

Control y Monitoreo de Sistema de Pozo Industrial con Lógica Difusa a través de ESP 32

I.M.E. Eduardo de Jesús García Velázquez¹

¹Owens Illinois Américas (Ingeniería De Planta)
Universidad Nacional Autónoma de México,
Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, Ing. Mecánica Eléctrica. México.

RESUMEN

En la industria el uso de agua para procesos es muy diverso tanto para sistemas de enfriamientos industriales, manufactura metalúrgica, cerámica y química.

Muchas de estas industrias poseen dentro de sus instalaciones pozos de los cuales obtienen sus aguas para estos fines utilizando bombas de diversos tipos y almacenando estas en contenedores plásticos o tanques sujetos a presión para su posterior tratamiento. En algunas industrias de grandes longitudes y/o antigüedades, las condiciones hidráulicas y energéticas de sus instalaciones de distribución de aguas, conllevan a una deficiencia en la distribución del líquido para procesos que dependen de presiones constantes ajustados a un set-point determinado a la capacidad hidráulica de las mismas instalaciones.

Sin embargo, la carencia de controles eléctricos y/o electrónicos en la mayoría de las industrias nacionales mexicanas, conllevan a deficiencias en el aprovechamiento del recurso tanto hidráulico como eléctrico, así como mecánico en el funcionamiento de las bombas; tanto como una deficiente selección de las mismas por desconocimiento, como problemas en el control normalmente de lazo abierto respecto a un sensor de presión, la propuesta de un control robusto que no

dependa de condiciones iniciales de arranque o de estado del sistema hidráulico, como lo sería un tradicional control analógico PID, sugiere una mejora sustancial en el aprovechamiento del recurso hidráulico. El empleo de métodos basados en lógica difusa en los más recientes módulos de microcontrol, los cuales también son capaces de analizar y mostrar datos de manera remota a través de interfaces de Internet de las Cosas (IoT), tanto para monitoreo como control de los sistemas ligados a ellos, sugiere una revolución de bajo coste para sistemas similares a controles DCS, PLC y SCADA, los cuales si bien son más robustos que el planteado en este trabajo, son de mucho mayor coste y sus aplicaciones son a niveles de control mucho más grandes. Para este proyecto se utiliza el sistema de pozo de la vidriera Owens Illinois Planta Los Reyes, en el Estado de México, y su sistema de bombeo por variador de frecuencia trifásico, debido a las constantes caídas de presión en el sistema que alimenta los procesos de enfriado de hornos de formado de vidrio, así como su sistema de rechazo y enfriamiento de turbomáquinas. Este sistema de monitoreo y control de bajo coste ayudará a detectar y corregir de manera inmediata las caídas de presión, así como una fácil interpretación del problema que puede ser visualizado tanto por el personal operativo como por la alta gerencia.

PLANTEAMIENTO DE SITUACIÓN

En la industria actual de muchos sectores es imprescindible el uso de agua. Se conoce como agua industrial que se utiliza en la industria para los procesos de producción y fabricación. Esto incluye, por ejemplo, el agua para limpiar superficies, para preparar enjuagues, encurtidos o baños activos y otros [1].

En el caso de la empresa Owens Illinois, Planta Los Reyes, el agua se toma de un pozo y es distribuido a través de una bomba centrífuga hacia contenedores tipo tinaco de 20m³ de capacidad para almacenaje en caso de falla de la bomba de extracción. De los tanques, esta agua cruda pasa por un sistema de filtración hacia un segundo contenedor de agua “tratada” y finalmente es dirigida por una segunda bomba centrífuga de similar potencia a la primera directamente hacia el sistema de alimentación de agua que va a los diferentes procesos de la planta. En la figura 1 se muestra el sistema usado para este fin.



Figura 1 Distribución de planta de agua

En los últimos años, dado por la antigüedad de la planta y la distribución de la instalación hidráulica que se tiene en la planta, el constante mantenimiento de las bombas centrífugas dado por un posible golpe de ariete o cavitación en el mismo decremente la efectividad del sistema mecánico sin ningún tipo de control. En la industria actual, el uso de bombas

hidráulicas de tipo centrífugo. Como revisión, en este tipo de bombas (de las cuales las más comunes en el apartado de las bombas centrífugas son las de tipo voluta o caracol), el impulsor descarga en una caja espiral tipo voluta que se expande progresivamente, proporcionando una disminución de la velocidad del fluido de forma gradual, convirtiendo parte de la velocidad en presión estática [2]. En la figura 2 se muestra la bomba utilizada para el sistema de bombeo, bomba de 25 HP.



