



## Sistema HMI-PLC-ADF- Motor CA para control de velocidad HMI-PLC-ADF-CA Motor system to speed control

Quezada-Quezada José Carlos  
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo  
Escuela Superior de Tizayuca  
Correo: [jcarlos@uaeh.edu.mx](mailto:jcarlos@uaeh.edu.mx)  
<https://orcid.org/0000-0003-3125-3708>

Flores-García Ernesto  
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo  
Escuela Superior de Tizayuca  
Correo: [efloresg@uaeh.edu.mx](mailto:efloresg@uaeh.edu.mx)  
<https://orcid.org/0000-0002-4606-8217>

González-Cadena Maribel  
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo  
Escuela Superior de Tizayuca  
Correo: [marglez@hotmail.com](mailto:marglez@hotmail.com)  
<https://orcid.org/0000-0001-5371-0442>

Bautista-López Jorge  
Centro Universitario de la Universidad Autónoma del Estado de México, Zumpango  
Correo: [jobaulo@gmail.com](mailto:jobaulo@gmail.com)  
<https://orcid.org/0000-0002-0055-2310>

### Resumen

El presente artículo propone el control de velocidad para motores de CA mediante un sistema conformado por Interfaces Humano Máquina (HMI) - Controlador Lógico Programable (PLC) - Variador de Frecuencia (AFD) para tres modos de control; velocidades preestablecidas, lazo abierto y lazo cerrado, los cuales son utilizados en diversos procesos industriales. Se muestran las interfaces de usuario gráficas diseñadas y los algoritmos de control desarrollados, así como las reglas lógicas de control, monitoreo y animación para cada uno de los modos de control. La eficiencia del sistema de velocidad se logra al separar la lógica de programación de seguridad y de control crítico en el PLC y la lógica de control, monitoreo y animación en la HMI. Para el modo de control de lazo cerrado solo se muestra el diseño, la sintonización del controlador Proporcional + Integral + Derivativo quedaría en función de la aplicación. La propuesta es con base en los estándares internacionales IEC-61131-3 para el desarrollo de los algoritmos de control en lenguaje de programación Diagrama Escalera (LD) y por ANSI - ISA 101.01 para el diseño de interfaces hombre máquina, lo que garantiza su funcionalidad en aplicaciones reales industriales. Resalta la importancia de generar sistemas HMI - PLC - ADF - Motor CA para aplicaciones en máquinas o procesos de producción fundamentadas en los estándares internacionales y la reducción de lógica de control en los PLC optimizando su utilización en el control, mientras todas las demás reglas de control, monitoreo y animación se ejecutan en una computadora con mayor velocidad y capacidad de procesamiento.

**Descriptores:** Variador de frecuencia, controlador lógico programable, interfaz humano máquina, algoritmo en diagrama escalera, control supervisorio y adquisición de datos.

### Abstract

The present article proposes speed control for AC motors by means of a system conformed by Human Machine Interfaces (HMI) - Programmable Logic Controller (PLC) - Variable Frequency Drive (AFD) for three control modes; pre-set speeds, open loop and closed loop, which are used in various industrial processes. The graphical user interfaces designed and developed control algorithms are shown, as well as the logic control, monitoring and animation rules for each one of the control modes. The efficiency of the speed system is achieved by separating logic of safety programming and critical control in PLC and logic of control, monitoring and animation in HMI. For closed loop control mode only the design is shown, tuning of the Proportional + Integral + Derivative controller would depend on the application. Proposal is based on the IEC-61131-3 international standards for development of control algorithms in Ladder Diagram (LD) programming language and by ANSI - ISA 101.01 for design of man machine interfaces, which guarantees its functionality in real industrial applications. It highlights importance of generating HMI - PLC - ADF - CA Motor systems for applications in machines or production processes based on international standards and the reduction of control logic in PLCs optimizing their use in control, while all the other rules of Control, monitoring and animation are executed on a computer with greater speed and processing capacity.

**Keywords:** Variable frequency drive, programmable logic controller, human machine interfaz, ladder diagram algorithm, supervisory control and data acquisition.

## INTRODUCCIÓN

La unidad variador de frecuencia-motor CA reduce los costos de operación en máquinas y procesos que requieren de control de velocidad. La unidad puede ser configurada para trabajar con torque constante, lo que ha permitido en ciertos procesos sustituir las unidades de variador de frecuencia con motor de CD y por consiguiente la reducción de los costos en equipamiento para el control de velocidad. Por otro lado, la integración de HMI-PLC para el control de procesos se ha incrementado en la industria y en la educación se han propuesto sistemas HMI-PLC para la enseñanza en el área de automatización.

En Aydogmus *et al.* (2009) se muestra un laboratorio remoto basado en sistema SCADA para el control de un motor de inducción mediante variador de frecuencia. El sistema usa señales estándar de voltaje para las entradas y salidas analógicas al PLC. El algoritmo de control considera las protecciones de sobrecarga y sobre-velocidad del motor. La HMI muestra los instrumentos virtuales para la selección de la dirección de rotación, el modo manual-automático para el lazo de control cerrado, botones de arranque y paro y un selector para prueba del sistema con el motor acoplado a carga y sin carga. Un sistema HMI-PLC-ADF se muestra en Patel *et al.* (2014) para el control de una máquina lavadora de botellas. Se muestra el diagrama de flujo del sistema y el algoritmo de control de nivel y presión en lenguaje diagrama a bloques. Se muestra la HMI, pero no se indica su diseño, el controlador es un PLC *Siemens*<sup>MR</sup>.

Una aplicación de HMI-PLC-ADF para el control de llenado de agua de un tanque, se muestra en Z., Y. y Xiaohui (2012), donde el ADF puede controlar una sola bomba de un grupo de seis en función de los interruptores de límite en el tanque. El sistema utiliza la estrategia de control en cascada, contempla modo de operación manual-automático y botones de arranque y paro. Solo se muestra el diagrama de flujo del diseño de control propuesto y se mencionan los componentes utilizados para la HMI y el PLC de la firma *Modicon*<sup>MR</sup>. En Li y Xu (2012) se propone un control de nivel en un tanque de almacenamiento a través del control de velocidad de un motor de CD con un sistema HMI-PLC. El artículo solo muestra las tablas de variables en la HMI y en el PLC, así como la interfaz de usuario gráfico. El sistema se basa en equipo de la marca *Mitsubishi*<sup>MR</sup>.

En Quezada *et al.* (2014) se muestra el control y monitoreo de un pozo de agua potable usando tecnología HMI-PLC-ADF, las reglas de control y animación en diagramas de flujo y el algoritmo de control en diagrama

de escalera para el control de las variables velocidad, temperatura, concentración de cloro, flujo, presión y conductividad. Una aplicación de HMI-PLC-ADF para el control de una máquina de lana y casimir se muestra en Yunhui y Yiping (2012), donde resaltan la importancia de los ADF en cuanto a eficiencia energética, en la regulación de velocidad y frenado. Se propone un ajuste grueso de la velocidad utilizando lazo abierto y proponen el modo de lazo cerrado utilizando encoder en la retroalimentación. Sin embargo, no se muestran las HMI, ni los algoritmos de control propuestos.

