

Development of a portable data acquisition system for Kaplan Turbine bank

Daniel Márquez ^a , Alexander Barreto ^a , Bettys Farías ^{*,b} 

^aEscuela de Ingeniería Eléctrica. Facultad de Ingeniería. Universidad de Carabobo. Valencia, Venezuela

^bCentro de Investigaciones Hidráulicas y Ambientales UC. Facultad de Ingeniería. Universidad de Carabobo. Valencia, Venezuela

 <https://doi.org/10.54139/revinguc.v28i2.23>

Abstract.- This research addresses the design of a portable data acquisition system for a Kaplan turbine bank installed in the Hydraulics laboratory of the School of Civil Engineering of the Faculty of Engineering of the University of Carabobo. It is a contribution to a FONACIT project N° 2013001499. From this research, a laboratory practice will be implemented to construct characteristic curves that allow the user to graphically observe the influence of changes in variables such as: flow, speed and torque in the Kaplan turbine. The methodology used included the implementation of a data acquisition system that facilitates measurements and speeds up the process of generating the characteristic curve; using a system based on protoboard mounting sensors, which works in parallel with the existing analog indicators in the bank, the data acquisition system performs measurements in the field, adapts the signals, and through the serial communication protocol sends the information obtained to a data storage and processing unit that corresponds to a computer where through MATLAB software a graphical interface will be made that facilitates the user the visualization and manipulation of the data obtained.

Keywords: Kaplan Turbine; Sensors; Data Acquisition; Analog; Digital.

Desarrollo de un sistema de adquisición de datos portátil para un banco de turbina Kaplan

Resumen.- Esta investigación aborda el diseño de un sistema de adquisición de datos portátil para un banco de turbina Kaplan instalada en el Laboratorio de Hidráulica de la Escuela de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo. Es un aporte al proyecto FONACIT N° 2013001499. A partir de esta investigación se implementará una práctica de laboratorio, para construir curvas características que permitan al usuario observar gráficamente la influencia de los cambios en las variables como: caudal, velocidad y torque en la turbina Kaplan. La metodología empleada incluyó la implementación de un sistema de adquisición de datos que facilita las mediciones y agiliza el proceso de generación de la curva característica; utilizando un sistema basado en sensores de montaje en protoboard, que trabaja en paralelo con los indicadores analógicos existentes en el banco, el sistema de adquisición de datos realiza mediciones en campo, adecúa las señales, y a través del protocolo de comunicación serial envía la información obtenida a una unidad de almacenamiento y procesamiento de datos que corresponde a un computador donde a través del software MATLAB se realiza una interfaz gráfica que facilita al usuario la visualización y manipulación de los datos obtenidos.

Palabras clave: Turbina Kaplan; sensores; adquisición de datos; analógica; digital.

Recibido: 7 de junio, 2021.

Aceptado: 4 de agosto, 2021.

1. Introducción

En los años setenta debido a la crisis de los precios del petróleo, se potenció considerablemente el uso de energías renovables a nivel

mundial, este tipo de energías son de fácil acceso en casi cualquier parte del mundo y a su vez generan beneficios para quienes optan por su aplicación: estimulan el crecimiento económico de la población, generan fuentes de empleos, maximizan la creación de valor de la comunidad, mejoran el acceso a la energía disponible para los habitantes, reducen el impacto ambiental, etc.[1]. El temor al aumento del costo energético o a un desabastecimiento del mismo, impulsó el

* Autor para correspondencia:

Correo-e: bettysfarias@gmail.com (B. Farías)

desarrollo de tecnologías y la investigación en este campo. La transformación de la energía es uno de los tópicos fundamentales en el área de la ingeniería; a nivel mundial y particularmente en Venezuela donde su principal fuente de energía eléctrica es la que aprovecha la energía hidráulica, siendo esta una de las formas más limpias de generación de energía eléctrica y la más importante.

El proceso de generación eléctrica se logra a través del uso de turbinas, las cuales son máquinas diseñadas para convertir la energía cinética del fluido (que se hace pasar por ella) en energía mecánica de rotación de un eje acoplado a un generador que se encarga de realizar la transformación final a energía eléctrica [2].