Figura 2 Bomba centrífuga de 25HP

El control destinado par estas bombas está estructurado por un arrancador y un control de velocidad basado en un variador de frecuencia, el cual recibe, en lazo abierto, la señal de un transductor de presión de tipo resistivo. La naturaleza del principio transductivo de este se encontró, no de parte del proveedor, sino mediante un estudio estadístico mostrado más adelante. La figura 3 muestra el esquemático del control electromecánico de control y fuerza de la bomba principal y auxiliar.

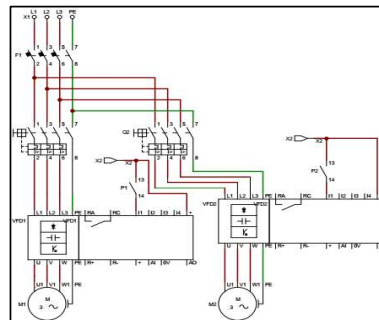


Figura 3 Esquemático de control y fuerza del sistema

Ambos controlados por sus respectivos variadores, la alimentación de las bombas (440V) determina el modelo del variador, así como la indicación en placa de clase de aislamiento por armónicos que podrían surgir al control de velocidad, tema que no se trata en el presente trabajo.

TRATAMIENTO DEL SENSOR

Para el sensor, se recurre al modelo que previamente se tiene implantado en el sistema hidráulico para el control de lazo abierto sencillo desde el variador de frecuencia. El sensor con un rango de presión de 0-120PSI, se tiene como un sensor de lazo de corriente 4-20mA. Dado que estos sensores provenían de un proveedor de controles para turbocompresores, se desconocía particularmente el principio transductivo del mismo, por lo que fue necesario realizar una caracterización de este con el uso de una placa de Arduino Uno y una resistencia de 25Ω para empatar el rango. En la figura 4 y 5 se muestran el sensor utilizado, así como el circuito de implementación para el limitador de corriente.



Figura 4 Sensor de presión

El circuito se realizó con el uso de presión de aire en lugar de agua, por facilidad para la caracterización y se montó una válvula de aguja para regular de manera más precisa la presión que ingresaba al sensor. Para la manipulación adecuada se colocó un manómetro de 0-160PSI, la

alimentación de presión de aire en toda la planta es de 70 PSI, por lo que el rango máximo esperado en el mapeo de presiones no debería superar esa cantidad.

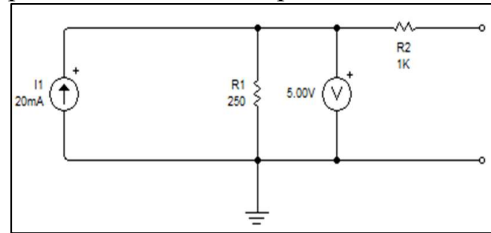


Figura 5 Esquemático de limitador de corriente

Para la experimentación se construye un dispositivo mostrado en la figura 6, con una fuente de 24V para la alimentación del sensor de presión, el limitador de corriente en una protoboard y la conexión del nodo de salida a la entrada analógica de la placa Arduino.



Figura 6 Sistema de caracterización

La visualización de los resultados se muestra en el monitor serial del IDE de Arduino, se va variando cada 5PSI la entrada de presión de aire al sensor y se valida con el manómetro como medición patrón. Se registra en una tabla y se toman los datos obtenidos en el IDE en dos tomas de datos para asegurar el comportamiento. La validación de datos muestra un comportamiento lineal, por lo que se puede deducir que el principio transductivo es meramente resistivo. Este comportamiento facilita el análisis de este, destinado para implementar la entrada del sistema a la conversión de valores difusos y su implementación en un nuevo control por

microcontrolador. En la figura 7 y 8 se muestran los resultados del estudio por el que se obtiene la ecuación característica 1 que define el valor a evaluar en el controlador difuso, destinado a sustituir el control de lazo abierto en el variador.