La propuesta para desarrollar laboratorios educativos a través de plantas virtuales con modelos y lógica implementada en *Matlab*<sup>MR</sup> y empleada con *LabVIEW*<sup>MR</sup> se muestra en Rodríguez *et al.* (2016). Se resaltan cinco características a contemplar en el diseño de las interfaces de usuario gráficas; arquitectura, distribución y navegación, color y texto, equipamiento, valores y tablas y alarmas. Se muestra un caso de estudio donde indican el modelo gráfico y parte de la programación, así como las HMI propuestas del sistema. En Pérez *et al.* (2006) utilizan tecnología SCADA para la enseñanza de control de procesos, donde resaltan la importancia del umbral entre el diseño de sistemas de control teórico y su implementación práctica. El caso que analizan es el control de nivel de un tanque y argumentan la realización del modelo y simulación en *Matlab*<sup>MR</sup>, se muestra una HMI como herramienta para generar el control con la metodología de redes neuronales, sin embargo, solo se muestran los pasos secuenciales de la generación de código en C++, texto estructurado, software de enseñanza en *Matlab*<sup>MR</sup>, generador de código estructurado y red neuronal.

En Selwin y Kumar (2015) se muestra un sistema HMI-PLC para el control de nivel de un tanque que alimenta a una planta hidroeléctrica, a través de dos bombas; una para extraer agua y otra para surtir agua al tanque. Proponen control en cascada de PID difusos, sin embargo no se muestra la HMI, ni el algoritmo de control, solo se describe el proceso general del sistema. Un sistema HMI-PLC con tecnología *RsVIEW32*<sup>MR</sup> y *Allen Bradley*<sup>MR</sup>, respectivamente, se muestra en Lakshmi (2012), el cual se utiliza para la validación experimental de un sistema de control en cascada basado en PDI. Solo se muestra la HMI principal del sistema y una HMI para las tendencias de las variables que comparan. En Aydogmus (2009) se muestra un sistema HMI-PLC para el control de nivel, utilizando lógica difusa para demostrar el bajo costo de la utilización de sistemas SCADA. El sistema es simulado en *Matlab*<sup>MR</sup> e implementado en un PLC *Siemens*<sup>MR</sup>, mostrando el diagrama de flujo del algoritmo de control.

Con base en lo anterior, generalmente no se muestran las reglas de diseño de las interfaces de usuario gráfico (HMI), así como los algoritmos de control implementados en el PLC. El presente artículo propone un sistema HMI-PLC-ADF-Motor CA para tres modos de control de velocidad utilizados en la industria; velocidades preestablecidas, control de lazo abierto y control de lazo cerrado. Se muestran los algoritmos de control en lenguaje diagrama escalera y las reglas de control, monitoreo y animación de las interfaces de usuario gráfico diseñadas. El sistema se integró con el software *Proficy Machine Edition*<sup>MR</sup> (GE, 2013) para el diseño de los algoritmos de control y *Proficy HMI SCADA Cimplicity*<sup>MR</sup> (GE, 2001) para el diseño de las interfaces de usuario gráfico, y el hardware utilizado es un *PACSystem*<sup>MR</sup> (GE's, 20016), variador de frecuencia *AF-60 LP Micro Drive*<sup>MR</sup> (GE, 2011) y un motor de CA trifásico *Baldor*<sup>MR</sup>, donde se realizaron las pruebas al sistema propuesto.

#### SISTEMA PRINCIPAL DE CONTROL DE VELOCIDAD

El sistema de control de velocidad propuesto contempla cuatro HMIs, una interfaz principal para seleccionar el modo de control de velocidad y una para cada modo de control; velocidades preestablecidas, lazo abierto y lazo cerrado. De igual forma, son cuatro algoritmos de control en diagrama escalera, uno principal y uno para cada subsistema de velocidad. El ADF se configura para operar en función del subsistema de velocidad seleccionado. Para fines de descripción, las variables en las HMIs se escriben en letra cursiva y las de los algoritmos de control en letra normal.

La Tabla 1 muestra las variables del algoritmo de control principal; la variable #ALW\_ON (%S7) es una

señal del sistema del PLC y significa siempre energizado; las señales de memoria %M2, %M3 y %M4 son para seleccionar el modo de control de velocidad.

La Figura 1 muestra el algoritmo de control de velocidad principal, el cual se compone de cuatro subrutinas; ACONDICIONAMIENTO siempre está activa por la variable del sistema #ALW\_ON. Esta subrutina es para el escalamiento de la variable de proceso (PV, por sus siglas en inglés) o velocidad real del motor, y para el punto de consigna (SP, por sus siglas en inglés) o velocidad deseada del motor. La subrutina V\_PREESTABLECIDAS es para el control de velocidades preestablecidas; L\_ABIERTO para el control de velocidad de lazo abierto y L\_CERRADO para el control de lazo cerrado.

#### HMI PRINCIPAL DEL SISTEMA DE CONTROL DE VELOCIDAD

La Tabla 2 muestra las variables en la HMI principal del sistema de velocidad. La Figura 2 muestra la HMI principal para el sistema de control de velocidad, tal como se conectó en el sistema donde se realizaron las pruebas. Las HMIs (corriendo en una computadora personal) se comunican vía protocolo Ethernet con el PLC, el cual recibe y envía señales de tipo discreto y analógico de las variables de campo, incluyendo al ADF, que está conectado al motor trifásico de CA.

#### LÍNEA DE CONTROL PARA SEGURIDAD DEL SISTEMA DE VELOCIDAD

Todo sistema de control debe contemplar la línea de seguridad para protección de las personas y de las propias máquinas. La Figura 3 muestra en la línea 1 las variables de seguridad del sistema de velocidad;

Tabla 1. Variables en el algoritmo de control principal

Variable	Direccionamiento	Descripción
#ALW_ON	%S7	Siempre energizada
PREESTABLECIDAS	%M2	Habilita subrutina de velocidades preestablecidas
L_ABIERTO	%M3	Habilita subrutina de velocidad de lazo abierto
L_CERRADO	%M4	Habilita subrutina de velocidad lazo cerrado

Tabla 2. Variables en la HMI principal

Variable en HMI	Descripción
<i>HS Físico</i>	Alarma virtual del estado de paro de emergencia real HS_F (%I1)
<i>Protecciones activas</i>	Alarma virtual del estado de las protecciones del sistema PROTECCIONES (%I2)
<i>HS VIRTUAL</i>	Paro de emergencia virtual (paro por software), controla el estado de HS_V (%M1)
<i>Velocidades preestablecidas</i>	Botón para seleccionar el modo de control de velocidades preestablecidas
<i>Velocidad lazo abierto</i>	Botón para seleccionar el modo de control de velocidad de lazo abierto
<i>Velocidad lazo cerrado</i>	Botón para seleccionar el modo de control de velocidad de lazo cerrado