En la generación de energía eléctrica utilizando turbinas resulta de gran importancia el control sobre aquellas variables que influyen en el proceso y su eficiencia. Una forma de describir el comportamiento de una turbina en función de sus variables es a través del desarrollo de la curva característica de la turbina, la cual permite de forma gráfica observar la influencia de los cambios en las variables como: caudal, velocidad y torque generado en la potencia generada por la turbina Kaplan. Este tipo de turbina permite definir diferentes puntos de trabajo requerido según las condiciones y la potencia requerida (estableciendo los ángulos óptimos de funcionamiento), debido a la posibilidad de variación del ángulo de admisión del agua y del ángulo de las aspas del rodete de la turbina. Las ventajas en el uso de turbinas tipo Kaplan frente a las demás tecnologías es que estas no requieren de alturas elevadas y pueden aprovecharse de acuerdo a la necesidad de la forma del afluente, ya sea vertical u horizontal, lo que proporcionará una mayor flexibilidad en la forma de captación del agua y su posterior capacidad energética [3].

Este tipo de turbina evolucionó de la necesidad de generar energía a partir de niveles de presión mucho más bajos que los que normalmente se emplean con la turbina Francis. Para satisfacer grandes demandas de energía, es necesario dirigir grandes caudales hacia la turbina Kaplan [4].

En la Facultad de Ingeniería de la Universidad

de Carabobo, se cuenta con un sistema de turbina Kaplan perteneciente al laboratorio de hidráulica “Elías Sánchez Díaz” de la Escuela de Ingeniería Civil el cual había estado inoperante por más de 40 años, actualmente se encuentra en funcionamiento tras la ejecución de varios trabajos de mantenimiento y reingeniería, pero aun es necesario realizar la automatización del proceso de registro de los datos recolectados.

A partir de esta investigación se plantea una práctica de laboratorio donde los estudiantes deben construir las curvas características de una turbina Kaplan, pero se requiere mucho tiempo para tomar las distintas mediciones asociadas a las diferentes posiciones de los ángulos de admisión del agua y del ángulo de las aspas del rodete para la creación de una curva característica, de aquí surge la necesidad de contar con un sistema de monitoreo computarizado que permita representar de manera eficaz la curva característica de la turbina.

A nivel internacional diferentes autores [5, 6, 7] han propuesto e implementado sistemas de adquisición de datos (SAD) empleando diferentes softwares como herramientas para analizar el comportamiento de las turbinas. Así mismo, [8, 9] han empleado el software MATLAB como herramienta de traducción de la geometría de las turbinas Kaplan, para desarrollar aplicaciones gráficas que permiten comparar las distintas curvas de funcionamiento para diferentes rodetes y aperturas de los álabes del distribuidor de este tipo de turbinas. En Venezuela, también se han desarrollado investigaciones [10, 11] donde se ha evaluado la operación del sistema de turbina Kaplan. Esta investigación vendría a complementar las investigaciones realizadas sobre este tema.

El objetivo de esta investigación es diseñar ese sistema de adquisición de datos, que semi-automatice el proceso de medición y recolecte los datos en una PC a partir del uso de transductores que al detectar un fenómeno físico como temperatura o presión, generen una salida eléctrica correspondiente.

Un sistema de adquisición de datos (SAD) permite integrar diversos recursos para controlar y monitorear diferentes variables de un proceso [12].

El sistema de adquisición de datos (SAD) fue

desarrollado con el propósito de reducir los tiempos en la extracción de datos de los puntos de medición existentes en el cuerpo de la turbina Kaplan, así como también su procesamiento en la obtención de parámetros dependientes de los valores adquiridos y el levantamiento de curvas características.

2. Materiales y métodos

La investigación se desarrolló en tres (3) fases:

1. Selección de sensores, dispositivos de adaptación y de manejo de señales que permitan digitalizar las señales analógicas,
2. Diseño, implementación y programación del centro de control del sistema de adquisición de datos,
3. Pruebas y calibración de instrumentos transmisores, convertidores de señales y comunicación entre equipos.

