

TECNOLOGÍAS DE CÓDIGO ABIERTO PARA LA GESTIÓN DE UN PROCESO INDUSTRIAL

OPEN SOURCE TECHNOLOGY FOR THE MANAGEMENT
OF AN INDUSTRIAL PROCESS



AUTOR

BYRON MEDINA DELGADO
Magíster en Ingeniería Electrónica
*Universidad Francisco de Paula
Santander
Docente e Investigador
Grupo de Investigación y Desarrollo
en Telecomunicaciones, GIDT
byronmedina@ufps.edu.co
COLOMBIA

AUTOR

SERGIO ALEXANDER CASTRO CASADIEGO
Magíster (c) en Ingeniería Electrónica
*Universidad Francisco de Paula Santander
Docente e Investigador
Grupo de Investigación y Desarrollo en
Telecomunicaciones, GIDT
sergio.castroc@ufps.edu.co
COLOMBIA

AUTOR

LUIS LEONARDO CAMARGO ARIZA
Magíster en Ingeniería Electrónica
**Universidad del Magdalena
Docente e Investigador
Grupo de Investigación en
Desarrollo Electrónico y
Aplicaciones Móviles, GIDEAM
lcamargoa@unimagdalena.edu.co
COLOMBIA

*INSTITUCIÓN

Universidad Francisco de Paula Santander
UFPS
Universidad Pública
Av. Gran Colombia No. 12E-96, Cúcuta
gidt@ufps.edu.co
COLOMBIA

*INSTITUCIÓN

Universidad del Magdalena
UNIMAGDALENA
Universidad Pública
Cra. 32 No. 22-08, Santa Marta
gideam@unimagdalena.edu.co
COLOMBIA

INFORMACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN O DEL PROYECTO: El artículo es producto del proyecto de investigación para optar al título de Magíster en Ingeniería Electrónica, denominado "Sistemas embebidos, instrumentación virtual y aplicaciones móviles, para procesos industriales", fecha de inicio en junio de 2012, fecha de finalización en diciembre de 2013, ejecutado en el Grupo de Investigación y Desarrollo en Telecomunicaciones (GIDT) de la Universidad Francisco de Paula Santander y, asesorado por el Grupo de Investigación en Desarrollo Electrónico y Aplicaciones Móviles (GIDEAM) de la Universidad del Magdalena.

RECEPCIÓN: Febrero 17 de 2014

ACEPTACIÓN: Noviembre 15 de 2014

TEMÁTICA: Ingeniería eléctrica, electrónica, telecomunicaciones y telemática

TIPO DE ARTÍCULO: Artículo de Investigación Científica e Innovación

Forma de citar: Medina Delgado, B., Castro Casadiego, S. A., & Camargo Ariza, L.L. (2015). Tecnologías de código abierto para la gestión de un proceso industrial. En R, Llamosa Villalba (Ed.). Revista Gerencia Tecnológica Informática, 14(38), 43-58. ISSN 1657-8236.

RESUMEN ANALÍTICO

El artículo presenta una solución tecnológica para la automatización de un proceso industrial utilizando herramientas de software y hardware basadas en código abierto, propuesta que incorpora la movilidad en los niveles de supervisión y gestión de la pirámide de automatización. Esta solución se desarrolló ejecutando una metodología soportada en la ingeniería básica y de detalle, y se probó en un sistema neumático de estampado de piezas. La propuesta utiliza un sistema embebido como controlador implementado en una Raspberry Pi, en donde se programa un instrumento virtual que permite manipular en tiempo real el proceso, e integrarlo con la aplicación móvil desarrollada en Android para la gestión del mismo. Además, el artículo muestra los resultados de la evaluación de las 6 M's y la usabilidad, realizada a la aplicación, que evidencian el potencial de éxito y la capacidad de ser comprendida, aprendida y usada; sustentado la posibilidad de utilizar herramientas de código abierto para mejorar la competitividad de las MIPYMES.

PALABRAS CLAVES: Dispositivo Móvil, Instrumentación Virtual, Proceso Industrial, Sistema Embebido.

ANALYTICAL SUMMARY

The paper presents a technological solution for the automation of an industrial process using software and hardware tools based on open source, the solution incorporates the mobility in the levels of supervision and management of the automation pyramid. This solution was developed by running a methodology supported in basic and detailed engineering, and was tested on a pneumatic system of stamping parts. The proposal uses an embedded and implemented in a Raspberry Pi, where program controller system a virtual instrument that allows real-time manipulate the process, and integrate with the Android mobile application developed for management. In addition, the paper shows the results of the evaluation of 6 M's and usability, on the implementation, that demonstrate the potential for success and the ability to be understood, learned and used; supported the possibility of using open source tools to improve the competitiveness of MIPYMES.

KEYWORDS: Embedded System, Industrial Process, Mobile Device, Virtual Instrumentation.

INTRODUCCIÓN.

“La Ciencia, la Tecnología y la Innovación (CTeI) han sido identificadas por la sociedad colombiana como fuente de desarrollo y crecimiento económico” [1]. Según el análisis publicado por el Observatorio de Competitividad sobre el Reporte Global de Tecnologías de la Información 2012: “... el país todavía sufre de serios problemas que dificultan su capacidad para aprovechar las Tecnologías de Información y las Comunicaciones (TIC). Existe un significativo rezago en infraestructura y acceso a contenidos digitales como texto, audiovisual y software, junto con unas condiciones poco favorables para el emprendimiento y la innovación, lo cual se refleja en una baja utilización de las TIC por las empresas” [2].

En Colombia, se presenta una falla de mercado por la desalineación entre la oferta y la demanda de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones para

las Micros, Pequeñas y Medianas Empresas (MIPYMES) [2]. Esta brecha puede reducirse promoviendo la implementación de recursos tecnológicos innovadores que favorezcan la creación, consolidación y aceleración de empresas basadas en las TIC.

El desafío más importante al cual se están enfrentando los empresarios, es alcanzar mayores niveles de competitividad en un entorno cada vez más globalizado, enmarcado por los tratados comerciales y donde las demandas de tecnologías de la información, electrónica y comunicaciones, así como el desarrollo de materiales y procesos industriales, marcan el progreso de una nueva cultura y etapa industrial [3].

“La base para la innovación tecnológica es estar a la vanguardia en los procesos y servicios, y la mejor manera es que las organizaciones estén atentas a los cambios y evolución del desarrollo tecnológico a través de un proceso de vigilancia continua de dicha tecnología” [4].

El nuevo modelo tecnoempresarial que debe enfrentar la competencia internacional, implica un desarrollo productivo inmerso en la incorporación de equipos y maquinaria de base computacional, el desarrollo de las actividades productivas a través de la informatización y automatización, así como la normalización, estandarización y certificación de procesos, productos y servicios [3].

De acuerdo con lo anterior, la integración de los sistemas de información, control y gestión de producción se ha convertido en una necesidad ineludible en la mayoría de las empresas de producción. Requerimientos que pueden ser soportados por las bondades de los sistemas embebidos, la instrumentación virtual y los dispositivos móviles, con el propósito de obtener sistemas de producción competitivos, que satisfagan las exigencias de la industria actual.

El vínculo entre el control de procesos y el desarrollo de la tecnología se ha fortalecido [5], permitiendo la evolución de los sistemas de control desde básicos sistemas mecánicos, hasta modernos sistemas automáticos que toman decisiones ante determinados comportamientos de un proceso.

La integración de sistemas embebidos a los sistemas automáticos de control, permite centralizar la supervisión y corrección de errores de las medidas de las variables de un proceso industrial, reuniendo tres componentes principales llamados hardware, software primario o aplicación principal y, sistema operativo. Este último, permite supervisar la aplicación, además de proveer los mecanismos para la ejecución de procesos [6].

La instrumentación virtual es “un instrumento que no es real, se ejecuta en una computadora y tiene sus funciones definidas por software” [7]. A partir de este concepto, se define la instrumentación virtual como un sistema de medición, análisis y control de señales físicas con una computadora por medio de instrumentos virtuales. Este concepto es una alternativa innovadora para la supervisión y la adquisición de datos de las variables de un proceso industrial modelado e implementado mediante una interfaz de usuario [8].

Existen millones de dispositivos móviles funcionando en el mundo, y la necesidad de satisfacer las exigencias de los usuarios ha generado la aparición de los llamados dispositivos móviles inteligentes o Smartphone [9]. Estos equipos, permiten junto con el sistema operativo desarrollar aplicaciones basadas en tecnologías como Bluetooth, el protocolo Universal del Bus Serie (*Universal Serial Bus*, USB), Wi-Fi, entre otros, que facilitan la interacción entre dispositivos

electrónicos para el intercambio de información y, que incorporan a la instrumentación virtual tradicional, el atributo de movilidad.