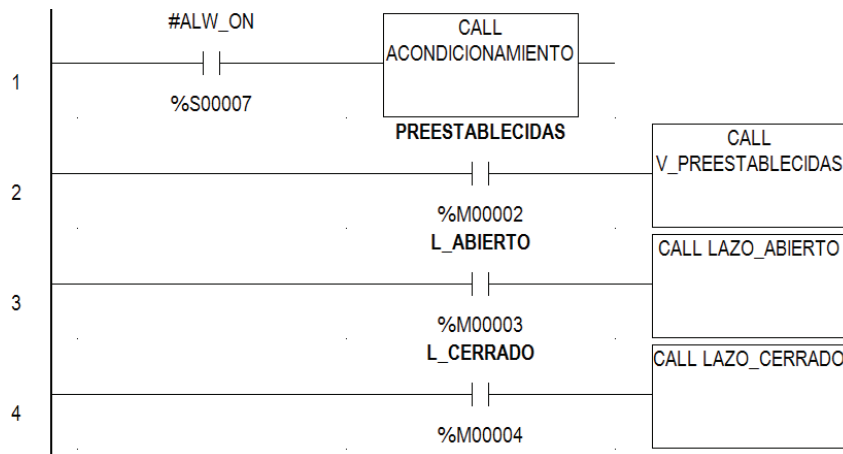


Figura 1. Algoritmo de control principal del sistema de velocidad

Sistema HMI - PLC - ADF - Motor CA para Control de Velocidad

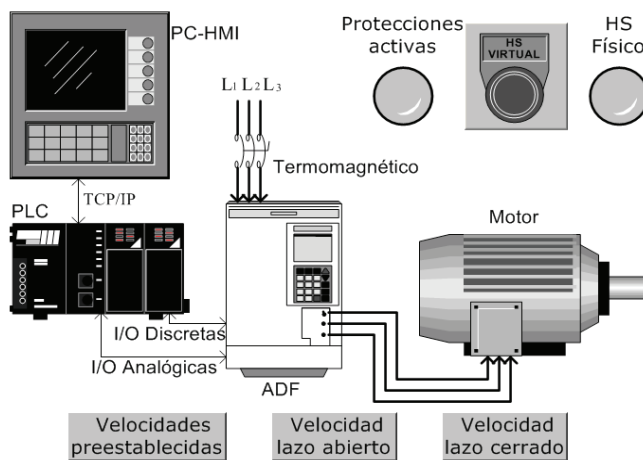


Figura 2. HMI principal del sistema de control de velocidad

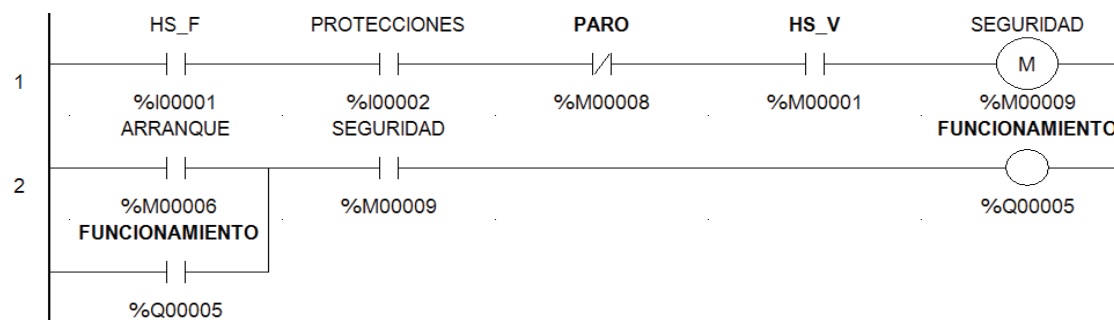


Figura 3. Algoritmo de control para protección del sistema de velocidad

HS\_F (%I1) botón retentivo de paro de emergencia; PROTECCIONES (%I2) que puede ser: sobrevoltaje, sobrecorriente, temperatura en devanados o rodamientos, entre otros; PARO (%M8) botón virtual y HS\_V (%M1) paro de emergencia virtual, los cuales son manipulados desde las HMIs (por software). Esta línea de control de seguridad también permite detener el motor en caso de falla o pérdida de comunicación entre las HMIs y el PLC, así como en caso de falla de energía eléctrica en el sistema, ya que los contactos son normalmente abiertos de las señales HS\_F (%I1) y PROTECCIONES (%I2). Cuando las condiciones de seguridad (HS\_F=1; PROTECCIONES=1; PARO=0; HS\_V=1) se cumplen, entonces se energiza la bobina SEGURIDAD (%M9) y en consecuencia su contacto normalmente abierto, en la línea 2 se cierra, dando las condiciones para poder energizar la bobina FUNCIONAMIENTO (%Q5).

Las tres subrutinas V\_PREESTABLECIDAS, LAZO\_ABIERTO y LAZO\_CERRADO contemplan este algoritmo para protección del sistema independientemente del modo de control de velocidad.

#### REGLAS DE CONTROL Y MONITOREO EN EL SISTEMA DE CONTROL PRINCIPAL

Las HMIs se configuran para que su operación pueda ser con el ratón (botón izquierdo). Se usará el evento clic para indicar la acción hacia un elemento virtual. Las reglas de control y monitoreo para el control de velocidad principal son:

- Si se da clic en el botón *HS VIRTUAL*, entonces la variable HS\_V (%M1) cambia de estado, es decir, si HS\_V = 0 entonces cambia a 1, y si HS\_V = 1 entonces cambia a 0. En función del estado de la variable, el círculo es de color rojo cuando HS\_V = 0 y es de color verde cuando HS\_V = 1.
- Si se da clic en el botón *Velocidades preestablecidas*, entonces la variable PREESTABLECIDAS (%M2) se coloca a uno y las variables L\_ABIERTO (%M3) y L\_CERRADO (%M4) se colocan a cero. Además, la HMI principal se cierra y se abre la HMI para el modo de control de velocidades preestablecidas.
- La lógica es similar para los botones de *Velocidad lazo abierto* y *Velocidad lazo cerrado*, colocando a uno L\_ABIERTO (%M3) y L\_CERRADO (%M4) respectivamente, y colocando a cero las otras dos variables.
- Si la variable HS\_F (%I1) = 0, entonces el texto *HS Físico* es visible y la alarma luminosa (círculo) se pone de color rojo.

- Si la variable HS\_F (%I1) = 1, entonces el texto *HS Físico* y la alarma luminosa no son visibles en ninguna de las HMIs.
- Si la variable PROTECCIONES (%I2) = 1, entonces la alarma luminosa se muestra en color verde, de lo contrario es de color rojo.

Con las reglas lógicas arriba descritas, solo un modo de control de velocidad puede estar en funcionamiento a la vez.

#### ESCALAMIENTO DE SEÑALES SP Y PV A LA VARIABLE VELOCIDAD

Para las señales SP y PV, se realiza un escalamiento para la variable velocidad en un intervalo de 0 a 1800 rpm. El punto de consigna se direcciona a un registro de memoria y la variable de proceso a una entrada analógica, ambas son de tipo entero a 16 bits, por lo que su intervalo de trabajo en formato decimal es de 32768 ( $2^{15}$ ). La variable SP se manipula desde las HMIs para el control de velocidad de lazo abierto y de lazo cerrado. Para la variable PV se utiliza una señal estándar de control de 4 a 20 mA. Ambas señales se condicionan a un máximo valor de 31500 y se dividen entre 17.5 en las HMIs para obtener como máximo valor de velocidad 1800 rpm. La Tabla 3 muestra el escalamiento respectivo para la PV y SP, y la Tabla 4 muestra las variables y direccionamiento para el acondicionamiento de PV.

La Figura 4 muestra el algoritmo de control para el escalamiento de la variable PV. El valor de la señal analógica ENT\_ANALOGICA (%AI15) correspondiente a la velocidad real se mueve de forma continua al registro AUX\_VEL\_REAL (%R1), el cual se divide entre 17.5 en las HMIs para mostrar la velocidad real del motor en el intervalo de 0 a 1800 rpm. Los bloques LE INT y GE INT son para limitar la PV y no exceda el límite inferior de 0 y el límite superior de 31500.

Las reglas lógicas de los algoritmos de acondicionamiento para PV son:

- Si PV (%AI15) es menor o igual que cero, entonces AUX1 (%M10) = 1 y AUX\_VEL\_REAL (%R1) = 0.
- Si PV (%AI15) es mayor o igual que 31500, entonces AUX2 (%M11) = 1 y AUX\_VEL\_REAL (%R1) = 31500.

De igual forma, la Tabla 5 muestra las variables del escalamiento para el SP, y la Figura 5 el algoritmo de control, donde el SP (%R10) se manipula desde las HMIs de velocidad de lazo abierto y de lazo cerrado. En los indicadores del SP se realiza la división entre 17.5 para mostrar la variable velocidad en el intervalo de 0 a 1800 rpm.