2.1. Selección de sensores y módulos de acondicionamiento de señal

Previo al diseño de un sistema de adquisición de datos lo más importante es la correcta selección de los sensores, o transductores, que son dispositivos que convierten un fenómeno físico como temperatura, presión o vibración, en una señal eléctrica medible como voltaje o resistencia [5]. La señal depende del tipo de sensor y esta puede ser de voltaje, una variación en resistencia eléctrica o cualquier atributo eléctrico variable dependiente de la entrada y salida del mismo.

Ya que estos elementos son los que definirán el rango de trabajo del sistema, sus limitaciones y su funcionamiento; se requiere un análisis exhaustivo del proceso y sus características antes de proceder a realizar esta selección.

En esta fase se definieron los componentes que se implementarán en el sistema de adquisición. La variable física de interés es la presión por lo que se delimitará la búsqueda a transductores de presión en fluidos. Existen en el banco de turbina Kaplan tres zonas de medición que son de interés, a su vez cada una de estas zonas posee asociada dos puntos

Tabla 1: Distribución de puntos de medición

Bomba	Placa Orificio	Turbinas
Manométrica	Diferencial	Manométrica
Vacío		Vacío

medición los cuales corresponden a distintos tipos de medición de presión según la Tabla 1.

Es necesario establecer los criterios de uso que permitirán caracterizar los sensores a emplear. Los criterios establecidos fueron:

- a) compatibilidad con el medio,
- b) rango de presión,
- c) tipo de presión,
- d) tipo de salida que suministra el sensor.

En cuanto a la compatibilidad del medio, se refiere a la condición que debe poseer el sensor para realizar medidas en medios líquidos sin exponerse a daños; el criterio del rango de presión se refiere al rango que es capaz de medir el sensor, en esta investigación las mediciones a realizar se encuentran en un rango entre -2 y 9 psi; en cuanto al tipo de presión es importante que el sensor seleccionado permita mediciones de presión diferencial, absoluta y de vacío; el último criterio es el tipo de salida que suministra el sensor. En este caso se decidió utilizar sensores de salida de tipo analógico, no amplificada, ya que el sistema de adquisición de datos a implementar tiene la capacidad de realizar conversión analógico/digital, permitiendo una disminución de costos y que además el entorno donde se implementará no expone al sensor a temperaturas variantes, ni extremas, que afecten su funcionamiento.

La electrónica se dispondrá en un tablero con la finalidad de ser protegida del ambiente húmedo del laboratorio, los sensores se encontrarán conectados al cuerpo del banco de la turbina Kaplan a través de mangueras de 8 mm que a su vez están conectadas a distintas válvulas, con la finalidad de poder separar cada sensor del punto de medición cuando sea necesario. Adicionalmente, se implementó un arreglo de válvulas que permite conectar un mismo sensor a dos puntos de medición.

La Figura 1 muestra un esquema de todas estas conexiones y lo que representan donde (PI100): Indicador de presión lazo 1; (PV101): Válvula 01 de presión lazo 1; (PV102): Válvula 02 de presión lazo 1; (PI200): Indicador de presión lazo 2; (PV201): Válvula 01 de presión lazo 2; (PI300): Indicador de presión lazo 3; (PV301): Válvula 01 de presión lazo 3; (PV302): Válvula 02 de presión lazo 3; (SE401): elemento 01 de Torque lazo 4; (FG500): Visor 0 de flujo lazo 5; (LG501): Visor 1 de Nivel lazo 5; (FG502): Visor 2 de flujo lazo 5.