Las soluciones tecnológicas para las empresas, pueden requerir la adquisición de hardware y software licenciado, que implican costos elevados en la implementación y el mantenimiento de equipos, sistemas y protocolos de comunicación. Estas implementaciones se limitan al uso continuo de las tecnologías del fabricante, cuando la solución requiere evolucionar para ajustarse a las tendencias.

El 90% de las empresas colombianas están catalogadas como microempresas; lo que exige por parte del capital humano nacional, el desarrollo de propuestas fundamentadas en el uso de tecnologías abiertas, que brinden la oportunidad de modernizar tecnológicamente las MIPYMES del país [3].

En los países de la Unión Europea y de América Latina y el Caribe las pymes representan aproximadamente el 99% del total de empresas, lo que ha motivado a los diferentes gobiernos a colocar en marcha instrumentos y programas de apoyo a las pymes para mejorar su desempeño, fomentar su desarrollo productivo y generar un ambiente de negocios favorable. El sector privado ante este panorama sugiere medidas específicas como modernizar el parque industrial, promoviendo el uso de las TIC; mejorar la innovación gerencial y organizacional mediante la implementación de modalidades de formación-acción, considerando elementos de gestión tecnológica; entre otros [10].

Proyectos se han desarrollado en Colombia, con el propósito de incorporar tecnologías (hardware y software) para el mejoramiento de los procesos en las industrias [11] [12] [13]; en España, proyectos que utilizan sistemas embebidos para la automatización industrial utilizando software libre [14], o para evaluar su desempeño en escenarios complejos [7]; en Cuba, proyectos como la supervisión y el control de un proceso industrial utilizando dispositivos móviles con Android [15]; en Perú, proyectos orientados a las pequeñas y medianas empresas, como el desarrollo de aplicaciones de software (SCADA) para el control centralizado de la producción utilizando una interfaz de usuario [16]; entre otros.

Por otra parte, la National Instruments ofrece el producto NI CompactRIO, que es un sistema robusto y reconfigurable para controlar y monitorizar variables, que incluye un procesador, una FPGA, módulos de entradas/salidas y el software LabVIEW; sistema que se puede utilizar para variedad de aplicaciones industriales [17].

Este proyecto propone una solución tecnológica, que integra un sistema embebido, un instrumento virtual y una aplicación móvil, que aplica la ingeniería básica y de detalle a la automatización de un proceso industrial, utilizando software libre, como alternativa empresarial para mejorar los procesos de producción sin requerir la implementación de herramientas licenciadas.

El documento describe la metodología implementada en el proyecto, presenta los resultados de la aplicación de la metodología y, valora la solución tecnológica a través de la evaluación de las 6 M's [18] y de la evaluación de usabilidad [19].

1. METODOLOGÍA.

A continuación se describe la metodología para implementar la solución tecnológica, que integra un sistema embebido como controlador, un instrumento virtual y una aplicación móvil, para automatizar, supervisar y controlar un proceso industrial.

La metodología desarrollada se basa en la ingeniería básica y de detalle [20], aplicada a la ingeniería de automatización [21] y, define las fases denominadas narrativa de proceso, selección de tecnologías, narrativa de automatización y control, sistema embebido como controlador, narrativa de movilidad, y narrativa de instrumentación virtual.

1.1 NARRATIVA DE PROCESO.

En esta fase, se establecen para el proceso industrial, el diagrama de Entrada, Proceso y Salida (EPS) y, la planta a controlar. También se describe detalladamente el funcionamiento del proceso industrial mencionando las etapas, las variables y los elementos que lo componen.

1.2 SELECCIÓN DE TECNOLOGÍAS.

Una vez identificado el proceso industrial, se seleccionan las tecnologías idóneas para realizar la supervisión, la automatización y el control. Por lo tanto, se eligen las herramientas de hardware y software para el sistema embebido, la aplicación móvil y el instrumento virtual.

Para seleccionar el hardware del sistema embebido se aplica el método de decisión y selección binaria [22], identificando atributos que definen las características del proyecto. Luego, se instala y configura el software que manipula el hardware. El software requiere la instalación del sistema operativo y de las librerías necesarias para la integración del sistema embebido con la aplicación móvil y el instrumento virtual.

Para desarrollar la aplicación móvil se establecen los requerimientos técnicos de software y hardware, de acuerdo con las características del entorno de la

aplicación. Requerimientos técnicos del dispositivo móvil como el sistema operativo, la tecnología utilizada para la transferencia de la información, el formato de los datos, la estabilidad, la portabilidad, el rendimiento, entre otros.

Para elaborar el instrumento virtual se definen los requerimientos técnicos de software y hardware, de acuerdo con las características de las variables y elementos de la planta que se desea emular.

1.3 NARRATIVA DE AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL.

En esta narrativa se establecen el modelo para realizar la automatización del proceso industrial y la filosofía del control.

La automatización del proceso industrial se basa en el modelo de Manufactura Integrada por Computadora (*Computer Integrated Manufacturing*, CIM), también denominada pirámide de automatización [23]. Esta pirámide, establece los niveles de la automatización y jerarquiza los pasos a seguir para realizar la automatización [24].

La filosofía del control determina el tipo, la técnica, los elementos primarios y finales, el lazo de control y la lógica de funcionamiento.

1.4 SISTEMA EMBEBIDO COMO CONTROLADOR.

En esta fase se define al sistema embebido como el controlador del lazo de control del proceso, basado en los requerimientos del proceso industrial, y en el tipo, la técnica y la lógica de control.

Para que el sistema embebido cumpla con su labor de controlador, se identifican los elementos, se diseña el algoritmo de la lógica, y se configura a nivel de hardware y software su funcionamiento.

1.5 NARRATIVA DE MOVILIDAD.

La solución tecnológica que se plantea, adiciona una aplicación móvil a un sistema de control tradicional, esto permite agregar la narrativa de movilidad a la ingeniería de automatización y detalle que se aplica.

La narrativa de movilidad, implica proponer una metodología para el desarrollo de la aplicación móvil, la cual se fundamenta en la experiencia de investigaciones previas en aplicaciones móviles [25] [26] [27] [28], la ingeniería de software educativo con modelado orientado por objetos (ISE-OO) [29], la evaluación del potencial de éxito para servicios de tercera generación denominada 6 M's [18], y principalmente en los valores de las metodologías ágiles [30].

La metodología implementa cinco etapas denominadas análisis, diseño, desarrollo, pruebas de funcionamiento y entrega.

En la etapa de análisis se examinan las necesidades del proceso industrial, se definen las características del entorno de la aplicación, se obtienen y clasifican los requerimientos y, se personaliza el servicio.

En la etapa de diseño se representa la solución mediante diagramas o esquemas, considerando la mejor alternativa al integrar aspectos técnicos, funcionales, sociales y económicos. Es decir, se define el escenario, se estructura el software, se definen los tiempos y, se asignan los recursos.

En la etapa de desarrollo se implementa el diseño en un producto de software, codificando en el lenguaje de programación seleccionado, realizando las pruebas unitarias, documentando el código y, codificando las ayudas.

En la etapa de pruebas se verifica el funcionamiento de la aplicación en diferentes escenarios y condiciones. Se simula el escenario y se emula el dispositivo móvil, se hacen pruebas de campo con equipos reales y, se evalúa la aplicación con el análisis de las 6 M's para valorar el potencial de éxito [18], y con su usabilidad [19].

En la etapa de entrega se da por finalizada la aplicación y, se proporciona el ejecutable, el código fuente, la documentación y el manual del sistema.

1.6 NARRATIVA DE INSTRUMENTACIÓN VIRTUAL.

En esta fase se establece el modelo de programación para el instrumento virtual y, se diseña e implementa la interfaz que emula el proceso industrial.

Para el desarrollo de estas aplicaciones, se utilizan modelos de programación basados en tratamiento de errores, sistemas de comunicación, máquinas de estado, programación orientada a objetos y estructuras de interfaz de usuario.