Tabla 3. Escalamiento para las señales SP y PV

Decimal	SP (rpm)	PV (mA)	PV (rpm)
0	0	4	0
7875	450	8	450
15750	900	12	900
23625	1350	16	1350
31500	1800	20	1800

Tabla 4. Variables en el algoritmo de control de escalamiento de la señal PV

Variable	Direccionamiento	Descripción
ENT_ANALOGICA	%AI15	Entrada analógica de la VP
AUX_VEL_REAL	%R1	Registro auxiliar para el escalamiento en las HMIs
AUX1	%M10	Memoria auxiliar para el límite inferior de PV
AUX2	%M11	Memoria auxiliar para el límite superior de PV

Las reglas lógicas de los algoritmos de acondicionamiento para SP son:

- Si SP (%R10) es menor o igual que cero, entonces AUX4 (%M12) = 1 y SP = 0.
- Si SP (%R10) es mayor o igual que 31500, entonces AUX5 (%M13) = 1 y SP = 31500.

#### CONTROLADOR DE FRECUENCIA VARIABLE

El diagrama general de funcionamiento del ADF utilizado en el presente trabajo se muestra en la Figura 6, en la parte superior se tiene el rectificador y el oscilador controlado por el modo de conmutación (*switch mode*), el cual está en función de la señal de comando, que puede ser analógica (mA o V) o entradas discretas, como puede observarse en la parte media e inferior de lado izquierdo. Para el modo de control de velocidades preestablecidas se utiliza el comando discreto (entradas digitales 27, 29 y 33), para el control de lazo abierto y lazo cerrado se utiliza el comando analógico (entrada analógica 53), y para la visualización de la velocidad real y como retroalimentación en modo de control de lazo cerrado se usa la señal de salida analógica del pin 42. En el anexo 1 se muestra la configuración del ADF.

#### CONTROL DE VELOCIDADES PREESTABLECIDAS

El modo de control de velocidades preestablecidas se emplea en la industria para procesos que requieren de diferentes velocidades conocidas. La configuración en los ADF se realiza mediante la combinación de tres entradas digitales, con lo cual se pueden configurar hasta siete velocidades preestablecidas en función de cada combinación posible de estos tres contactos, considerando que la combinación de todos los circuitos abier-

tos es velocidad cero del sistema. También se tiene un circuito para el arranque y sentido de giro del motor (entradas digitales 18 y 19, Figura 6).

Es importante resaltar que el diseño de las HMIs deben reducir los algoritmos de control en los PLC para el control de procesos o máquinas, al poder manipular desde la HMI las señales de entrada y salida físicas discretas y analógicas, así como a las de memoria, además de soportar lógica de control y de animación.

El algoritmo de control de la Figura 3 es suficiente para el modo de control de velocidades preestablecidas, ya que el accionamiento de las bobinas que cierran los circuitos con el ADF se controlan desde la HMI. La señal FUNCIONAMIENTO (%Q5) en la Figura 3 está en función de las protecciones y la variable ARRANQUE (%M6) es para poner en operación el motor, la cual se manipula desde las HMIs.

#### HMI PARA EL CONTROL DE VELOCIDADES PREESTABLECIDAS

La Tabla 6 muestra las variables extras en la HMI para el modo de velocidades preestablecidas.

La Figura 7 muestra la HMI para el control de velocidades preestablecidas que contienen las variables de protección y alarma generales. Las variables de texto *Izquierda* y *Derecha* están sobrepuestas e indican el sentido de giro del motor, su visibilidad está en función del selector virtual. La HMI muestra los botones de *Arranque* y *Paro*, los cuales tienen el comportamiento de botones instantáneos, además muestra siete botones para seleccionar las velocidades preestablecidas en el ADF. También muestra un indicador digital para la velocidad real, así como el botón *HMI principal* para ir a la respectiva interfaz.

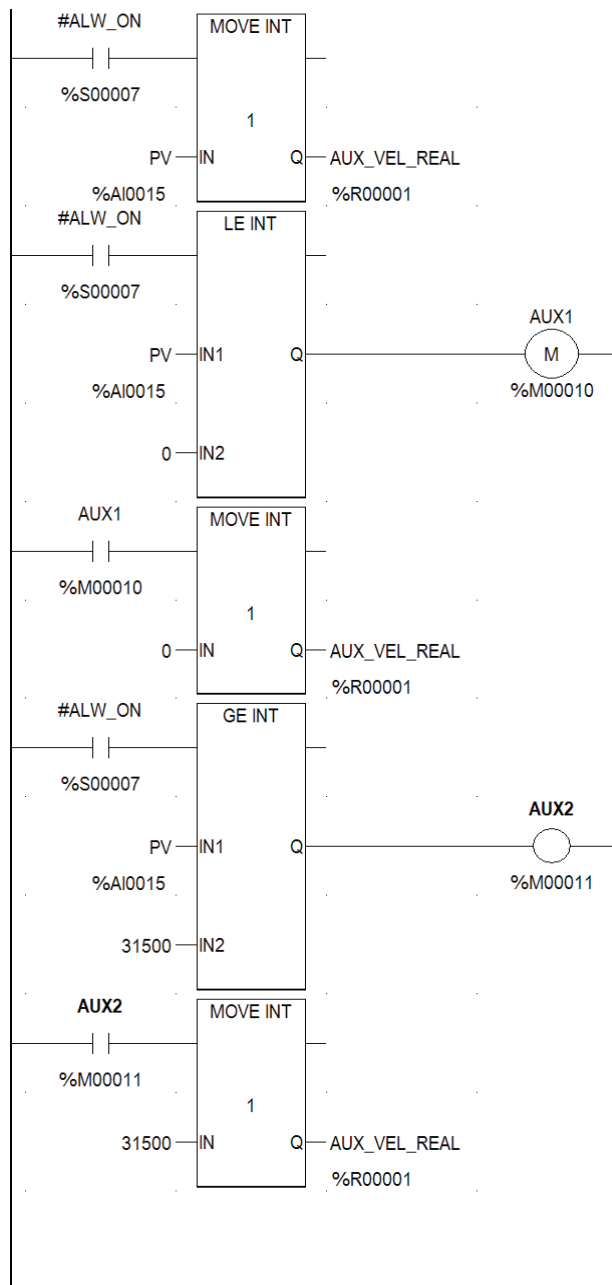


Figura 4. Algoritmo de control para escalamiento de PV

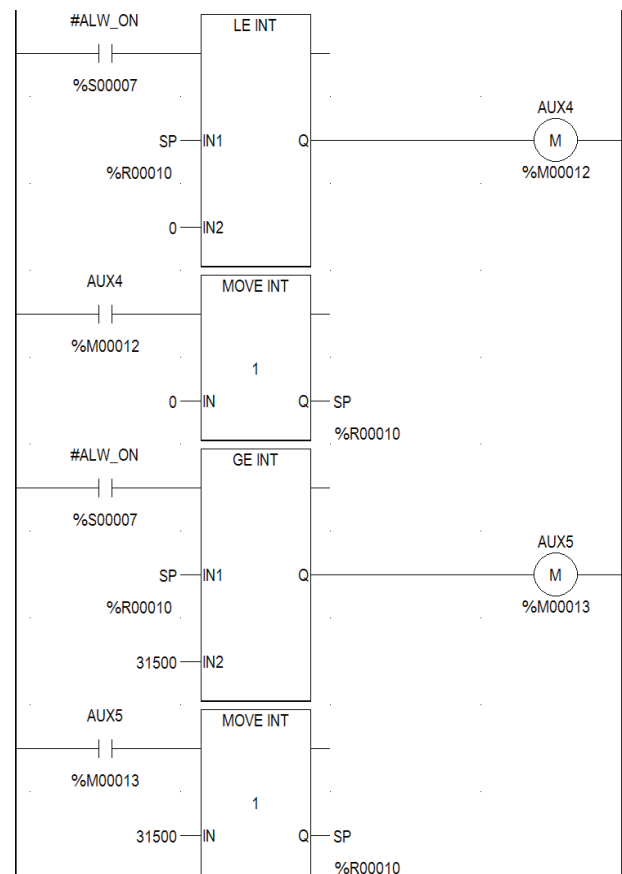


Figura 5. Algoritmo de control para escalamiento de SP

Tabla 5. Variables en el algoritmo de control de escalamiento de la señal SP

Variable	Direccionamiento	Descripción
SP	%R10	Registro del SP
AUX4	%M12	Memoria auxiliar para el límite inferior de SP
AUX5	%M13	Memoria auxiliar para el límite superior de SP

