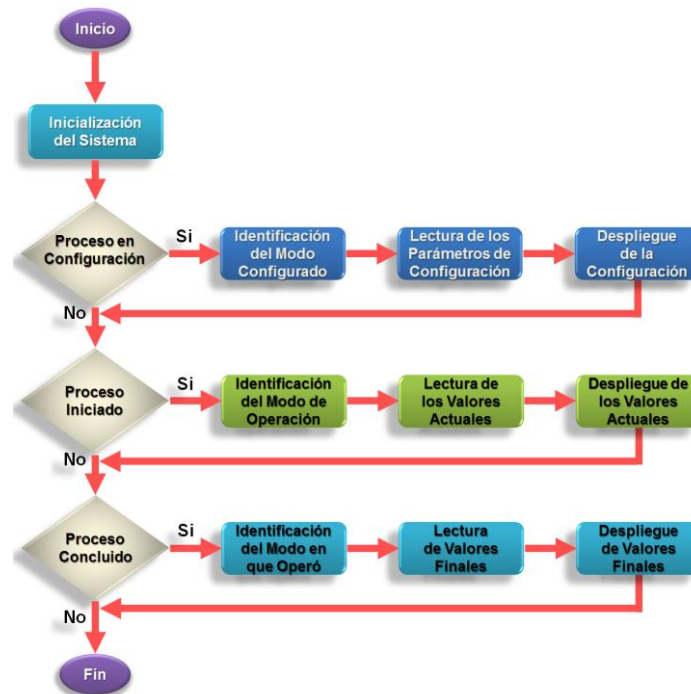


Figura 4 Diagrama de flujo del programa de la Raspberry.

Dependiendo del estado identificado, el programa determina el modo en el que el equipo: está siendo configurado, está operando u operó. Como se mencionó anteriormente, los posibles modos son: Tiempo Fijo, Botones Terminado o Combinado. Enseguida, se realiza la lectura de los datos que corresponden al estado en que se encuentra: parámetros de configuración si se está configurando el experimento, valores actuales de las variables de interés si se encuentra en operación y los valores finales si ha concluido el proceso. La última tarea en cada estado, corresponde a la creación y despliegue de la ventana de información en el monitor del sistema.

Como puede observarse, no es necesario que el sistema Andon esté operando para poder utilizar el equipo didáctico. Así mismo, el equipo de monitoreo puede encenderse en cualquier momento y automáticamente se sincronizará con el controlador del simulador.

Pantallas de Monitoreo

El sistema elaborado considera 14 ventanas de información, el programa en la computadora embebida determina cuál de estas será desplegada en el monitor. Lo

anterior dependiendo del estado en que se encuentre el equipo y del modo de operación en el que éste haya sido configurado. En la figura 5, se muestra, mediante un diagrama de flujo, la secuencia en la cual se van desplegando las ventanas en el monitor del sistema.