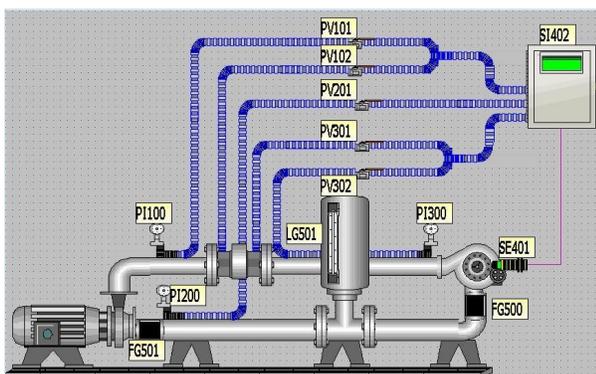


Figura 1: Esquema de Conexiones de sensores

2.2. Diseño, implementación y programación del centro de control del sistema de adquisición de datos de sensores y módulos de acondicionamiento

En esta etapa se genera el sistema virtual que permita verificar el funcionamiento del sistema propuesto antes de ser implementado permitiendo asegurar su funcionamiento al igual que la compatibilidad entre los distintos bloques de medición y acondicionamiento. La Figura 2 muestra el proceso en bloques, bajo el diseño de una estructura para SAD, obtenida a partir del estudio del comportamiento del sistema que conforma el banco de turbina Kaplan.

Una vez diseñado el sistema prototipo se procedió a implementar el sistema por módulo donde cada uno está compuesto por el sensor y su correspondiente arreglo de acondicionamiento de la señal. El desarrollo de esta etapa consiste en la lectura de la señal, su conversión analógica/digital, adecuación, transmisión al computador para ser

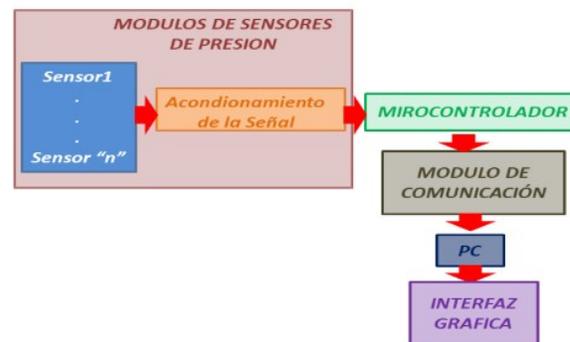


Figura 2: Diseño del sistema de adquisición de datos (SAD)

almacenada y procesada según los protocolos de comunicación disponibles.

Una vez obtenidos los datos en el computador será necesario manipular dichos datos para la representación y construcción de las curvas características de la turbina, este procesamiento de datos es realizado a través del software MATLAB, en el cual se diseñó una interfaz gráfica para facilitar el uso para el usuario.

2.3. Pruebas y calibración de instrumentos transmisores, convertidores de señales y comunicación entre equipos

Esta etapa consiste en la verificación del funcionamiento del sistema de adquisición de datos implementado, en comparación con el sistema virtual módulo por módulo (adquisición de datos, acondicionamiento de señales, transmisión de datos, programación MATLAB) y finalmente el sistema completo para de esta forma identificar errores, desviaciones o fallas para proceder a realizar cualquier ajuste de calibración necesario de forma tal que permita minimizar cualquier error entre los sistemas y obtener un funcionamiento óptimo.

La metodología para la construcción de la interfaz varía de acuerdo a los dos tipos de datos descritos. Inicialmente, el programa da una pequeña introducción al usuario sobre la turbina Kaplan, su funcionamiento, sus posibles aplicaciones, para luego comenzar el proceso de medición, que consiste en la selección de los parámetros: velocidad de la bomba, ángulo del

rodete y el peso en libras–fuerza, colocado sobre el rotor de la turbina. El siguiente paso una vez definidos los parámetros, es llevar la turbina a la velocidad de medición requerida indicada por el sistema y realizar las mediciones siguiendo la guía del programa el cual irá habilitando al usuario posibilidades de acción según vaya avanzando en las mediciones.

El primer valor a introducir es la lectura del dinamómetro, el cual se puede observar directamente en la turbina, aparecerá habilitada la casilla de introducción de la lectura de dicho instrumento.