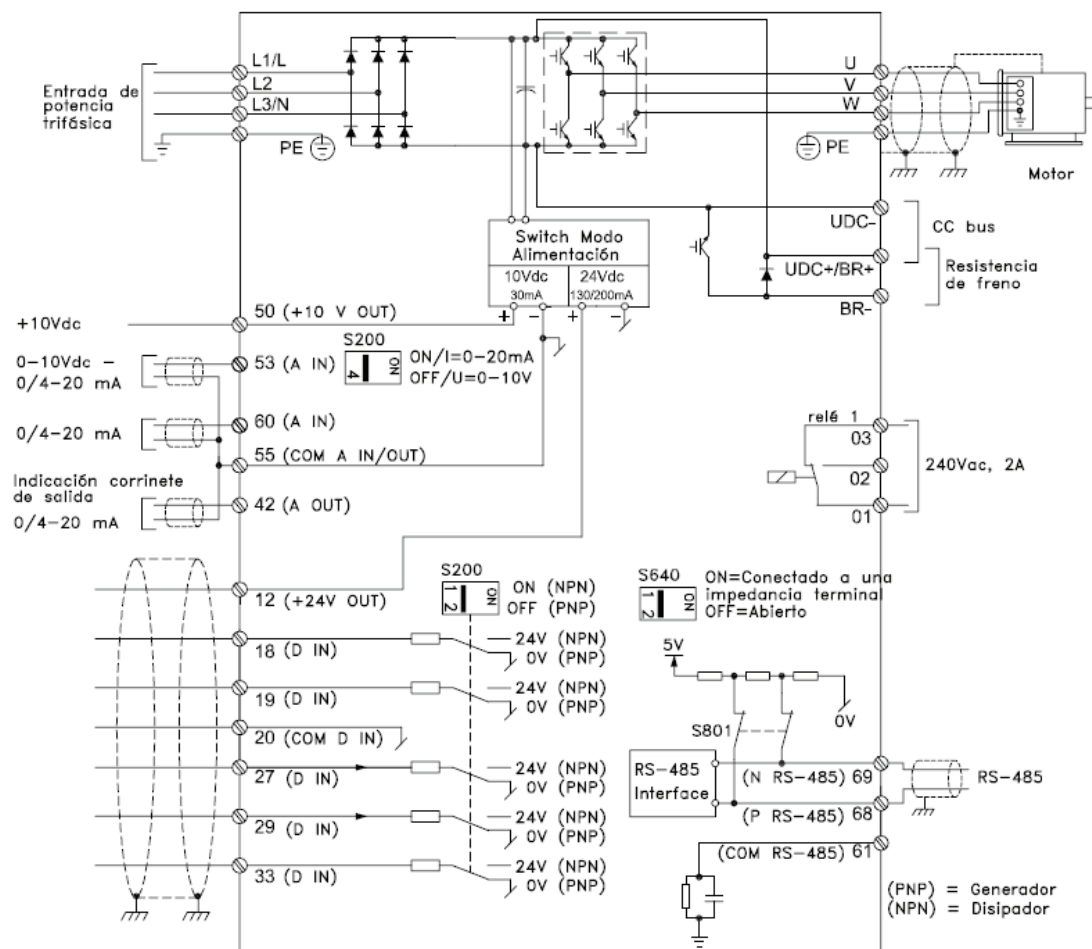


Figura 6. Diagrama interno del ADF [AF60]

Tabla 6. Variables en HMI para el modo de control de velocidades preestablecidas

Variable en HMI	Descripción
<i>Izquierda</i>	Indicador tipo texto para indicar el giro del motor hacia la izquierda
<i>Derecha</i>	Indicador tipo texto para indicar el giro del motor hacia la derecha
<i>Selector virtual</i>	Selector del sentido de giro del motor
<i>Arranque</i>	Botón de funcionamiento del motor
<i>Paro</i>	Botón de paro del motor
<i>Velocidad 1 - 7</i>	Botones de selección de velocidad predeterminada
<i>PV</i>	Indicador numérico de la PV
<i>HMI principal</i>	Botón para regresar a la HMI principal



Las reglas de control y monitoreo para el modo de velocidades preestablecidas son:

- Si se da clic sobre el *selector virtual*, este cambia de izquierda a derecha o viceversa.
- Si el *selector virtual* está a la izquierda, entonces el texto *Izquierda* es visible y la señal de *Sentido de giro* (%Q6) se coloca a cero.
- Si el *selector virtual* está a la derecha, entonces el texto *Derecha* es visible y la señal de *Sentido de giro* (%Q6) se coloca a uno.
- Si se da clic (presiona el botón izquierdo del ratón) en el botón de *Arranque*, entonces la variable ARRANQUE (%M6) se coloca a uno, y cuando se deja de presionar, la señal ARRANQUE se coloca a cero.
- Si se da clic en el botón de *Paro*, entonces la variable PARO (%M8) se coloca a uno, y cuando se deja de presionar la señal PARO se coloca a cero.
- Si la variable FUNCIONAMIENTO (%Q5) = 1, entonces el selector virtual y el botón de *Arranque* no son visibles.
- Si se da clic en alguno de los botones de *Velocidad 1 - 7*, entonces las señales de salida física %Q2, %Q3 y %Q4 se colocan al valor binario correspondiente, por ejemplo, si se da clic en el botón de la *Velocidad 5*, entonces %Q2 = 1, %Q3 = 0 y %Q4 = 1.
- Si se da clic en el botón *HMI principal*, entonces se abre una ventana de precaución con la pregunta *¿El motor será detenido, estás seguro?*; si se presiona el botón de *Cancelar*, entonces la ventana de precaución se cierra y el modo de control de velocidades preestablecidas se mantiene en las mismas condiciones de funcionamiento; si se presiona *Aceptar*, entonces

la ventana de precaución y la HMI de velocidades preestablecidas se cierran, las señales %Q2, %Q3, %Q4 y %Q5 se colocan a cero y se abre la HMI principal.

#### CONTROL DE VELOCIDAD DE LAZO ABIERTO

El modo de control de velocidad de lazo abierto se utiliza en procesos donde se requiere aumentar o disminuir la velocidad de forma continua, lo cual se logra manipulando una señal de salida analógica de 4 a 20 mA desde el PLC al ADF, equivalente al intervalo de velocidad del motor.