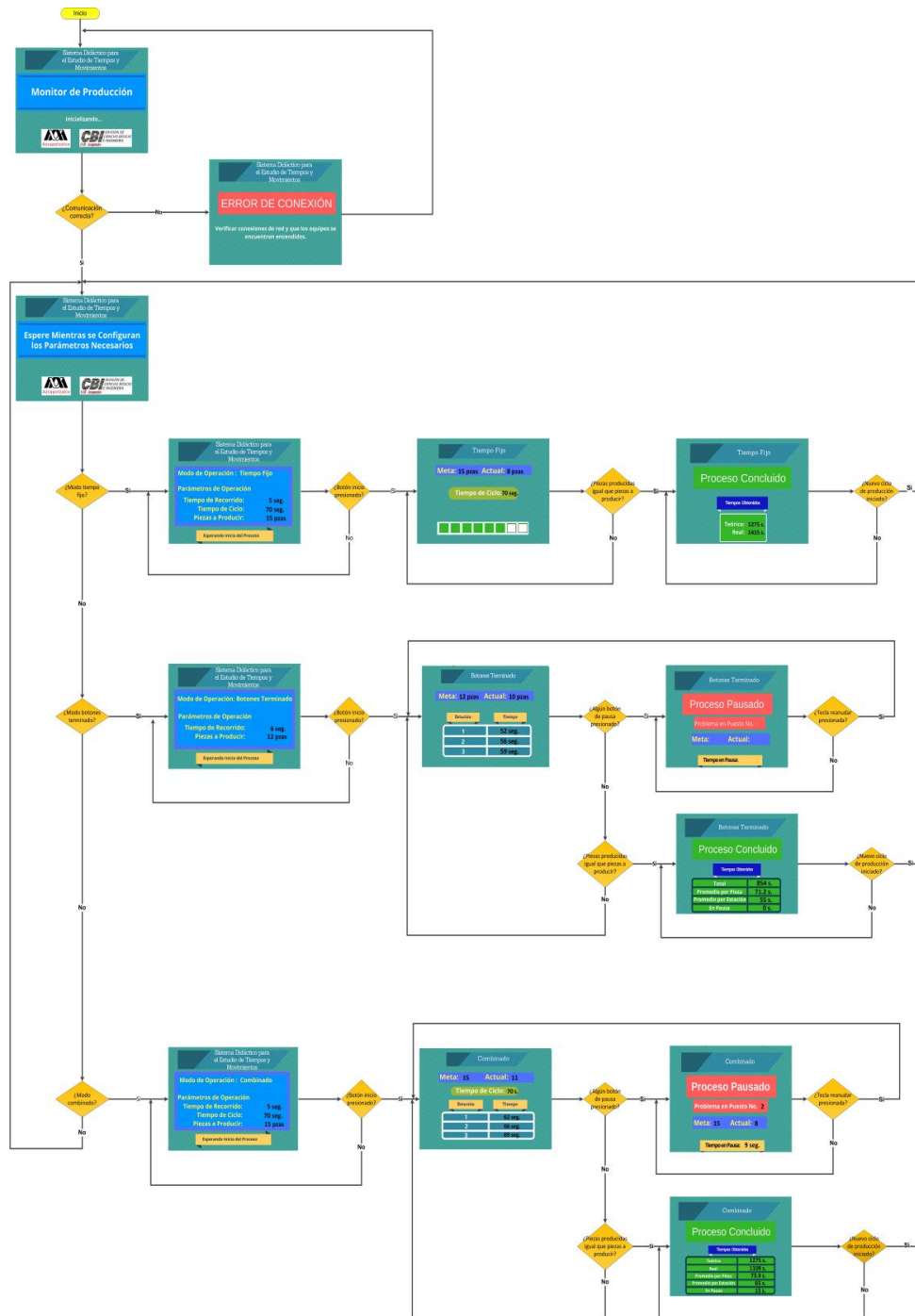


Figura 5 Diagrama de flujo de la secuencia de despliegado de las ventanas.

La secuencia inicia, una vez encendido el equipo, señalando que se está estableciendo la comunicación con el controlador. En caso de que no exista conexión con el equipo didáctico se desplegará un mensaje de error. Una vez que el sistema de monitoreo ha determinado en qué estado se encuentra el proceso, procede a desplegar las ventanas correspondientes al modo en que fue configurado el equipo. Para cada uno de los modos de funcionamiento del sistema didáctico, se elaboraron ventanas con información específica.

3. Resultados

El resultado obtenido es un sistema de monitoreo para un equipo didáctico de estudios de tiempos y movimientos. Basado en una computadora embebida, el prototipo desarrollado, mediante una pantalla LED de 49", despliega información respecto a la operación del simulador. Mediante 14 ventanas diferentes, el usuario puede observar la forma en que fue configurado el equipo para su operación, y una vez en funcionamiento, monitorear los principales parámetros del proceso.

Pantallas de Inicialización

Son tres las ventanas que pueden desplegarse al momento que se inicializa el sistema, estas se muestran en la figura 6.



Figura 6 Pantallas de la etapa de inicialización del sistema de monitoreo.

La primera de las ventanas señala que el sistema de monitoreo se está inicializando, este mensaje se despliega durante algunos segundos desapareciendo automáticamente. Si la comunicación con el controlador se establece de forma correcta, se despliega un aviso señalando que se están leyendo los parámetros de configuración del experimento. En caso de que la comunicación no se pueda establecer con el equipo didáctico, ya sea porque éste no se encuentra encendido o exista un problema de conexión, se desplegará un mensaje de error.