Una vez introducido el valor, se habilitan los botones para “medir”, de manera que al ser pulsados se activan las mediciones de los sensores 0, 1 y 2 correspondientes con las presiones siguientes: a) Entrada de la bomba (PV201), b) Salida de la bomba (PV101), c) Entrada de la turbina (PV301), d) Placa orificio (PV101D – PV301D).

Al momento en que el usuario hace click sobre el botón medir se activa una ventana de mensaje que le indica la posición en que deben encontrarse las válvulas, al cerrar la ventana el programa a través del cable de conexión envía al microcontrolador un carácter de verificación al PIC, para iniciar el sub-programa CHECK y CONVERSION del microcontrolador.

Al hacer click nuevamente sobre el botón medir se indica al usuario cual debe ser la configuración de válvulas adecuada para realizar la medición correspondiente, una vez que se cierre la ventana al igual que antes, el programa envía al PIC un carácter el cual inicia el subprograma de CHECK y CONVERSION que realizan la medición diferencial de las presiones. Este procedimiento se deberá repetir 9 veces (debido a que se deben hacer 9 ajustes en el ángulo del distribuidor a pasos de 1/8” entre 1” hasta 2”) para cada velocidad de la turbina, considerando que la velocidad inicial es de 200 RPM y las siguientes velocidades a medir son 400, 600 y 800 RPM, la tabla de mediciones que se genera tiene un total de 36 filas por ángulo del rodete. Una vez finalizada la toma de mediciones y generada la respectiva tabla, es mostrada al usuario para posteriormente realizar

un procedimiento de conversión de unidades que permite introducir los valores de las variables calculadas por el usuario.

Las variables calculadas son dependientes de las presiones de entrada y salida de la bomba, así como también de entrada y salida de la turbina, además de la presión diferencial generada en la placa orificio del banco de la turbina Kaplan.

Una vez obtenida la matriz de datos procesados, estos son guardados en una variable global del sistema y mostrados nuevamente al usuario, estas operaciones de cálculo están configuradas para ser realizadas automáticamente en el momento en el que el usuario ingrese en la etapa descrita y estos datos son representados en las gráficas.

Para la elaboración de las gráficas son necesarios los valores de caudal y los de rendimiento que coinciden entre ellos por ángulo del distribuidor en pasos de 1/8 pulgadas, con lo que el usuario podrá observar la curva característica en la colina de la turbina. En la etapa final de validación de la práctica será necesario que el profesor realice su apreciación del trabajo realizado por los estudiantes empleando su clave de usuario, puede hacer la apertura del par de gráficas que tendrá a disposición, donde la primera es la construida por el estudiante y la segunda es una gráfica comparativa elaborada con lo disponible en la base de datos precargada.

Todo el proceso consta de una guía y notificaciones, para ayudar al usuario a ejecutar las mediciones de forma exitosa, se incluyen además ventanas de error, advertencia y ayuda, que le permiten al usuario reducir errores en el desarrollo.

3. Presentación y discusión de resultados

3.1. Selección de sensores y módulos de acondicionamiento de señal

De acuerdo al análisis de todos los criterios establecidos, se seleccionaron los sensores de la serie 24 PC, según la guía de selección de sensores de presión para el montaje en protoboard Honeywell. Esta serie 24 PC cuenta con un conjunto de opciones de selección, que incluyen sensores de baja presión en miniatura desde 0,5 psi hasta 250 psi. La selección se hizo en función de los valores máximos registrados en los puntos de

medición del banco de turbina Kaplan presentados en la Tabla 2. De acuerdo a estos resultados los sensores seleccionados de la serie 24 PC corresponden a los sensores HW24PCCFA6G y HW24PCBFA6D, con rangos de presión de 15 psi y ± 5 psi.

Tabla 2: Valores obtenidos en puntos de medición

Bomba	Placa Orificio	Turbinas
Manométrica		Manométrica
7 psi		9 psi
Vacío	Diferencial	Vacío
2 psi	5.1 psi	0 psi

La Figura 3 muestra los sensores seleccionados para esta investigación, 1 sensor modelo HW24PCBFA6D, de tipo diferencial utilizado para las mediciones de vacío, (debido a su rango de presión no puede ser utilizado para la medición diferencial, lo cual hace necesario que la medición en la placa orificio deba realizarse a través de la diferencia obtenida entre ambas mediciones absolutas) y 2 sensores modelos HW24PCCFB6G.