2. RESULTADOS.

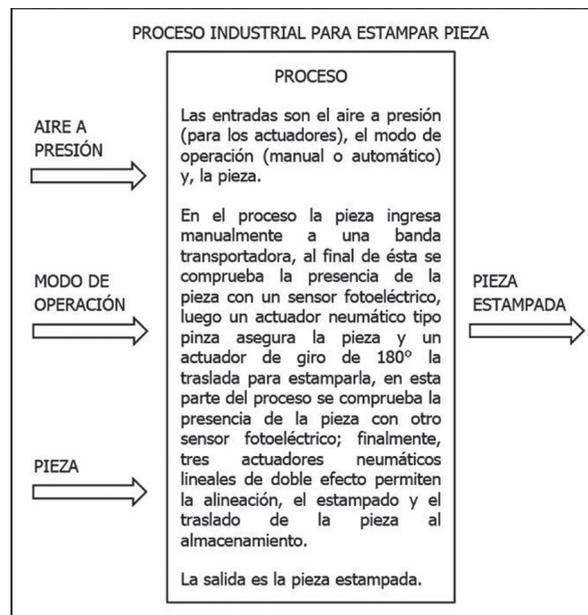
A continuación se describen los resultados del proyecto, que integra tecnologías de uso libre para proporcionar una solución de gestión a un proceso industrial, utilizando la metodología mencionada.

2.1 EL PROCESO.

En el proyecto se elaboró un proceso industrial para estampar piezas, que implementa como planta un sistema

neumático, con elementos comúnmente utilizados en este tipo de procesos como una banda transportadora, actuadores neumáticos y electroválvulas [31]. Los elementos hacen parte del Módulo didáctico para la simulación de procesos industriales [32], disponibles en los laboratorios de electricidad y electrónica de la Universidad Francisco de Paula Santander. En la Figura 1, se representa el diagrama EPS del proceso industrial, identificando su naturaleza y funcionamiento.

FIGURA 1. Diagrama EPS del proceso industrial.



El proceso industrial se implementa físicamente mediante un sistema neumático, el cual se define como la planta en el sistema de control y, establece las variables manipuladas y controladas por el controlador. A continuación se describe el sistema neumático, identificando los elementos, las variables, el diagrama de bloques, y las etapas.

El sistema neumático utiliza elementos primarios y finales de control y, elementos para el suministro y el ensamble. Estos elementos se encuentran detallados en la Tabla 1.

Las entradas y salidas del sistema neumático se definen como las variables, las cuales, se identifican como manipuladas y controladas según la funcionalidad establecida en el controlador y su función en el proceso. En la Figura 2, se establece el sistema neumático con las respectivas variables.

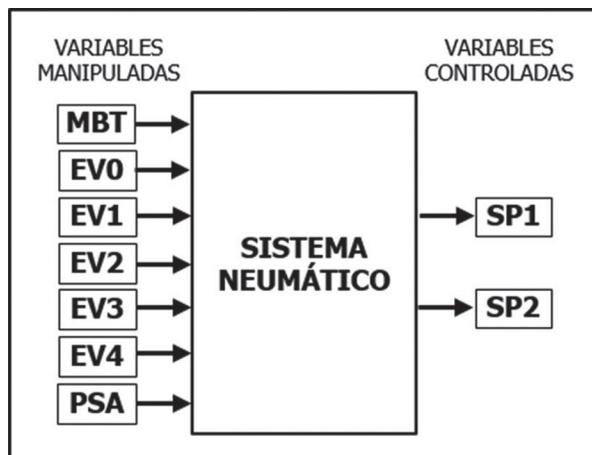
Las variables manipuladas son siete (7), cinco (5) para las electroválvulas (EV0, EV1, EV2, EV3 y EV4), una (1) para el movimiento de la banda transportadora (MBT) y

otra (1) para la presión del suministro de aire (PSA). La variable controlada es el detector de presencia de pieza (SP), que usa los sensores (SP1 y SP2), según la lógica del sistema.

TABLA 1. Elementos del sistema neumático.

ELEMENTOS	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
PRIMARIOS DE CONTROL	Sensores	2
	Fotoeléctricos	2
FINALES DE CONTROL	Electroválvulas neumáticas	5
	Electroválvula de 5/2	5
	Actuadores neumáticos	5
	Actuador tipo pinza	1
	Actuador lineal de doble efecto	3
	Actuador de giro 180°	1
	Otros	2
	Banda transportadora	1
Reductor de velocidad	1	
SUMINISTRO Y ENSAMBLE	Perfiles de aluminio	25
	Perfil largo	20
	Perfil corto	5
	Otros	3
	Unidad de mantenimiento	1
	Compresor	1
	Fuente de energía eléctrica	1
TOTAL	42	

FIGURA 2. Variables del sistema neumático.



Las variables manipuladas por las electroválvulas (EV0, EV1, EV2, EV3 y EV4), activan los actuadores de acuerdo con la lógica del controlador y son señales eléctricas provenientes de la etapa de potencia. La electroválvula EV0, acciona el actuador tipo pinza para asegurar la pieza; la electroválvula EV1, acciona el actuador de giro de 180° para transportar la pieza; y las electroválvulas EV2, EV3, y EV4, accionan los actuadores lineales de doble efecto, para alinear, estampar y empujar, respectivamente, la pieza al depósito o almacén.

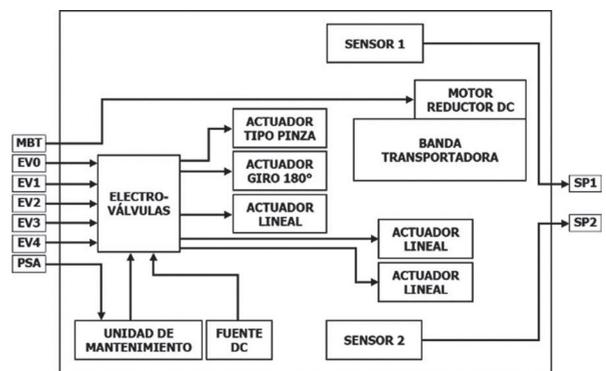
La variable manipulada movimiento de la banda transportadora MBT, activa el funcionamiento de la banda transportadora. Esta variable es una señal eléctrica proveniente de la etapa de potencia y depende de la lógica del controlador.

La variable manipulada presión del suministro de aire (PSA) para el sistema, es una entrada de aire proporcionada por un compresor y se activa de manera manual en la unidad de mantenimiento.

La variable controlada que detecta la presencia de la pieza se realiza mediante dos sensores fotoeléctricos (SP1 y SP2). Los sensores se activan y envían una señal eléctrica al controlador.

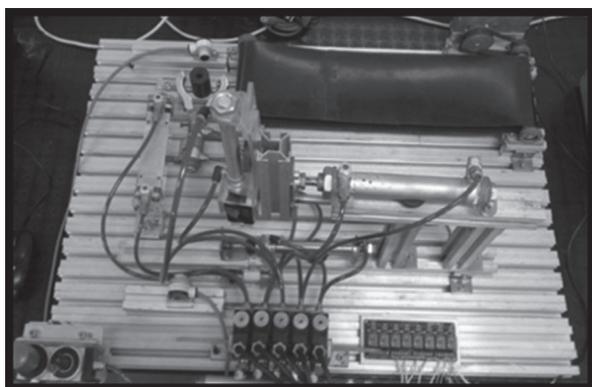
En la Figura 3, se establece el diagrama de bloques del sistema neumático, ubicando los elementos definidos e identificando las variables y su interacción con los elementos.

FIGURA 3. Diagrama del sistema neumático.



Basado en el diagrama de bloques se realiza el montaje físico del sistema neumático para estampar piezas (Ver Figura 4). En esta implementación, se observa el acople, la alineación, el espaciado y la distribución de los elementos del sistema.

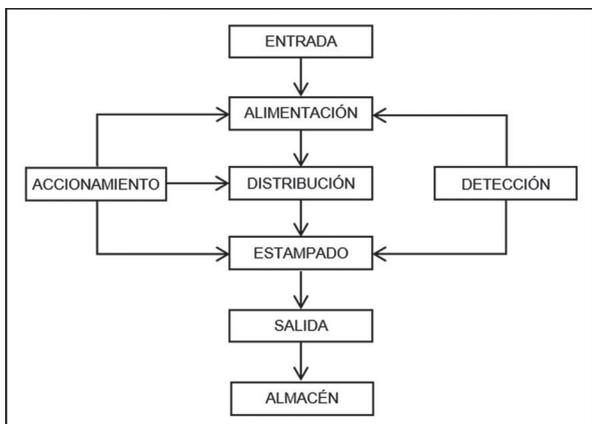
FIGURA 4. Montaje físico del sistema neumático.



El sistema neumático está compuesto por cinco (5) etapas, a saber, accionamiento, alimentación, detección, distribución y estampado. En la Figura 5, se pueden observar las etapas del sistema.

Estas etapas son controladas por el sistema embebido, que a su vez permite al instrumento virtual y a la aplicación móvil, supervisar y controlar el sistema neumático. El sistema embebido controla directamente la etapa de accionamiento y envía las señales para activar los actuadores del sistema; además, recibe las señales del detector de presencia.