La Figura 8 muestra el algoritmo de control para velocidad de lazo abierto, donde puede observarse que solo se agregó un bloque MOVE INT para mover la información del SP (%R10) a la variable de control (CV) correspondiente a la señal de salida analógica %AQ7, la cual está conectada al ADF. El bloque MOVE INT es habilitado por la señal L\_ABIERTO (%M3), la cual se

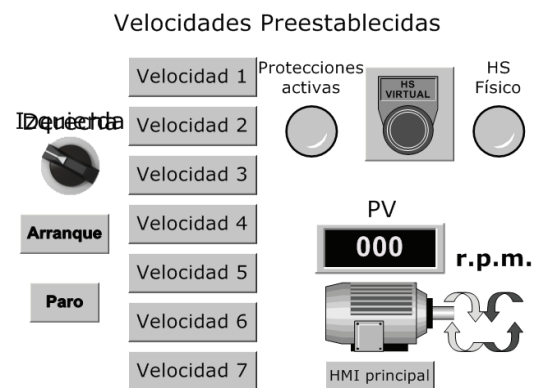


Figura 7. HMI del control de velocidades preestablecidas

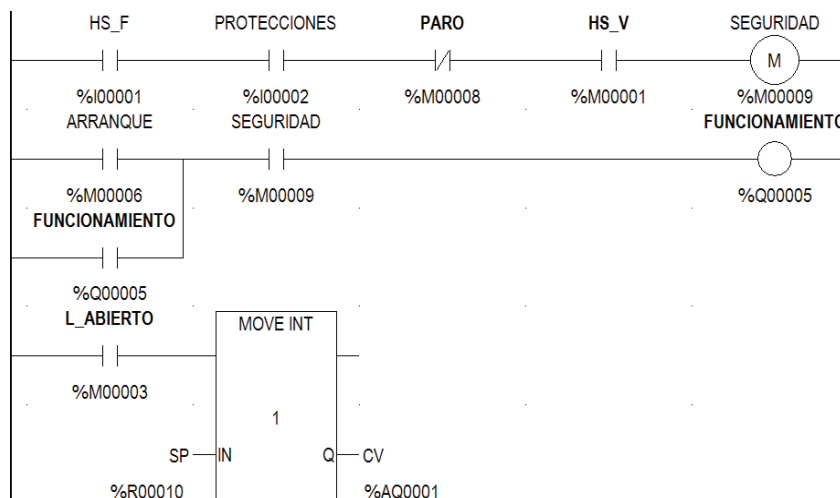


Figura 8. Algoritmo de control para velocidad de lazo abierto

activa cuando en la HMI principal se presiona el botón de *Velocidad de lazo abierto*.

**HMI PARA CONTROL DE VELOCIDAD DE LAZO ABIERTO**

La Tabla 7 muestra las variables que se agregan para el control de velocidad de lazo abierto.

La Figura 9 muestra la HMI diseñada para el control de velocidad de lazo abierto, donde se pueden observar dos botones para incremento y decremento de la variable SP, los cuales están configurados para saltos de 100 rpm. La HMI también tiene un indicador para mostrar la variable SP.

Solo se describen las nuevas reglas de control o monitoreo para el control de velocidad de lazo abierto:

- Si se da clic en el *botón de incremento* (flecha superior), entonces el valor de SP se incrementa en 100 rpm. De igual forma, si se da clic en el botón de decremento (flecha inferior), entonces el valor de SP se reduce en 100 rpm.
- Si el valor de la variable SP es cero, entonces el *botón de incremento* no es visible.
- Si el valor de la variable SP es 1800, entonces el *botón de decremento* no es visible.

En función del escalamiento descrito arriba, la variable SP no puede tener valores negativos, ni valores positivos mayores a 1800 rpm.

Tabla 7. Variables para el modo de control de velocidad de lazo abierto

Variable en HMI	Descripción
Botón subir SP	Incrementa el valor en el registro %R10
Botón bajar SP	Decrementa el valor en el registro %R10
CV	Variable controlada (%AQ1)

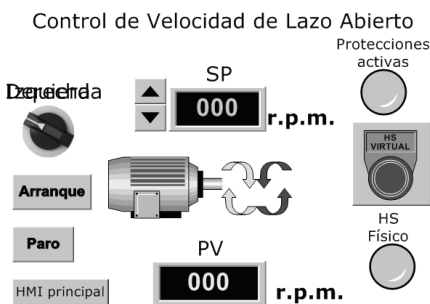


Figura 9. HMI para control de velocidad de lazo abierto

**SISTEMA DE CONTROL DE VELOCIDAD DE LAZO CERRADO**

El modo de control de velocidad de lazo cerrado se utiliza en procesos continuos que usan la variable de proceso como retroalimentación para el control automático.

La Figura 10 muestra el algoritmo de control para el modo de velocidad de lazo cerrado. El bloque BLK CLR WORD se emplea para borrar los 40 registros de memoria de 16 bits que utilizan el bloque PID IND, que inicia en el registro %R50, por lo tanto, este registro es la entrada del bloque BLK CLR WORD. El bloque MOVE INT se utiliza para colocar el límite superior de 31500 de la CV del PID, que es: \#registro de referencia + 9 (%R59). La variable SP (%R10) se manipula desde la HMI, la señal PV (%AI15) viene del ADF como señal analógica de retroalimentación, el contacto AUT\_MAN es para seleccionar el modo de operación del controlador PID, y las variables SUBIR\_CV y BAJAR\_CV son para el control de CV (%AQ1) en modo manual. La Ecuación 1 es del controlador PID IND (GE, 2013) utilizado.

$$CV = kp \cdot \text{Error} + ki \cdot \text{Error} \cdot dt + kd \cdot \text{Derivativa} \cdot CV \text{ bias}$$

donde

$$\text{Derivativa} = (\text{Error} - \text{Error previo})/dt$$

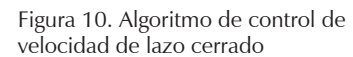
$$dt = (\text{Tiempo transcurrido del actual controlador}) - (\text{Tiempo transcurrido de la última solución del PID})$$

**HMI PARA EL CONTROL DE VELOCIDAD DE LAZO CERRADO**

La Tabla 8 muestra las variables extras utilizadas para el control de velocidad de lazo cerrado, todas ellas únicamente pueden ser manipuladas en modo manual del controlador PID, a excepción del *selector virtual* para selección del modo de control.

La Figura 11 muestra la HMI para el control de velocidad de lazo cerrado. El modo *Automático* o *Manual* del controlador PID se realiza a través de un selector virtual al centro de la HMI y está direccionado a la variable AUT\_MAN (%M16) en el algoritmo. La HMI muestra una ventana auxiliar para la sintonización del PID, es decir, enviar el valor de las constantes *Kp*, *Ki* y *Kd* a los registros: #referencia + 5; + 7; + 6, respectivamente.

Para la HMI de velocidad de lazo cerrado se adicionan las siguientes reglas de control y monitoreo:



Variable en HMI	Descripción
<i>Botón subir CV</i>	Incrementa el valor de CV
<i>Botón bajar CV</i>	Decrementa el valor de CV
$K_p$	Asigna valor a la ganancia proporcional
$K_i$	Asigna valor a la ganancia integral
$K_d$	Asigna valor a la ganancia derivativa
<i>Selector virtual (centro de HMI)</i>	Para seleccionar el modo del controlador PID

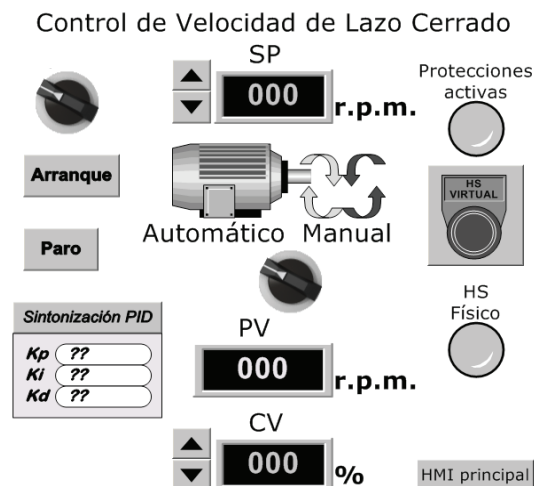


Figura 11. HMI para el control de velocidad de lazo cerrado

- Si se da clic en el selector *Automático-Manual*, entonces este gira 90 grados a la izquierda o derecha en función de su posición actual.
- Si el selector *Automático-Manual* está a la izquierda, entonces la variable de texto *Automático* es visible, la variable de texto *Manual* no es visible, además, la señal AUT\_MAN (%M16) se coloca a cero. También en estas condiciones la ventana de sintonización del PID y los botones de subir y bajar la CV no son visibles.
- Si el selector *Automático-Manual* está a la derecha, entonces la variable de texto *Automático* no es visible. La variable de texto *Manual*, la ventana de sintonización del PID y los botones de subir y bajar la CV, son visibles. La señal AUT\_MAN (%M16) se coloca a uno.