$$P(x) = 0.1151(x) - 13.73$$

Ecuación 1 Función característica del sensor

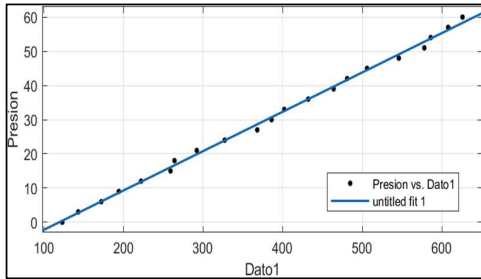


Figura 7 Curva característica del sensor

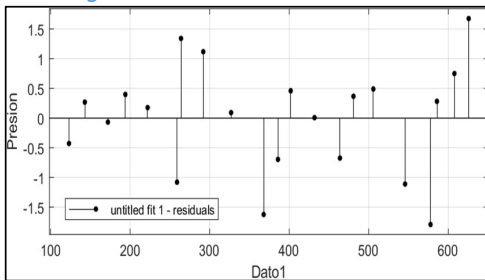


Figura 8 Dispersión del error de la curva

CONTROL DIFUSO PROPUESTO

La lógica difusa es una rama de la inteligencia artificial que permite a una computadora o controlador analizar información del mundo real en una escala entre lo falso y lo verdadero. Fue desarrollada a principios de la segunda mitad del s. XX por el matemático azerbaiyano Lofti A. Zadeh, del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de California Berkeley [3]. Los valores dentro del lenguaje de la lógica difusa deben ser transformados de un concepto factual, es decir, datos numéricos que tienen solo interpretación matemática de acuerdo con su naturaleza, a un concepto entendible por el algoritmo de la lógica difusa, es decir, deben formar

parte de un conjunto difuso y dicho conjunto, contener variables exclusivas o miembros pertenecientes al conjunto concepto. Para el proyecto presente se han considerado dos conceptos los cuales poseen variables determinadas dentro de su membresía. El primer conjunto concepto es la presión en la línea de agua industrial de pozo. En la figura 9 se muestra los conjuntos difusos pertenecientes al concepto de presión, así como sus funciones de membresía de acuerdo con la presión máxima requerida por planta de 60PSI.

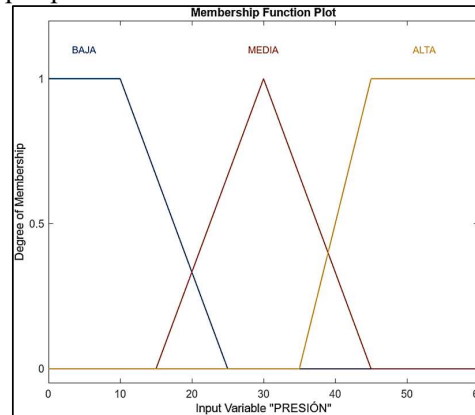


Figura 9 Conjunto difuso de presión

El segundo conjunto concepto es el nivel de los tanques de reserva, es importante igualmente mantener un nivel óptimo en los tanques. Para el nivel del tanque en porcentaje como conjunto difuso se muestra a continuación en la figura 10.

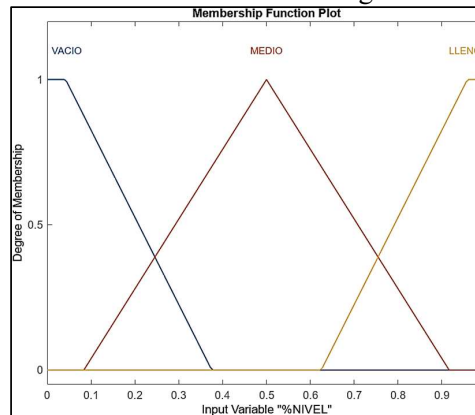


Figura 10 Conjunto difuso de nivel

Considerando el estado del sistema, las reglas que se requieren para mantener la velocidad de salida, la cual será de naturaleza digital en modulación de pulsos o PWM, corresponderán a las reglas mostradas en la tabla 1, el resultado, de la misma naturaleza en el conjunto concepto del ancho de pulso que arrojará el microcontrolador encargado de la evaluación responderá al campo mostrado en la figura 11.