Figura 3: Sensores HW24PCBFA6D y HW24PCCFB6G Fuente: Honeywell

Fue necesario realizar la amplificación de la señal de salida de los sensores, ya que estas corresponden a un valor máximo de 225 mV y 115 mV respectivamente, los cuales son valores muy pequeños en comparación con el rango de conversión analógico/digital que va de 0V a 5V. Se decidió utilizar un amplificador diferencial de instrumentación, el cual asegura condiciones de medición y amplificación óptimas en las conexiones debido a su alta impedancia de entrada. Los sensores seleccionados funcionan basados en arreglos de puente de Wheatstone lo que hace ideal el uso del amplificador y permite aprovechar al máximo la resolución del convertidor A/D pudiéndose obtener una lectura más precisa. En

las Figuras 4 y 5 se observa el sistema de acondicionamiento de la señal utilizado en cada uno de los módulos de los sensores.

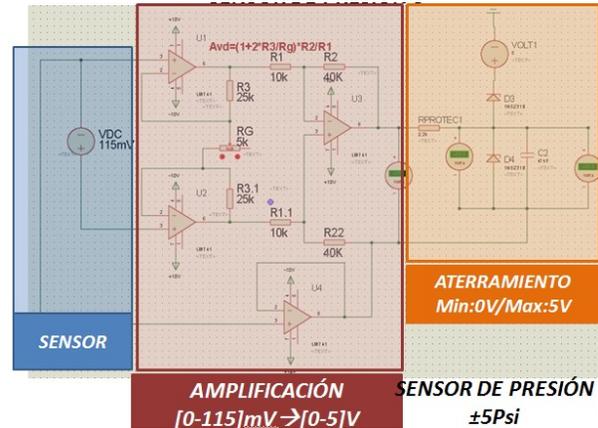


Figura 4: Esquema del módulo de acondicionamiento de la señal proveniente del sensor de 5 psi

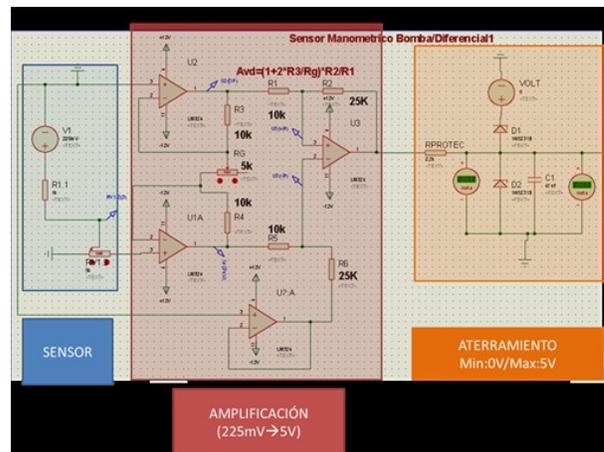


Figura 5: Esquema del módulo de acondicionamiento de la señal proveniente del sensor de 15 psi

Para evitar que se sobrepasen los rangos permisibles se implementó un circuito de aterramiento en cada una de las entradas, los rangos permisibles expuestos son: $[0,3 V < AnX < 5,3 V; \text{donde } X = 1, 2, 3]$, según la hoja de datos del PIC16F887. El diseño del circuito utilizado se muestra en la Figura 6, está basado en dos diodos zener ambos de 5,1 V que aseguran que el voltaje no sobrepase dichos valores, además introduce una resistencia de 2,2 K Ω que protege la entrada analógica del

microcontrolador (An0, An1 y An2) ante la presencia de valores de corriente superiores al límite expuesto por la hoja de datos del microcontrolador correspondiente a un valor de 20 mA, finalmente se agrega un capacitor como filtro para disminuir los picos de sobretensión.