La siguiente sección muestra la funcionalidad del sistema de control de velocidad propuesto.

#### PRUEBAS DEL SISTEMA DE CONTROL DE VELOCIDAD

La Figura 12 muestra el banco de trabajo donde se integró y se realizaron las pruebas al sistema de control de velocidad HMI-PLC-ADF-Motor CA.

La Figura 13 muestra la HMI principal con las protecciones físicas y virtuales activadas de color rojo. La Figura 14 muestra la HMI principal en condiciones de funcionamiento; las variables *Protecciones activas* y *HS\_VIRTUAL* son de color verde y la variable *HS Físico* no está visible.

La Figura 15 muestra la HMI de velocidades preestablecidas, el selector virtual está hacia la *Izquierda*, el botón *Arranque* es visible y en color verde, el botón de

*Paro* no está visible, no está ninguna velocidad seleccionada. La Figura 16 muestra el sistema operando con giro hacia la *Izquierda* con la velocidad cinco preestablecida, el botón correspondiente está en verde y el indicador de velocidad muestra 1439 rpm. El botón de *Arranque* no está visible y el botón de *Paro* está visible y de color rojo.



Figura 12. Sistema de control de velocidad

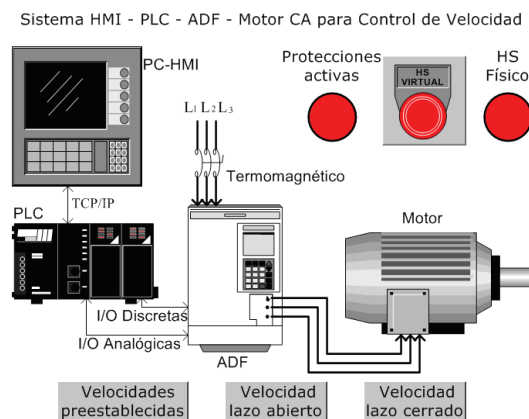


Figura 13. Protecciones del sistema activadas

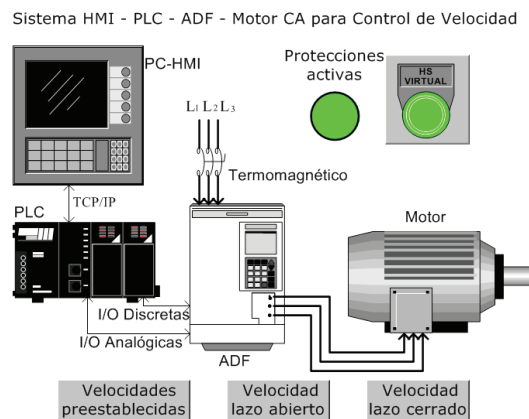


Figura 14. HMI principal en condiciones de funcionamiento

La Figura 17 muestra el motor en rotación hacia la *Derecha* con una velocidad real de 1793 rpm, con el botón de la séptima velocidad en color verde. La Figura 18 muestra la ventana auxiliar de precaución, acción de dar clic en el botón *HMI principal*.

La Figura 19 muestra la HMI para el control de velocidad de lazo abierto en condiciones de funcionamiento, la variable  $SP = 0$  y por consiguiente el botón de *decrementar* no está visible. La Figura 20 muestra la variable  $SP$  en su máximo valor (1800 rpm) y por lo tanto no es visible el botón de *incrementar* dicha variable. La velocidad real  $PV$  muestra 1796 rpm. La Figura 21 muestra el valor de  $SP$  en 600 rpm, ambos botones de incremento o decremento de esta señal son visibles.

Las Figuras 22 y 23 muestran el modo de control de velocidad de lazo cerrado operando. En la Figura 22 se muestra el sistema en *Automático*, con las variables:  $SP = 900$  rpm,  $PV = 1054$  rpm y  $CV = 13\%$ . Por otro lado, en la Figura 23 se observa el sistema en modo *Manual*, lo que permite que la ventana de sintonización del PID sea visible, la cual tiene valores para las constantes  $K_p=1500$ ,  $K_i=5$  y  $K_d=5$ , que se enviaron a los registros 55%, 56% y 57%, respectivamente. En esta figura las variables  $SP = 1300$  rpm,  $PV = 896$  rpm y  $CV = 50\%$ , así como los botones de manipulación de la variable  $CV$  son visibles. La diferencia entre el  $SP$  y  $PV$  que se observa, se debe a los valores de las ganancias que se enviaron al PID, ya que la intención de la ventana auxiliar es mostrar que desde