FIGURA 5. Etapas del sistema neumático.



2.2 TECNOLOGÍAS.

Continuando con la metodología, se seleccionan las tecnologías basadas en software libre que permitan integrar un instrumento virtual y una aplicación móvil a un sistema embebido, para supervisar y controlar el proceso industrial.

2.2.1 Software y hardware del sistema embebido.

Para seleccionar el hardware del sistema embebido se aplica el método de decisión y selección binaria. Este método exige seleccionar y jerarquizar los parámetros relevantes de los equipos, y construir las matrices de atributos, de coeficientes de énfasis y, de solución. El método establece que el equipo con mayor ponderación es el óptimo para implementar.

Partiendo de los equipos de hardware representativos de los fabricantes líderes en el área de control, automatización y afines, se establecen cuatro equipos tentativos para la implementación. Los equipos son el controlador lógico programable con interfaz humana de referencia OPLC V1210 de Unitronics [33], el ordenador de placa reducida Raspberry Pi modelo B de la fundación Raspberry [34], la placa basada en un microcontrolador ATmega1280 Arduino Mega de Arduino [35], y la placa de inicio en microcontroladores PIC de 16 bits PIC24F Starter Kit de Microchip [36].

Los parámetros seleccionados de los equipos de hardware según la relevancia para la integración con un instrumento virtual y una aplicación móvil son el lenguaje de programación, el entorno de desarrollo, los protocolos de comunicación y el costo. En la Tabla 2, se relacionan dichos parámetros.

TABLA 2. Parámetros de sistemas embebidos.

Hardware	Lenguaje de programación	Entorno de desarrollo	Protocolo de comunicación	Costo (dólares)
OPLC V1210	Ladder	Visilogic	Ethernet, Canbus, RS485, MODBUS, CANopen, GPRS, TCP-IP, GSM	1500
Raspberry Pi	Phyton, C, BASIC	Open Embedded, QUEMU, Scratchbox, Eclipse	USB, HDMI, Ethernet	35
Arduino Mega	Wiring based (C++)	Arduino IDE, Eclipse	UART, USB	30
PIC24F Starter Kit	C	MPLAB IDE	UART, USB, USB OTG	60

La aplicación del método de decisión y selección binaria permitió seleccionar la Raspberry Pi como hardware para el sistema embebido, según la mayor ponderación obtenida mediante el análisis de los parámetros relevantes, con un valor ponderado de 0,416; mientras que el OPLC V1210 obtuvo un valor de 0,305, el Arduino Mega un valor de 0,25 y, en última instancia el PIC24F Starter Kit con un valor de 0,027.

Para el funcionamiento del sistema embebido Raspberry Pi, se instala y configura el software que manipula el hardware, como el sistema operativo y las librerías necesarias para la integración de éste con la aplicación móvil y el instrumento virtual.

Se descarga de la página oficial de Raspberry Pi [34], el paquete denominado NOOBS (sistema operativo) y se descomprime en la tarjeta SD. Para integrar las tecnologías, se instalan las librerías WebIOPi [37], la Wiring Pi [38] y la Pi4J [39].

2.2.2 Software y hardware de la aplicación móvil.

Las herramientas de software son el sistema operativo móvil, el lenguaje de programación y el entorno de desarrollo integrado. Basado en el software se selecciona el hardware correspondiente al dispositivo móvil.

En la actualidad, existen diversos sistemas operativos para dispositivos móviles, como Blackberry OS, Palm OS, Symbian, Windows Mobile, Iphone OS, Java Mobile Edition, Linux Mobile (LiMo), Android, entre otros. Se selecciona Android por ser un sistema abierto que permite interactuar y modificar el sistema operativo en todos sus niveles.

El Lenguaje de programación elegido es Java [40], por la experiencia en el desarrollo con este lenguaje, porque se ejecuta en múltiples plataformas, y porque cumple con las especificaciones técnicas para elaborar e integrar la aplicación móvil Android con el sistema embebido.

Se elige el entorno de desarrollo integrado Eclipse IDE [41], por la experiencia en el uso de la herramienta, porque es libre, versátil y, sus funcionalidades se pueden ampliar con la instalación de paquetes como el kit de desarrollo de aplicaciones para Android (*Android Developers Tools*, ADT) [42].

La aplicación móvil desarrollada, puede ejecutarse en dispositivos móviles (hardware) con versión igual o superior a 2.0 de Android, lo que permite disponer de una amplia gama de equipos en los que se puede implementar la aplicación.

2.2.3 Software y hardware del instrumento virtual.

Para realizar instrumentación virtual existen diversos software que manejan lenguaje gráfico y simplifican el desarrollo de programas, como son LabVIEW de National Instruments [43], Simulink de MathWorks

[44], VisualState de IAR Systems [45], InTouch de Wonderware [46] y Flowcode de Matrix Multimedia [47]. Sin embargo, Java permite crear aplicaciones con interfaz gráfica y, el sistema embebido seleccionado permite integrar aplicaciones en este lenguaje; por lo tanto, se decide implementar el instrumento virtual mediante una aplicación con interfaz de usuario en Java.

Para desarrollar la interfaz del instrumento virtual, se debe instalar el paquete WindowBuilder en Eclipse IDE. Adicionalmente, se instala el software FileZilla que se utiliza como servidor ftp, para el envío de archivos locales hacia un servidor Web, para transferir el instrumento virtual (aplicación gráfica en Java), hacia el sistema embebido. De esta manera, no se necesita un dispositivo de almacenamiento de archivo y se facilita el proceso de depuración y mantenimiento.

El instrumento virtual no requiere un hardware especializado, considerando que la interfaz gráfica está codificada en Java y se aloja en el sistema embebido. Por lo tanto, solo se necesita un monitor con interfaz multimedia de alta definición (*High Definition Multimedia Interface*, HDMI) para visualizar la interfaz, un concentrador USB para expandir los puertos USB del sistema embebido y, un teclado y un mouse USB para controlar la interfaz de usuario.

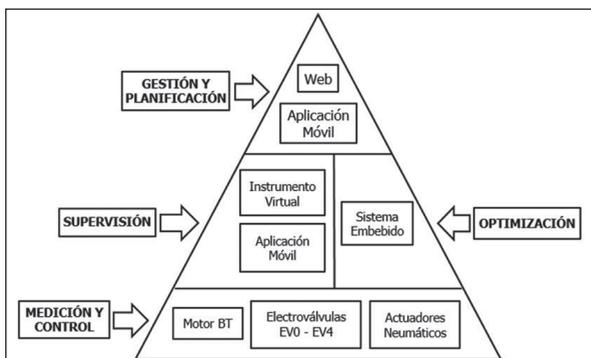
2.3 AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL DEL PROCESO INDUSTRIAL.

A continuación se establecen la pirámide de automatización y la filosofía de control, que representan la definición y los componentes del sistema de control, el lazo de control, la lógica de control y, el diagrama de bloques de la implementación del control.

2.3.1 Pirámide de automatización.

En la Figura 6, se plantea la pirámide de automatización del proceso industrial para estampar piezas, identificando los elementos en los respectivos niveles. En el nivel de medición y control, se establecen los componentes del sistema neumático, como las electroválvulas, los actuadores neumáticos y el reductor de velocidad de la banda transportadora. En el subnivel de supervisión se identifican el instrumento virtual y la aplicación móvil. En el subnivel de optimización se identifica el sistema embebido. Por último, en el nivel de gestión y planificación se identifican el acceso Web y la aplicación móvil que se tienen para el sistema embebido. Con la aplicación de este modelo se plantea una estrategia progresiva de automatización, avanzando según los niveles.

FIGURA 6. Pirámide de automatización.



Los niveles de la pirámide se comunican entre sí para integrar la automatización del sistema. El nivel de medición y control se comunica con los niveles de supervisión y optimización mediante un acople óptico adaptado al puerto de propósito general del sistema embebido. En el segundo nivel, el subnivel de optimización se comunica con el de supervisión por medio del protocolo HDMI al instrumento virtual y, del protocolo Ethernet o Wi-Fi a la aplicación móvil. Finalmente, el nivel de supervisión y optimización se comunica con el nivel de gestión y planificación por medio de la librería WebIOPi del sistema embebido.

2.3.2 Definición y componentes del sistema de control.

El sistema de control aplica un control secuencial (on/off), con la técnica de control por sistema embebido. Este sistema embebido se define como el controlador del proceso y corresponde al ordenador de placa reducida Raspberry Pi modelo B de la fundación Raspberry, el cual permite aprovechar las bondades de una computadora para realizar el control y la supervisión, adaptando a éste un instrumento virtual y una aplicación móvil.