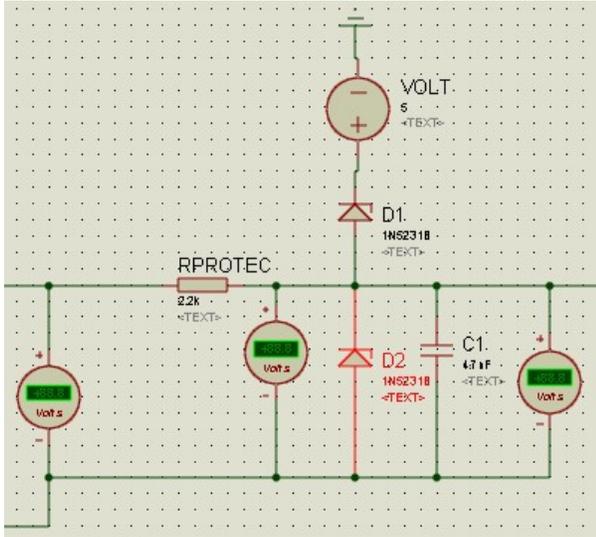


Figura 6: Circuito de protección acoplado a la salida de cada amplificador de sensores

3.2. Diseño, implementación y programación del centro de control del sistema de adquisición de datos

El circuito de protección acoplado a la salida de cada amplificador de los sensores produjo una caída de tensión generada por la resistencia RPROTEC, lo que hizo necesario la corrección de este efecto. El ajuste se logró construyendo tablas de compensación, una para cada módulo de aterramiento, debido a las variaciones en la tolerancia de los resistores de carbón y las variables involucradas en la producción de los semiconductores.

A partir de las mediciones de entrada y salida del circuito se levantaron un grupo de gráficas, que permitieron el estudio de las variaciones causadas, y la selección de una línea de tendencia que representa de forma analítica las variaciones generadas y la relación entre la entrada y la salida del sistema. Las ecuaciones se programaron en el microcontrolador para hacer la compensación

del error según el canal de lectura. El rango de presiones a medir en el banco de la turbina Kaplan fijó los límites de las tablas de compensación asociadas a los canales 0, 1 y 2 donde se conectan los circuitos de aterramiento. Las Figuras 7, 8 y 9 muestran las representaciones de las líneas de tendencia obtenidas para cada canal.

Las señales generadas a la salida de cada uno de los sensores llegan a la etapa de amplificación y luego pasan a través del circuito de protección, donde es recibida por los canales de conversión analógico/digital del microcontrolador.

En este punto se aplica la función de compensación, que según el canal analógico del que se obtuvo, se hace la conversión correspondiente a presión. Este valor representa la medición de presión a enviar a través del protocolo de comunicación serial con un conector DB-9, lo que permite al software MATLAB adquirir el dato para su posterior organización, clasificación y cálculo según los requerimientos de la práctica. La interconexión entre el computador y el microcontrolador PIC se establece a través de una interfaz basada en el uso del integrado MAX-232. La función de esta interfaz es establecer un protocolo de comunicación entre ambos elementos con los niveles de voltaje adecuado.

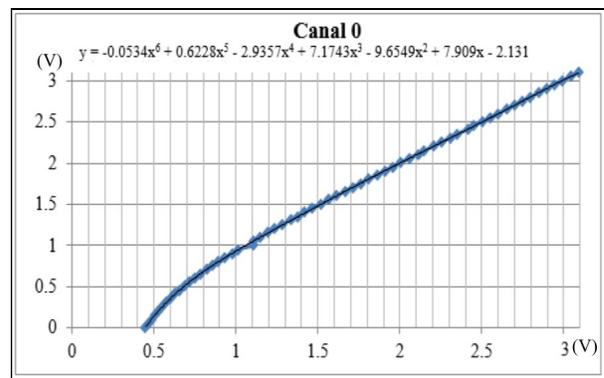


Figura 7: Línea de tendencia para compensación del error canal 0

3.3. Pruebas y calibración de instrumentos transmisores, convertidores de señales y comunicación entre equipos

En esta fase se creó una base de datos construida a partir de los registros de las distintas posiciones