Tabla 1 Reglas del control difuso

PRES BAJA	%NIV VACÍO	PWM RAPIDO
PRES MEDIA	%NIV VACIO	PWM MEDIO
PRES ALTA	%NIV VACIO	PWM MEDIO
PRES BAJA	%NIV MEDIO	PWM MEDIO
PRES MEDIA	%NIV MEDIO	PWM LENTO
PRES ALTA	%NIV MEDIO	PWM LENTO
PRES BAJA	%NIV ALTO	PWM RAPIDO
PRES MEDIA	%NIV ALTO	PWM LENTO
PRES ALTA	%NIV ALTO	PWM LENTO

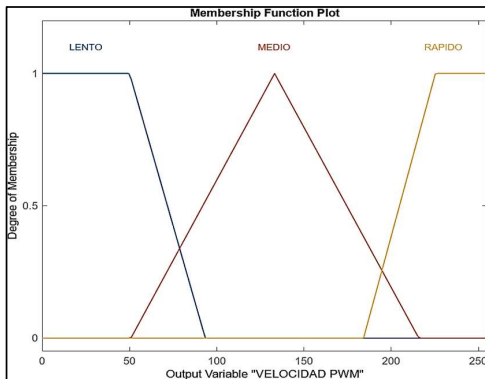


Figura 11 Salida PWM en conjunto difuso

Una manera eficaz que se tiene de evaluar el comportamiento del control es con la superficie de nivel del control. En la figura 12 se muestra el resultado obtenido.

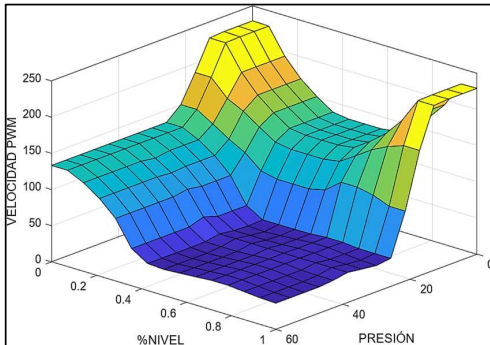


Figura 12 Superficie de controlador

MICROCONTROLADOR ESP32 Y JAVASCRIPT

Un microcontrolador (MCU) es un circuito integrado que contiene todos los componentes de un computador. Se emplea para controlar el funcionamiento de una tarea determinada y, debido a su reducido tamaño, suele ir incorporado en el propio dispositivo al que gobierna. Para el caso particular de este proyecto, y pensando en la integración con un sistema tipo IoT (Internet of Things) se decide el uso del conocido microcontrolador ESP 32, mostrado en la figura 13, este por tener una interfaz de Wi-Fi, así como contar con las mismas facilidades de empleo que la placa Arduino. Esta placa opera a 3.3V y el límite de voltaje de los pines de propósito general es de 5V y 12mA de salida. Además de contener un convertidor ADC de 12 bits en algunos de los pines de propósito general, en el cual se conectará la salida del circuito limitador de corriente [4].



Figura 13 Placa de desarrollo ESP32 Wi-Fi

Web Server es una de las funciones que puede desempeñar el ESP32. Como lo indica el nombre de la función, el ESP32 actuará como un servidor web. Esto quiere decir que alojará la página, recibirá solicitudes de clientes (otros equipos que accedan) y enviará respuestas a los mismos. ESP32 dispone de un modo ACCESS POINT en el que el propio chip interno puede actuar como router (Por software interno), siendo que esto permitirá la conectividad sin algún router

externo o servidor [5]. Un esquema explicativo del sistema de AP se muestra en la figura 14, esta distribución es la que se usará en el proyecto.

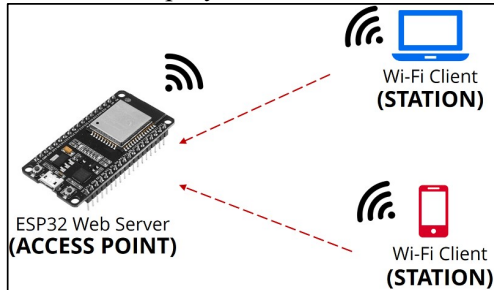


Figura 14 Esquema de Access Point ESP32

Para una visualización del estado del sistema, tanto el modo Web Server como el modo AP en el ESP32 puede ser estructurado a través de una página web programada por una estructura Front End. Para el desarrollo web se suele hablar comúnmente de tres lenguajes de programación. Se pueden trabajar los lenguajes HTML, CSS y Javascript por separado, sin embargo, cada una forma una capa de un conjunto total final. HTML corresponde al esqueleto de la página, CSS su presentación al usuario y JS la interactividad y funcionalidad de esta [6]. El conocimiento de esta tercia es esencial para el proyecto.

La figura 15 muestra la integración completa del sistema.