Pantallas de Modo Tiempo Fijo

En forma básica, son tres las ventanas que se despliegan para realizar el seguimiento del proceso cuando éste se encuentra trabajando en el modo de Tiempo Fijo. La figura 7 muestra las distintas imágenes que corresponden a este modo de funcionamiento.



Figura 7 Pantallas del modo de operación: Tiempo Fijo.

Una vez que el sistema ha sido configurado bajo el modo de Tiempo Fijo, y se está en espera de arrancar el experimento, se despliega la primera de las ventanas. En esta se muestran los parámetros bajo los cuales se realizará el proceso. Una vez que se inicia la operación, se muestra información asociada al número de piezas a producir y cuantas han sido terminadas. El tiempo restante de ciclo se muestra mediante una barra de progreso. Finalmente, si el experimento ha concluido, se despliega información sobre el tiempo que se esperaba invertir en el ensamble del producto y el tiempo real ocupado.

Pantallas de Modo Botones Terminado

La figura 8 muestra las imágenes asociadas al monitoreo del modo de funcionamiento: Botones Terminado.



Figura 8 Pantallas del modo de operación: Botones Terminado.

Siguiendo la misma lógica que se tiene para el modo anterior, en Botones Terminado se tiene la ventana de desplegado de los parámetros de configuración.

Esta se muestra hasta que se arranca el experimento. El seguimiento del ensamble se realiza con la segunda ventana, en ésta se muestra el tiempo que cada operador está ocupando para realizar la tarea asignada para la pieza en proceso. La ventana final, muestra estadísticas asociadas al experimento.

Pantallas de Modo Combinado

Las ventanas correspondientes al modo de operación Combinado, se observan en la figura 9. Al ser el modo Combinado una mezcla de los dos precedentes, puede observarse que las ventanas son similares a las ya presentadas.



Figura 9 Pantallas del modo de operación: Combinado.

Cabe mencionar que existen pantallas que se despliegan cuando existe algún error de comunicación con el equipo didáctico o cuando por alguna razón, alguno de los operadores decide detener la secuencia de ensamble.

4. Discusión

Antes de desarrollar el proyecto que aquí se describe los operadores, ubicados en los puestos de trabajo, no tenían forma de saber, en tiempo real, cuál era el avance que tenían, tanto en la tarea específica a realizar, como en la meta global establecida. Bajo ciertos modos de operación, solo podían saber que el Tiempo de Ciclo había terminado, porque la banda se activaba. Lo anterior podía ocurrir, antes de que ellos depositaran la pieza trabajada sobre el transportador. De esta forma, si algún usuario requería conocer los valores de las variables de interés del ejercicio, estaba obligado a acercarse a la pequeña pantalla que el controlador tiene integrada. En algunos casos, para facilitar el monitoreo, se tenía a una

persona ubicada frente a la pantalla, verificando y comunicando al resto de los usuarios, el avance actual del experimento.

El sistema de monitoreo desarrollado proporciona información que complementará los experimentos que hasta el momento se realizan en el equipo didáctico. La selección de la información que se despliega en cada una de las ventanas se realizó considerando los comentarios de los responsables del equipo.

El prototipo construido no interfiere en absoluto con la operación del equipo, esto es, los experimentos pueden llevarse a cabo sin estar conectado o encendido el bloque de monitoreo descrito en este artículo.

5. Conclusiones

El objetivo planteado al inicio de este trabajo, era adicionar un sistema Andon al simulador de líneas de producción que se emplea para realizar estudios de tiempos y movimientos en los laboratorios de Ingeniería Industrial de la UAM-Azcapotzalco. Se diseñó y construyó un equipo que se conecta al tablero encargado de controlar al equipo didáctico. Mediante comunicación Modbus IP el prototipo desarrollado obtiene información respecto a la configuración y avance del experimento que se realiza. Por medio de una pantalla LED de 49", se despliegan diversas pantallas con datos de interés para los usuarios del equipo.

El uso del sistema de monitoreo descrito, facilitará las pruebas que se realizan en el simulador. Así mismo, abrirá las puertas a nuevos tipos de experimentos lo que redundará en un mayor aprovechamiento de la infraestructura existente.

Al momento de redactar este trabajo, se está concluyendo la instalación del sistema Andon en el laboratorio. Las pruebas de funcionamiento realizadas entre los equipos son satisfactorias por lo que se tiene la certeza de que el sistema de monitoreo agregado al equipo didáctico original tendrá los resultados esperados.