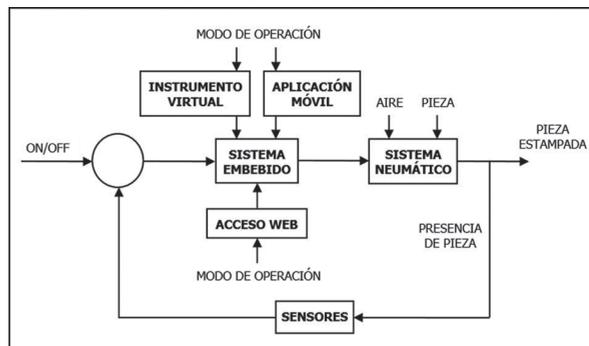
Los componentes en general del sistema de control que se propone son la planta, el controlador, el instrumento virtual, la aplicación móvil, el acceso Web, y los sensores que permiten la retroalimentación. Para nuestro caso, la planta es el sistema neumático, con excepción de los sensores que se identifican aparte por ser la retroalimentación del proceso y, el controlador es el sistema embebido. Sin embargo, el sistema de control cuenta con elementos adicionales como un adaptador Wi-Fi, un enrutador, un concentrador, un mouse y un teclado USB y, una etapa de potencia. Estos elementos permiten integrar la planta, el controlador, el instrumento virtual, la aplicación móvil y los sensores.

2.3.3 Lazo de control.

El diagrama de bloques del lazo de control del proceso industrial contiene toda la información necesaria para

interpretar cada uno de los lazos que componen el sistema, ver Figura 7.

FIGURA 7. Lazo de control.

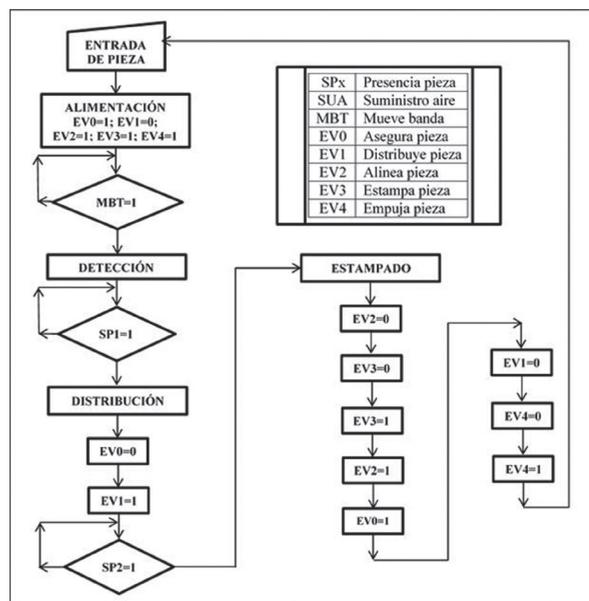


Inicialmente en el diagrama de lazo, se puede identificar el tipo de control (on/off), asimismo la presencia de pieza como variable controlada. El sistema embebido como controlador del sistema, recibe el modo de operación del instrumento virtual, la aplicación móvil o el acceso Web, y es el encargado de cumplir el tipo de control y el objetivo principal de entregar la pieza estampada. Los sensores retroalimentan y permiten la continuidad y secuencia entre las etapas del proceso industrial.

2.3.4 Lógica de control.

La finalidad del proceso industrial es estampar la pieza, para ello se define la lógica de funcionamiento del sistema de control (ver Figura 8), que implementa la lógica del sistema neumático.

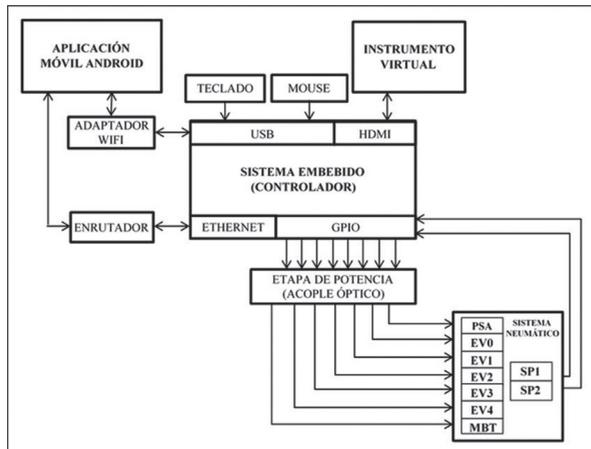
FIGURA 8. Lógica de control.



2.3.5 Implementación del control.

En la Figura 9, se representa el diagrama de bloques de la implementación del sistema de control, especificando los componentes y los protocolos de comunicación. El sistema embebido es el encargado de adquirir las variables y tiene contacto directo con el proceso industrial. El instrumento virtual es el encargado de emular las variables del proceso industrial, las procesa y las presenta al usuario mediante una interfaz gráfica, además, se comunica con el sistema embebido mediante HDMI. La aplicación móvil se comunica con el sistema embebido usando el protocolo TCP/IP (*Transmission Control Protocol/Internet Protocol*), y la etapa de potencia permite adaptar los niveles de tensión entre el sistema embebido y las electroválvulas.

FIGURA 9. Implementación del control.



2.4 SISTEMA EMBEBIDO.

El sistema embebido es el ordenador de placa reducida Raspberry Pi (RPi) modelo B de la fundación Raspberry; compuesto de un sistema integrado en chip Broadcom BCM2835, con unidad central de procesamiento (CPU) ARM1176JZF-S a 700 MHz; un procesador gráfico (GPU) VideoCore IV y 512 MB de memoria RAM; dos puertos USB de propósito general; entradas y salidas de video RCA, HDMI, interfaz CSI y DSI; salidas de audio 3.5 mm y HDMI; almacenamiento integrado SD, MMC y SDIO; conectividad de red Ethernet, periféricos de bajo nivel SPI, I2C, UART y, el puerto de propósito general (*General Purpose Input/Output*, GPIO). Además, fuente de alimentación vía micro USB a 5 v con consumo de mínimo 700 mA.

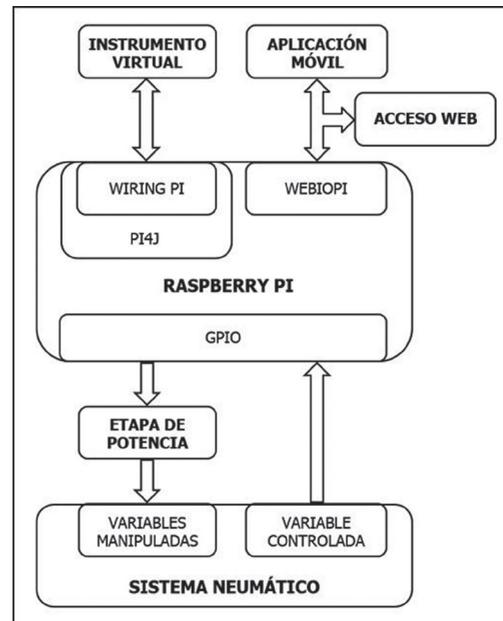
Se usa un puerto USB tipo A con un concentrador USB que agrega teclado y mouse para manipular el instrumento virtual y configurar la RPi. El puerto HDMI es usado para visualizar la interfaz de usuario del

instrumento virtual desarrollado en Java y el puerto GPIO se usa para controlar las variables del sistema neumático. En la tarjeta SD, se almacenan el sistema operativo, las librerías que integran el instrumento virtual y la aplicación móvil, el archivo de configuración de arranque del sistema y, la aplicación Java para el instrumento virtual.

2.4.1 Lógica del sistema embebido.

La lógica se basa en las librerías implementadas que soportan la solución tecnológica. El sistema embebido utiliza la librería PI4J para soportar la aplicación Java del instrumento virtual, y ésta a su vez recurre a la librería Wiring Pi para manipular la información del puerto de propósito general. El sistema embebido también utiliza la librería WebIOPi para dar soporte Web al acceso y, establecer comunicación con la aplicación móvil mediante el protocolo TCP/IP. En la Figura 10, se representa un diagrama que integra las librerías con los componentes del sistema de control.

FIGURA 10. Lógica del sistema embebido.



2.4.2 Configuración de la Raspberry Pi.

La RPi requiere de un sistema operativo, el utilizado en el proyecto es Raspbian, para instalarlo se necesita un cable RJ45 (*Registered Jack 45*) y una SD Card (*Secure Digital Card*) de mínimo 4 GB, se recomienda de clase 4 para un rendimiento óptimo. Además se requiere descargar el software *Win32 Disk Imager* que permite instalar el sistema operativo en la SD Card, que actúa como disco duro.