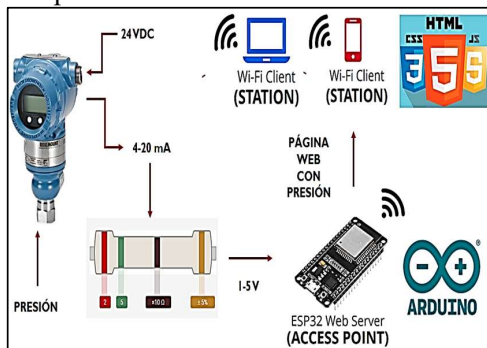


Figura 15 Estructura completa del proyecto

En el conjunto de estas herramientas informáticas y, considerando que el requerimiento de la planta es el monitoreo de la presión, así como un registro de la

hora y minuto donde se presentó un bajón de presión. En la figura 16 se muestra la interfaz diseñada en Front-End con un apartado dedicado a la detección de la presión, la fecha y la hora en la que se detecta la presión. Asimismo, en el script del código de Front-End se encuentra el elemento *Canvas*, el cual proporciona una interfaz gráfica tipo API para dibujar líneas, imágenes y textos en dos dimensiones mediante un código programado en JS [7].



Figura 16 Interfaz Web de Monitoreo de Presión

DESARROLLO DEL CIRCUITO E IMPLEMENTACIÓN CON VDF

Con todo lo planteado en los puntos anteriores, se propone la siguiente premisa: el controlador ESP32 recibe la información del sensor de presión 4-20mA, dichos datos convergen en el convertidor ADC del controlador y se evalúan en la función característica determinada por la caracterización; los datos reales de presión se convertirán a datos difusos y se evaluarán por las reglas de acuerdo con el nivel del tanque, el resultado de salida saldrá como un valor PWM para la velocidad del motor.

Sin embargo, el motor a controlar es un motor de corriente alterna, siendo PWM una señal digital. Debe existir un intermediario entre nuestro control y el motor. Este es el variador de velocidad o *drive*, como se le conoce en la industria. Un variador es un equipo que tiene la función controlar la velocidad, transformando el voltaje y la frecuencia en

los motores, que es donde mayormente se utilizan. Los variadores se encuentran entre la alimentación y el motor. La corriente de la red llega al equipo, para ser controlada la energía y transportada al motor. Este proceso facilita la energía necesaria para que el motor trabaje perfectamente, sin derroches [8]. El funcionamiento interno de la electrónica de potencia del variador está fuera de este texto. Para el proyecto se recurre a un variador de frecuencia a 440V de la marca ©Yaskawa, modelo A1000, el cual se muestra en la figura 17.



Figura 17 Variador de velocidad ©Yaskawa A100

Para la configuración del variador, es necesario el procesamiento de la señal digital PWM, la cual los variadores no pueden leer, a una variable analógica que sí pueden. En el marco existen circuitos ya realizados, basados en una configuración de amplificador operacional, el cual linealiza el valor a 0-10V. Ahora, con este conversor, en la figura 18 se muestra el esquema de *hardware* del control inteligente para nuestra bomba.

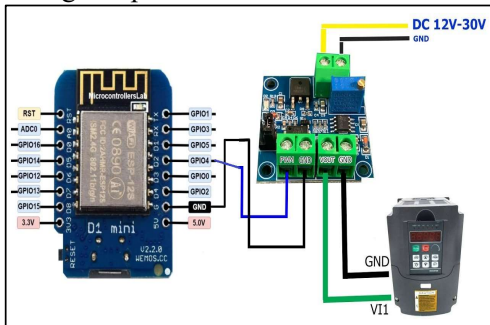


Figura 18 Esquema de conexión de control

En cada variador existen puertos de entradas y salidas, se hará uso de la entrada analógica

A1 de la entrada analógica multifunción. Con la función H3-01, en la opción 0 que indica el display del variador, el nivel de entrada como rango 0-10V. la entrada mínima está limitado al 0-100%, así que, de existir un valor negativo, dada la ganancia y la configuración del variador lo leerá como 0% [9].

Ahora, con esto, se ha desarrollado una placa en la que la entrada del sensor y la distribución del limitador de corriente y el controlador ESP32 están embebidos. En las figuras 19 y 20 se presenta el resultado de este circuito propuesto.