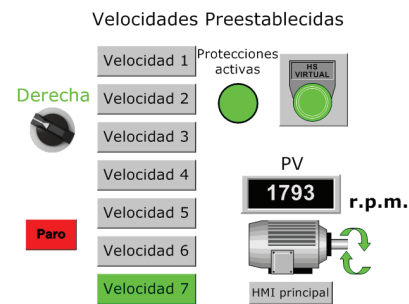


Figura 17. HMI velocidades preestablecidas, velocidad siete

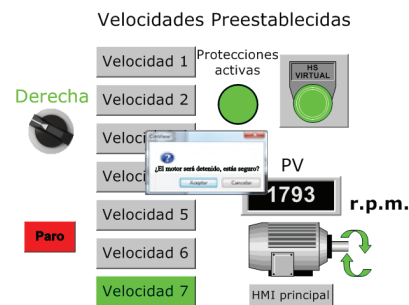


Figura 18. HMI velocidades preestablecidas, ventana auxiliar de precaución

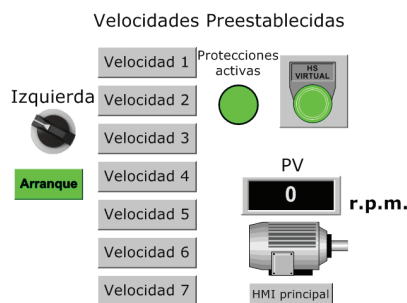


Figura 15. HMI velocidades preestablecidas, velocidad cero

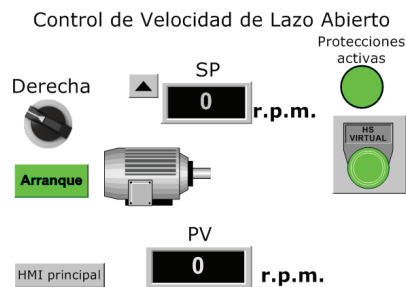


Figura 19.  $SP = 0$  rpm.}



Figura 16. HMI velocidades preestablecidas, velocidad cinco

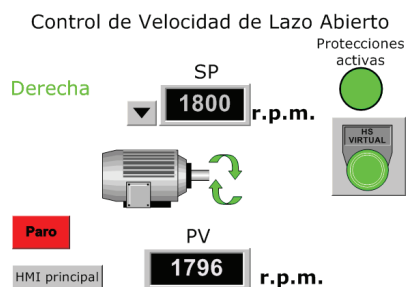


Figura 20.  $SP = 1800$  rpm

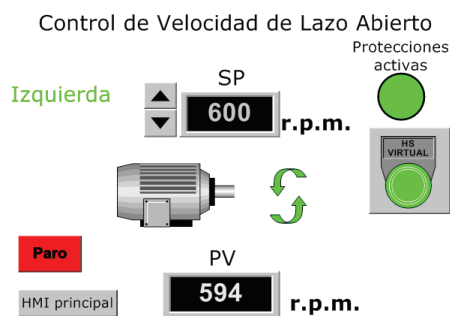


Figura 21. SP = 600 rpm

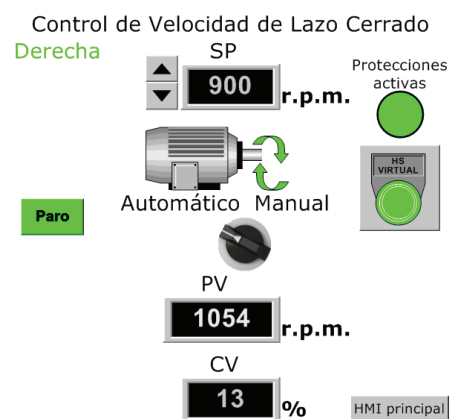


Figura 22. PID modo automático

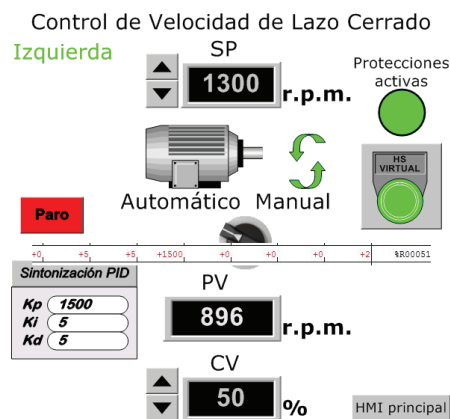


Figura 23. PID en modo manual

la HMI de este modo de control, se pueden agregar los datos de sintonización calculados o a prueba y error.

### CONCLUSIONES

El diseño de HMI debe incluir el mayor código de lógica del proyecto, y así reducir el código de los algorit-

mos de control en los PLC, lo cual hace más eficiente el tiempo de barrido. De igual forma, las reglas lógicas de control, monitoreo y animación en las HMI deben generar un diseño seguro y amigable con los operadores de los sistemas.

Los algoritmos de control en el PLC siempre deben contener el *interlocking* de seguridad del proceso o máquina para garantizar el paro del sistema en caso de falla en la comunicación entre la computadora donde están las HMI y el PLC.

Se presentan tres modos de control de velocidad utilizados en la industria, indicando las reglas lógicas de control, monitoreo y animación en el diseño de las HMI, así como los algoritmos de control para cada modo. En función de la naturaleza de los procesos o máquinas el sistema HMI-PLC-ADF-Motor CA debe ser configurado.

El presente trabajo propone tres modos de control de velocidad, desde el diseño de las HMI y el desarrollo de los algoritmos en diagrama escalera, lo cual será base para cursos virtuales de la variable respectiva.

### ANEXO 1. CONFIGURACIÓN DEL ADF

Comando	Parámetro	Descripción
1-20	5	Potencia de motor (Hp)
1-22	230	Tensión del motor (V)
1-23	60	Frecuencia del motor (Hz)
1-24	12.4	Intensidad del motor (A)
1-25	1750	Velocidad nominal del motor (rpm)
3-2	0	Referencia mínima en frecuencia
3-3	60	Referencia máxima en frecuencia
3-10[1]	40	Referencia interna en porcentaje (24 Hz)
3-10[2]	50	Referencia interna en porcentaje (30 Hz)
3-10[3]	60	Referencia interna en porcentaje (36 Hz)
3-10[4]	70	Referencia interna en porcentaje (42 Hz)
3-10[5]	80	Referencia interna en porcentaje (48 Hz)
3-10[6]	90	Referencia interna en porcentaje (54 Hz)
3-10[7]	100	Referencia interna en porcentaje (60 Hz)
3-15	1	Referencia de entrada analógica 1, terminal 53
3-16	2	Referencia de entrada analógica 2, terminal 60
3-17	8	Referencia de entrada digital, terminal 33



4-10	2	Operación de ambos sentidos
5-10	8	Arranque, entrada digital, terminal 18
5-11	10	Cambio de sentido, entrada digital, terminal 19
5-12	16	Bit 0, entrada digital, terminal 27
5-13	17	Bit 1, entrada digital, terminal 29
5-15	18	Bit 2, entrada digital, terminal 33
6-90	1	Salida analógica, 4-20 mA, terminal 42
6-92	10	Salida analógica en función de la frecuencia

## REFERENCIAS

- Aydogmus, Z. y Aydogmus O. (2009). Web-Based Remote Access Laboratory Using SCADA. *IEEE Transactions on Education*, 52(1), 126-132. <https://doi.org/10.1109/TE.2008.921445>
- Aydogmus, Z. (2009). Implementation of a fuzzy-based level control using SCADA. *Journal of Expert Systems with Applications*, 36(3) Part 2, 6593-6597. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2008.07.055>
- GE Intelligent Platforms, Proficy Machine Edition, Getting started, version 8, GFK-1868K, 2013.
- GE Fanuc Automation North America, Inc., Cimplicity HMI Plant Edition, GFK-1180K, GE Fanuc Automation, 2001.
- GE's Industrial Solutions business, Automation & Control Systems, GFA406L", General Electric, 2016.
- GE Industrial Solutions, AF-60 LP Micro Drive Programming Guide, General Electric, 2011.
- Lakshmi, B. Naveenkumar, Balaji, A. y Bharathi, N. (2012). Experimental validation of PID based cascade control system through SCADA-PLC-OPC and internet architectures. *Journal of Measurement*, 45(4), 643-649.
- Li, S. y Xu, X. (2012). Design of Liquid Level Control System Based on PLC, Software Engineering and Knowledge Engineering: Theory and Practice: Selected papers from 2012 International Conference on Software Engineering, Knowledge Engineering and Information Engineering (SEKEIE 2012), 415-424.
- Patel J., Patel A., Singh, R. (2014). Development of PLC based Process Loop Control for Bottle Washer Machin. *Journal of Procedia Technology*, 14, 365-371.
- Pérez, L., Ríos, A., Márquez, R. (2006). *Teaching Volumes*, 39(6), 620-625.
- Quezada J.C., Flores E., Bautista L., Quezada V. (2014). Diseño e implementación de un sistema de control y monitoreo basado en HMI-PLC para un pozo de agua potable. *Revista Ingeniería Investigación y Tecnología*, 15(1), 41-50.
- Rodríguez F., Guzmán J.L., Castilla, M., Sánchez, J.A., Berenguel, M. (2016). A proposal for teaching SCADA systems using Virtual Industrial Plants in Engineering Education. *Journal of IFAC-Papers On Line*, 49(6), 138-143.
- Selwin, A., Ganesanb, R., Kumar, P. (2015). PLC-HMI Automation Based Cascaded Fuzzy PID for Efficient Energy Management and Storage in Real Time Performance of a Hydro Electric Pumped Storage Power Plant. *Journal of Procedia Technology*, 21, 248-255.
- Y. y Z. y Xiaohui M. (2012). Application of PLC Control and AC Variable-Frequency Technique on Water Intake Systems, International Conference in Electrics, Communication and Automatic Control Proceedings, 31-37.
- Yunhui Y. y Yiping J. (2012). Application of Cashmere and Wool Drawing Machine by Using PLC, Future Control and Automation: Proceedings of the 2nd International Conference on Future Control and Automation (ICFCA 2012) - 2, 127-131.