Instalado el sistema operativo se inserta la SD Card en la RPi y se conecta el cable de ethernet (RJ45) a la misma. Este cable conecta el enrutador con la Raspberry para dar acceso a Internet. Posteriormente se energiza la RPi.

Para configurar la RPi, se establece una conexión con un intérprete de órdenes seguras (*Secure Shell, SSH*), protocolo que sirve para acceder a máquinas remotas a través de una red. El PC y la RPi deben conectarse en la misma red, es decir, al mismo enrutador, por Wi-Fi o por cable RJ45.

El software que gestiona esta conexión en Windows se llama Putty, no requiere de instalación pero si debe ejecutarse en modo administrador para habilitar los permisos cuando se establezca la comunicación remota con la RPi. Para establecer la conexión, el software Putty requiere la IP que el enrutador le asigna a la RPi, el puerto (por defecto 22) y, el tipo que es SSH para este caso.

A partir de este momento se visualiza la consola de comandos de la RPi desde el dispositivo que se esté utilizando, lo que indica que se ha establecido la conexión, y que debe continuarse con la autenticación, editando por defecto "pi" para el usuario y "raspberry" para la clave. En caso de presentarse algún error, se verifica el cumplimiento del procedimiento descrito.

Luego se configura el sistema operativo editando el comando "*sudo raspi-config*", para acceder al menú de configuración, el cual debe actualizarse a través de la opción *Advanced Options* y luego *Update*.

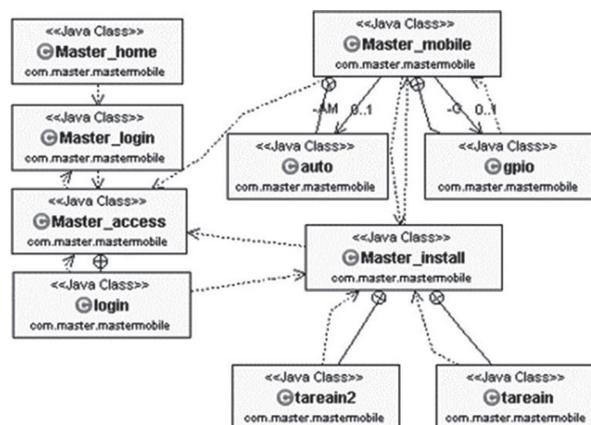
2.5 APLICACIÓN MÓVIL.

La aplicación móvil emula el sistema neumático para manipular sus variables, que adquiere del sistema

embebido utilizando el protocolo TCP/IP, y se desarrolló para dispositivos móviles con sistema operativo Android iguales o superiores a 2.0.

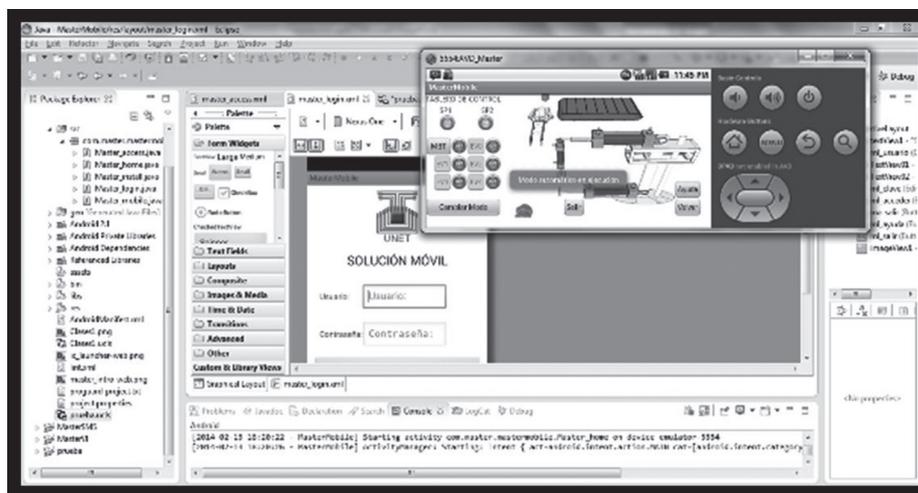
La aplicación móvil se elaboró con el entorno Eclipse, utilizando el SDK y el ADT para Android, y se denominó MasterMobile. Esta aplicación, está compuesta por cinco (5) actividades principales (Master_home, Master_login, Master_access, Master_install y Master_mobile) y cinco (5) actividades secundarias (auto, gpio, login, tareain y tareain2). Cada actividad implementa su respectiva clase. En la Figura 11, se muestra el diagrama de clases de la aplicación móvil Android.

FIGURA 11. Diagrama de clases aplicación móvil.



El entorno Eclipse dispone de un emulador virtual de dispositivo móvil para Android (ver Figura 12), para realizar pruebas del funcionamiento de la aplicación, acercándose en lo posible a las condiciones reales de los equipos, facilitando la depuración de errores.

FIGURA 12. Simulación de la aplicación móvil.



La aplicación móvil se envía al celular por medio de cualquier método de transferencia de archivos, ya sea Bluetooth, FTP, USB, entre otros; se instala y, finalmente está disponible para utilizarse.

Para gestionar el proceso industrial a través del dispositivo móvil, se ingresa al aplicativo, se gestiona la conexión SSH con la RPi, se instalan las librerías requeridas para el óptimo funcionamiento del servicio, y finalmente se selecciona el tipo de control que se quiere tener del proceso (manual o automático). En la Figura 13 se aprecian las interfaces de la bienvenida, la conexión SSH y la instalación de las librerías, utilizando un teléfono real Samsung Galaxy SIII mini, a través de la red Wi-Fi.

FIGURA 13. Actividades de la aplicación móvil.



El modo manual, permite el control de forma manual sobre las electroválvulas y el motor, presentes en el proceso, para activar o detener en tiempo real y de acuerdo con la lógica de control, las variables del sistema. En el modo automático se puede iniciar o detener el proceso y supervisarlo en tiempo real. En la Figura 14 se aprecian las interfaces de selección del modo y la ejecución del modo manual, utilizando un teléfono real Samsung Galaxy SIII mini, a través de la red Wi-Fi.

2.6 INSTRUMENTO VIRTUAL.

El instrumento virtual, se desarrolló con software libre, se alojó en el sistema embebido, e implementó la interfaz HDMI para la interacción con el usuario.

El instrumento virtual elaborado es una aplicación en Java, que implementa la librería gráfica para emular los elementos y las variables del sistema de control.

La aplicación se codificó utilizando el entorno de desarrollo Eclipse y se denominó MasterVI. Esta aplicación implementa tres clases principales (Menú, Pantalla y VI) y dos secundarias (pindefault y process). En la Figura 15, se muestra el diagrama de clases del instrumento virtual.

FIGURA 14. Modos de operación aplicación móvil.

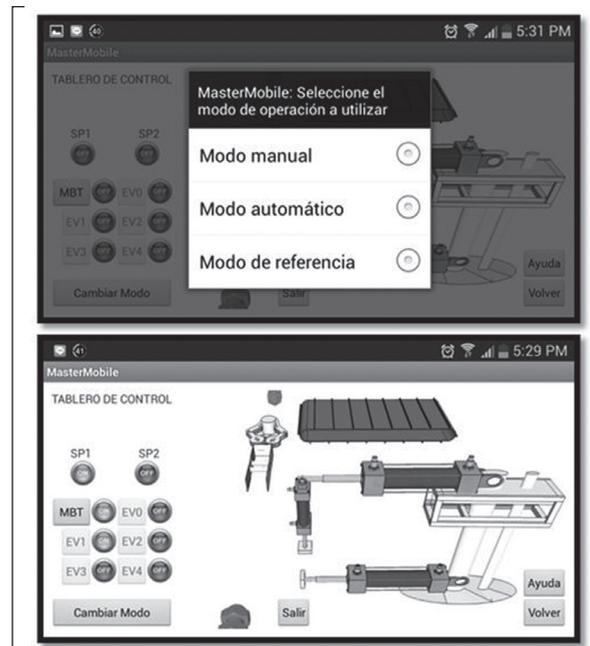
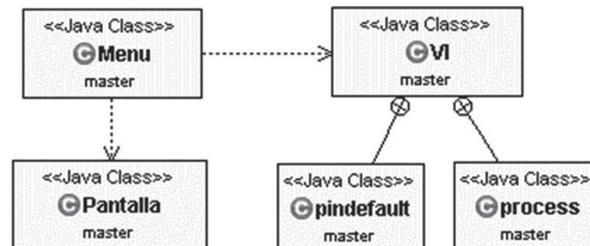
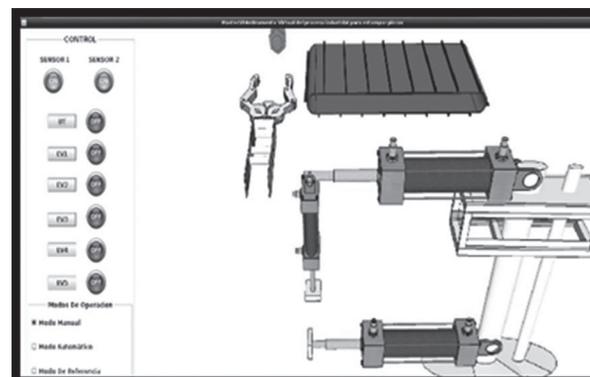


FIGURA 15. Diagrama de clases del instrumento virtual.