Como trabajo a futuro se espera observar el funcionamiento del sistema para realizar las adecuaciones que fueran necesarias. Así mismo, se está considerando diseñar y construir un sistema similar, pero esta vez empleando un conjunto de módulos de LEDs RGB lo cual permitiría incrementar considerablemente el alcance visual de la información.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Arias Reyna J. M., Control de tiempos y productividad, La ventaja competitiva, Editorial Paraninfo Thomson Learning, 2000.
- [2] Boysen N., Fliedner M., Scholl A., A classification of assembly line balancing problems, *European Journal of Operational Research*, Vol. 183, No. 2, pp. 674-693, 2007.
- [3] Brill, Louis, Out of streets to factory shops: LED display boards, *Screens Magazine*, Vol. 1, 2003.
- [4] Electro-Matic Vision Inc., Factory Vision FV4000, User Manual, Farmington Hills, Michigan, USA, 2017.
- [5] Kucukkoc I., Zhang D., Balancing of parallel U-shaped assembly lines, *Computers & Operations Research*, Vol. 64, pp. 233-244, 2015.
- [6] Kumar N., Mahto D., Assembly Line Balancing: A Review of Developments and Trends in Approach to Industrial Application, *Global Journal of Researches in Engineering Industrial Engineering*, Vol. 13, No. 2, pp. 29-50, 2013.
- [7] Kumar-Sen S., Fieldbus and Networking in Process Automation, CRC Press. Boca Raton, Florida, USA, 2014.
- [8] Lara Chávez J.A., Magos Rivera M., López Ontiveros M.A., Loyo Quijada J., Rodríguez Alvarado L. W., Automatización de un Sistema Didáctico para Estudios de Tiempos y Movimientos, *Pistas Educativas*, ISSN. 1405-1249, pp. 37- 53, 2016.
- [9] Liker J. K., Toyota: Como el fabricante más grande del mundo alcanzó el éxito, Grupo Editorial Norma, México, 2011.
- [10] Monk S., Programming the Raspberry Pi: Getting Started with Python, Second Edition, Ed. Mc Graw Hill, USA, 2015.
- [11] Ohno T., El Sistema de producción Toyota: Más allá de la producción a gran escala, CRC Press, USA, 1991.
- [12] Prokopenko J., La gestión de la productividad, Manual Práctico, Editorial Limusa, Grupo Noriega Editores, México, 1987.

- [13] Ramírez Campos S. M., González Múzquiz G., González Flores M. O., Un caso real de balanceo de líneas de ensamble con restricciones de secuencias de subprocesos resuelto con un modelo genético, *Revista de la Ingeniería Industrial*, Vol. 4, pp. 1-14, 2010.
- [14] Rincón Mora B., Pérez Olguín I., Pérez Limón J., Fernández Gaxiola C., Aplicación de técnicas de ingeniería industrial en el mejoramiento de un proceso de manufactura, *Ingeniería de Procesos, Casos Prácticos*, Edición 1, Capítulo 1, Ed. UTCJ, pp. 6-18, 2014.
- [15] Socconini L., *Lean Manufacturing*, Grupo Editorial Norma, México, 2011.
- [16] Suárez Aimacaña J. F., Análisis de los efectos de la implementación de un sistema Andon en una planta ensambladora de vehículos para el aumento de la productividad: caso Aymes S.A., Tesis para obtener el grado de maestría, Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Ecuador, 2015.
- [17] Unitronics Inc., *Vision OPLC V130-33-R64, Technical Specifications and Installation Guide*, Unitronics Inc., Quincy, Massachusetts, USA, 2010.
- [18] Upton E., Halfacree G., *Raspberry Pi User Guide*, Ed. Wiley, USA, 2016.
- [19] Vorne Industries Inc., *XL User's Guide*. Itasca, Illinois, USA, 2016.
- [20] Wei N. C., Chao I. M., A solution procedure for type E simple assembly line balancing problem, *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 61, No. 3., pp 824–830, 2011.
- [21] Zupan H., Herakovic N., Production line balancing with discrete event simulation: A case study, *15th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing*, Vol. 48, No. 3, 2015.