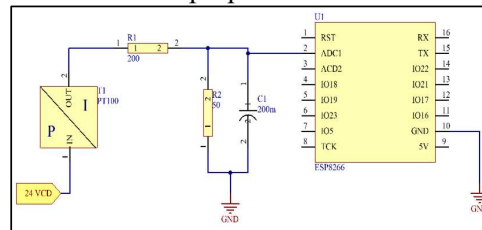


Figura 19 Esquemático del circuito embebido

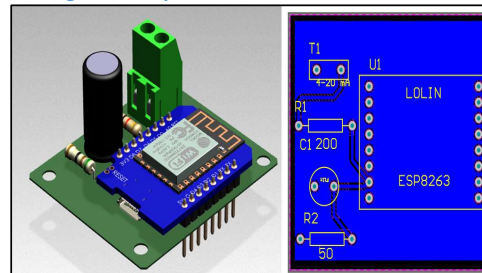


Figura 20 Circuito embebido propuesto.

PERSPECTIVA FUTURA Y MEJORA DEL PROYECTO

Si bien, este proyecto propone una opción asequible para un sistema de control y monitoreo de procesos industriales simples, este está limitado a una red local o incluso a un área reducida de comunicación, es decir, que para poder monitorear en modo AP, es necesario estar cerca de donde se encuentra el controlador

ESP32 y, si se elige el modo Web Server, sería necesario estar conectado con un teléfono o una computadora a un nodo exclusivamente dentro de la misma planta. No es posible, estando en casa o de viaje, visualizar el estado de los procesos. Una alternativa para conocer el estado del sistema de manera remota por medio de mensajería es el protocolo MQTT el cual funciona por medio de dos entidades de red: un *bróker* o administrador y una *client*, el cual envía y solicita información [5]. Es posible construir un *bróker* en la nube para telemetría, aunque de igual forma se puede instalar en un equipo fijo, tal como un pequeño ordenador tipo Raspberry y un administrador de interfaz como Node-RED. En la figura 21 se muestra el esquema de propuesta para un *bróker* de telemetría referido para mejorar el presente proyecto.

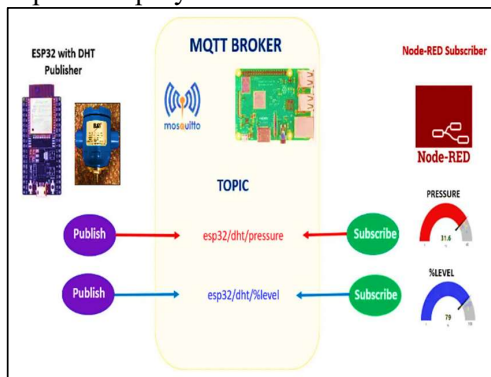


Figura 21 Esquema de sistema con *bróker* MQTT Raspberry Pi

Referencias

[1] H2O GmbH. (2024). H2O. Obtenido de <https://www.h2o-de.com/es/blog/aguas-residuales-industriales>

[2] Hicks, T. G. (1985). Bombas. Su selección y aplicación. Distrito Federal: Compañía Editorial Continental S.A.

[3] Cruz, P. P. (2011). Inteligencia Artificial con Aplicaciones a la Ingeniería. Ciudad de México: Alfaomega.

[4] Cameron, N. (2021). Electronics Projects with the ESP8266 and ESP32. Edinburgh: Apress.

[5] Peláez, J. P. (2020). Internet de las cosas (IoT) con ESP. Madrid: Paraninfo.

[6] Duckett, J. (2014). Javascript & JQuery: Interactive Front-End Web Dev. Indianapolis: Wiley & Sons.

[7] Universidad de Alicante. (2011). Desarrollo Web: HTML5 y CSS3. Fuente: <https://desarrolloweb.dlsi.ua.es/cursos/2011/html5-css3-es/html5-canvas>

[8] Industrias GSL. (8 de Junio de 2021). Variador de Velocidad. Fuente: <https://industriasgsl.com/blogs/automatizacion/variador-de-velocidad>

[9] Yaskawa Electric. (2010). AC Drive-A1000 Quick Start Guide. Yaskawa Electric Corporation.

INFORMACIÓN ACADÉMICA

Eduardo de Jesús García Velázquez:
 Ingeniero Mecánico Electricista,
 Universidad Nacional Autónoma de México, FES Cuautitlán. Especialista en Automatización de Procesos Industriales, Instituto Politécnico Nacional, ESIME Azcapotzalco. Supervisión de Mantenimiento Área Compresores en Owens Illinois S.A., Planta Los Reyes.