El instrumento virtual permite gestionar de manera manual y automática, en tiempo real, el proceso industrial. En la Figura 16, se aprecia la interfaz de usuario del instrumento virtual.

FIGURA 16. Interfaz del instrumento virtual.



3. EVALUACIÓN.

Se realizaron dos evaluaciones a la aplicación móvil, denominadas las 6 M's [18] y la usabilidad [19].

La evaluación del potencial de éxito de las 6 M's debe su nombre a los seis (6) atributos que se miden para cuantificar el potencial de éxito de una aplicación móvil. Estos atributos se denominan *Movement* (Movimiento), *Moment* (Momento), *Me* (Yo), *Multi-user* (Múltiples usuarios), *Money* (Dinero) y *Machines* (Máquinas).

La usabilidad está definida como la capacidad de un software de ser comprendido, aprendido, usado y ser atractivo para el usuario, en condiciones específicas de uso. Los diferentes autores e investigadores del campo, han definido cinco (5) atributos básicos para evaluar la usabilidad, denominados Facilidad de aprendizaje, Eficiencia, Recuerdo en el tiempo, Tasa de errores y Satisfacción.

En las dos evaluaciones mencionadas, se asigna un valor a cada atributo, justificándolo, entre cero (0) y cinco (5), dependiendo qué tan bien la aplicación cumple con cada uno de ellos.

Se recurrió en la Universidad Francisco de Paula Santander, a un grupo de veinte (20) personas con conocimientos acerca del uso e implementación de tecnologías, quince (15) estudiantes de último semestre de ingeniería electrónica y cinco (5) ingenieros electrónicos, que interactuaron con la aplicación móvil en el escenario real, utilizando un teléfono móvil celular Samsung Galaxy SIII mini, a través de la red privada. Cada persona cuantificó y justificó cada atributo de las dos evaluaciones, de acuerdo con la experiencia en el uso del servicio. Los resultados fueron tabulados, se obtuvo el valor medio para cada ítem, y se relacionan a continuación.

3.1 EVALUACIÓN DE LAS 6 M'S.

El atributo Movimiento obtuvo un valor de cuatro con cinco (4,5), porque el usuario puede simultáneamente realizar desplazamientos y gestionar el proceso industrial, utilizando como medio de conexión la red privada Wi-Fi o la red del operador.

El atributo Momento obtuvo un valor de cuatro con cuatro (4,4), porque es posible gestionar el proceso industrial en el instante que se considere conveniente, sujeto a la disponibilidad de la red de telecomunicaciones que se utilice.

El atributo Yo obtuvo un valor de cuatro con siete (4,7), porque la interfaz cumple rigurosamente con las características y los requerimientos del proceso

industrial, además permite configurar el perfil de los usuarios dependiendo del rol que desempeñen.

El atributo Múltiples usuarios obtuvo un valor de dos con cinco (2,5), porque aunque el servicio permite que varios usuarios realicen acciones simultáneamente sobre el proceso industrial, no incorpora la interacción entre ellos.

El atributo Dinero obtuvo un valor de cuatro con tres (4,3), considerando que la empresa se beneficia porque el operario que gestiona el proceso industrial puede realizar simultáneamente otras labores, dentro de una zona de cobertura; porque implementar tecnologías de uso libre reduce los costos de inversión; porque mejora su nivel de competitividad; y porque la aplicación puede hacer uso de la red de telecomunicaciones privada. Para dar mayor movilidad al servicio, debe utilizarse la red del operador de telefonía móvil celular, lo que genera costos para la empresa.

El atributo máquina obtuvo un valor de cuatro (4), porque el servicio solo es soportado por equipos con versión igual o superior a 2.0 de Android.

3.2 EVALUACIÓN DE USABILIDAD.

El atributo Facilidad de aprendizaje obtuvo un valor de cuatro con dos (4,2), porque la aplicación es bastante intuitiva y cuenta con la opción de ayuda en cada pantalla, que provee de información adicional al usuario concerniente a la funcionalidad de la aplicación; porque cuenta con un modo de referencia para tener conocimiento exacto de los pines que físicamente se están usando para el control del proceso. Además, la primera pantalla de interacción incluye una animación referente al proceso de control, aumentando la comprensión.

El atributo Eficiencia obtuvo un valor de tres con cinco (3,5), porque la aplicación está limitada completamente por la capacidad del enrutador que gestiona la conexión entre el dispositivo móvil y la Raspberry Pi, teniendo en cuenta que el número de usuarios conectados a la red y la cantidad de información que se gestiona en un momento determinado, también son relevantes.

El atributo Recuerdo en el tiempo obtuvo un valor tres con ocho (3,8), porque las opciones de ayuda y la información incluida en las pantallas, mejora el aprendizaje y por ende su recuerdo en el tiempo.

El atributo Tasa de errores obtuvo un valor de cuatro con uno (4,1), porque la aplicación cuenta con un código estructurado que impide al usuario cometer errores que provoquen el mal funcionamiento del proceso o de la misma aplicación; cada actividad, cada botón y cada hilo de ejecución que se gestiona están debidamente

sincronizados y controlados por código, mostrando un mensaje emergente para indicar la acción pertinente, garantizando así el correcto y eficiente funcionamiento del proceso y de la aplicación. En caso de usar la aplicación en una red congestionada, la aplicación puede bloquearse al realizar diferentes acciones de manera simultánea.

El atributo Satisfacción obtuvo un valor de cuatro (4), y no obtuvo justificaciones, indicando los usuarios que el valor estaba sujeto simplemente al nivel de cumplimiento de la expectativa que tuvieron del servicio.

4. CONCLUSIONES.

Fue posible utilizar tecnologías de código abierto para automatizar el proceso industrial, demostrando la posibilidad que tienen las MIPYMES de aplicar estas tecnologías para mejorar su nivel de competitividad, y fundamentando las bases para las futuras investigaciones.

La incorporación de la narrativa de movilidad a la ingeniería básica y de detalle, incluyó la aplicación móvil en los niveles de supervisión y, gestión y planificación, de la pirámide de automatización, agregando el atributo de movilidad a la tradicional instrumentación virtual.

La aplicación móvil permitió al operario del proceso industrial desplazarse en una zona de cobertura, posibilitando desarrollar otras labores de supervisión, mientras gestionó de manera controlada la producción.

Se programó exitosamente la Raspberry Pi mientras ejecutaba la lógica de control del proceso, permitiendo la corrección de errores y su maximización, en tiempo real, sin interrumpir la producción. Esto aumenta su posibilidad de uso en el área del control.

Los resultados de la evaluación de las 6 M's y la usabilidad, realizada a la aplicación móvil, evidenciaron su potencial de éxito y la capacidad de ser comprendida, aprendida y usada. Lo anterior sustentado por los valores asignados a los atributos movimiento, momento, yo, dinero, máquina, facilidad de aprendizaje, tasa de errores y satisfacción.

La validación exitosa de las variables en la lógica de control del proceso industrial, comprobó la alternativa de utilizar un sistema embebido como controlador en una técnica de control.

5. REFERENCIAS.

- [1] Consejo Nacional de Política Económica y Social. (2009). *Política Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación*. Bogotá: Departamento Nacional de Planeación, República de Colombia. Documento Conpes 3582.
- [2] Colciencias & Ministerio de TIC. (2013). *Convocatoria para conformar un banco de propuestas innovadoras de ideación, prototipaje y validación de negocios tic en el marco del programa de emprendimiento apps.co*. Bogotá: Colciencias. Términos de referencia convocatoria 618 APPS:CO.
- [3] Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología "Francisco José de Caldas" Colciencias. (2005). *Plan estratégico del programa nacional de desarrollo tecnológico, industrial y calidad 2005 - 2015*. Bogotá: Colciencias.
- [4] Jaimes, M., Ramírez D., Vargas, A., & Carrillo, G. (2011). Estado del arte vigilancia tecnológica: una aplicación para la innovación. *Revista Gerencia Tecnológica Informática*, 27, 49-56.
- [5] Prada, C. (2004). El futuro del control de procesos. *Revista Iberoamericana de automática e informática industrial. CEA-IFAC*, 4 (1), 5-20.
- [6] Posadas, H. (2011). *Estimación de prestaciones para la exploración de diseño en sistemas embebidos complejos HW/SW*. Tesis de Doctorado no publicada. Universidad de Cantabria, Cantabria, España.
- [7] National Instrument Colombia. (2001). *National Instrument Colombia*. Recuperado (2012, julio 15) de <http://colombia.ni.com>
- [8] Chacón, R. (2002). La instrumentación virtual en la enseñanza de la ingeniería electrónica. *Acción Pedagógica*, 1, 74-84.
- [9] Polanco, K. M., & Beauperthuy Taibo, J. L. (2011). "Android" el sistema operativo de Google para dispositivos móviles. *Negotium, Fundación Miguel Unamuno y Jugo*, 7(19), 79-96.
- [10] Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). (2013). *Como mejorar la Competitividad de las pymes en la Unión Europea y América Latina y el Caribe*. Santiago de Chile: CEPAL.
- [11] Jiménez López, F. R. (2012). Telecommunication Network System for control and monitoring of water treatment plants. *6th Euro American Conference on Telematics and Information Systems EATIS 2012, del 23 al 25 de mayo de 2012*. (p.335-338). Valencia, España. ISBN: 978-1-4503-1012-3.

- [12] Jiménez López, F. R., & Jiménez López, A. (2012). Temperature Telemetry System for Agricultural Crops using Free Software. *6th Euro American Conference on Telematics and Information Systems EATIS 2012, del 23 al 25 de mayo de 2012*. (p.367-370). Valencia, España. ISBN: 978-1-4503-1012-3.
- [13] Jabara, F., & Reyes, J. (2012). *Sistema de monitoreo remoto de un proceso industrial*. Tesis de pregrado no publicada. Universidad del Magdalena, Santa Marta, Colombia.
- [14] Gutiérrez, J., Muros, J., Rodríguez, S., Damas, M., & Holgado, J. (2013). Desarrollo de sistemas industriales mediante dispositivos empotrados basados en Java. *IV Jornadas de Computación Empotrada (JCE), del 17 al 20 de septiembre de 2013*. 1, 1-9.
- [15] Acosta, R. (2013). Sistema informático para la supervisión y control de un horno eléctrico desde dispositivos móviles con Android. *Congreso internacional COMPUMAT 2013 del 27 al 29 de noviembre de 2013*. Habana, Cuba: Universidad de las Ciencias Informáticas. ISBN: 978-959-286-022-3.
- [16] Ipanaqué, W., Aguirre, D., & Belupú, I. (2012). Desarrollo de software SCADA para supervisar y monitorizar procesos industriales. *XV Congreso Latinoamericano de Control Automático CLCA 2012 del 23 al 26 de octubre de 2012*. Lima, Perú: Pontificia Universidad Católica del Perú.
- [17] NI CompactRIO. (2014). *National Instrument Corporation*. Recuperado (2014, febrero 15) de <http://www.ni.com/compactrio/esa/>
- [18] Ahonen, T., Barret, J. & Golding, P. *Services for UMTS, creating killer applications in 3G*. West Sussex: John Wiley & Sons, 2002.
- [19] Ferré G., X. (2010). Principios Básicos de Usabilidad para Ingenieros de Software. *Universidad Politécnica de Madrid*, 1, 1-8.
- [20] Gastelbondo, W. (2005). *Ingeniería para la construcción de procesos de capacidad simple para el desarrollo de métodos de detección y diagnóstico de fallas*. Tesis de pregrado no publicada. Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia.
- [21] Rocco, T., Maldonado, L. C., Aranguren, S., & Peñalosa, S. (2009). Ingeniería de automatización para el proceso de humectación de la arcilla en las industrias del Norte de Santander - Colombia. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, 1 (13), 49-56.
- [22] Cárdenas, O. (2004). *Transductores Industriales*. Mérida, Venezuela: Facultad de Ingeniería ULA.
- [23] Salvendy, G. (2001). *Handbook of industrial engineering: technology and operations management*. Estados Unidos: Wiley.
- [24] Instrumentación Electrónica. (2012). *Instrumentación Electrónica*. Recuperado (2013, febrero 1) de <http://www.unet.edu.ve/~andrick/>
- [25] Medina D., B., & Gómez R., J. (2010). Gestor de contenidos para comercio móvil. *Revista Gerencia Tecnológica Informática*, 25, 27-37.
- [26] Camargo A., L. L., Castro C., S. A., & Sepúlveda M., S. B. (2010). Aplicación móvil de telemedicina para pacientes hipoglucémicos y diabéticos. *Revista Respuestas*, 15, 52-62.
- [27] Medina D., B., Camargo A., L. L., & Gasca M., M. C. (2013). Modelo de negocios B2C a través de las tecnologías móviles en un centro comercial. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, 21, 1-8.
- [28] Camargo A., L. L., Medina D., B., & Gómez R., J. (2013). Servicio de M-Comercio. Sistema de interacción entre un centro comercial y sus visitantes utilizando las tecnologías WAP y Bluetooth. *Revista Chilena de Ingeniería*, 21, 99-110.
- [29] Gómez, R., Galvi, A., & Mariño, O. (2006). Ingeniería de software educativo con modelaje orientado por objetos: un medio para desarrollar micromundos interactivos. *Informática Educativa UNIANDÉS – LIDIE*, 11 (1), 9-30.
- [30] Beck, K., Beedle, M., Bennekum, A., et al. (2001). *The Agile Alliance. Manifesto for Agile Software Development*. Recuperado (2012, octubre 1) de <http://agilemanifesto.org/>.
- [31] Soto V., A. J., Pinzón C., C. A., & Medina D., B. (2013). *Control de procesos industriales desde dispositivos móviles*. Tesis de pregrado no publicada. Universidad Francisco de Paula Santander, San José de Cúcuta, Colombia.
- [32] Murcia, V. H. (2003). *Implementación de un sistema modular didáctico para la simulación de procesos industriales en la Universidad Francisco de*

Paula Santander. Tesis de pregrado no publicada. Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta, Colombia.

- [33] Unitronics. (2011). *Unitronics - Home*. Recuperado (2012, diciembre 15) de <http://www.unitronics.com>
- [34] Raspberry (2012). *Raspberry Pi*. Recuperado (2012, julio 28) de <http://www.raspberrypi.org>
- [35] Arduino. (2012). *Arduino - ArduinoBoardMega*. Recuperado (2012, septiembre 3) de <http://arduino.cc/es/Main/ArduinoBoardMega>
- [36] Microchip Technology Inc. (2010). *Microchip Technology Inc*. Recuperado (2012, diciembre 2) de <http://www.microchip.com>
- [37] Webiopi. (2013). *Webiopi - Raspberry Pi Internet of Things framework - Google Project Hosting*. Recuperado (2013, marzo 28) de <https://code.google.com/p/webiopi>
- [38] Wiring Pi. (2012). *Wiring Pi*. Recuperado (2013, marzo 4) de <http://wiringpi.com>
- [39] Pi4J. (2012). *The Pi4J Project*. Recuperado (2013, abril 21) de <http://pi4j.com>
- [40] Oracle Technology Network. (2010). *Oracle Technology Network for Java Developers*. Recuperado (2012, junio 2) de <http://www.oracle.com/technetwork/java/index.html>
- [41] The Eclipse Foundation open source community website. (2011). *Eclipse RSS*. Recuperado (2012, agosto 2) de <http://www.eclipse.org>
- [42] Installing the Eclipse Plugin. (2012). *Android Developers*. Recuperado (2012, octubre 2) de <http://developer.android.com/sdk/installing/installing-adt.html>
- [43] LabVIEW. (2013). *LabVIEW de National Instruments*. Recuperado (2013, junio 10) de <http://colombia.ni.com>
- [44] Simulink. (2013). *Simulink de MathWorks*. Recuperado (2013, junio 15) de <http://www.mathworks.com/products/simulink>
- [45] VisualState. (2013). *VisualState de IAR Systems*. Recuperado (2013, junio 15) de <http://www.iar.com/Products/IAR-visualSTATE>
- [46] InTouch. (2013). *InTouch de Wonderware*. Recuperado (2013, agosto 26) de <http://www.wonderware.es>
- [47] Flowcode. (2013). *Flowcode de Matrix Multimedia*. Recuperado (2013, junio 10) de <http://www.matrixsl.com/flowcode>