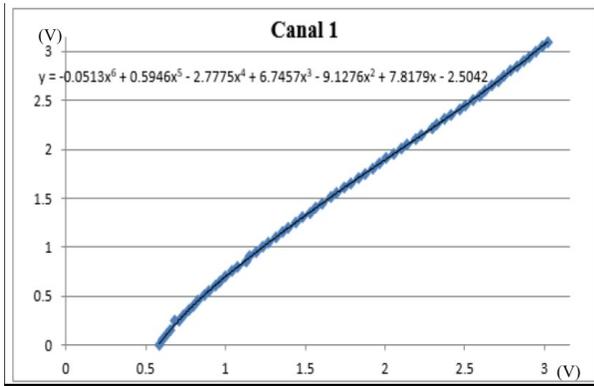


Figura 8: Línea de tendencia para compensación del error canal 1

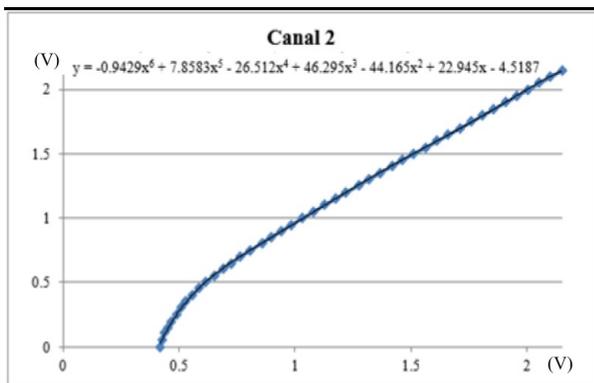


Figura 9: Línea de tendencia para compensación del error canal 2

del ángulo del rodete, del ángulo del distribuidor y de las velocidades de la turbina para poder hacer la comparación de los valores medidos con el SAD y los valores tomados por el usuario. La validación del funcionamiento del sistema es efectuada al realizar la comparación entre las mediciones analógicas contra las lecturas obtenidas al ejecutar la interfaz gráfica que controla el proceso de adquisición de datos.

En la Figura 10 se muestra la relación entre las presiones de los manómetros y los sensores como instrumentos patrón; donde los valores del sensor 1 estuvieron por encima de los manométricos en un error apreciable de 1 psi mientras que en el caso del sensor 2 se estima un error por debajo de los valores manométricos en aproximadamente 0,5 psi.

Se realizaron ajustes a las curvas de medición de los manómetros mediante una maleta de calibración neumática de precisión “Wallace &

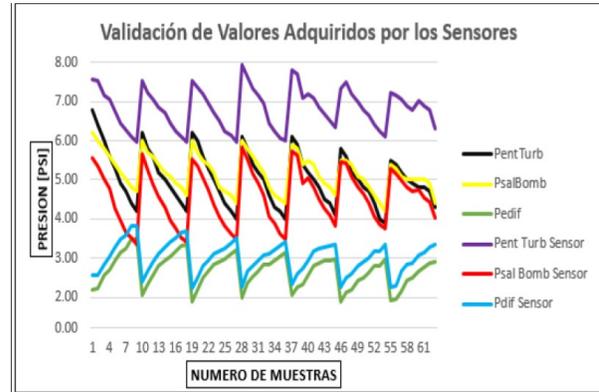


Figura 10: Gráfica comparativa de valores adquiridos

Tiernan Pennwalt Portable Precisión Pneumatic Calibrator FA-145”, de esta manera las medidas patrón son confiables y efectivas en la realización de ajustes. Realizado el ajuste y la compensación del error de los sensores, la tabla de datos de mediciones corregidas fue cargada a la base de datos para servir como valores característicos de la curva de la turbina, siendo esenciales para que el profesor corrija la práctica. Dicha curva puede ser utilizada como una herramienta de criterio en la corrección de la práctica de laboratorio. La Figura 11 muestra la gráfica con las correcciones aplicadas.

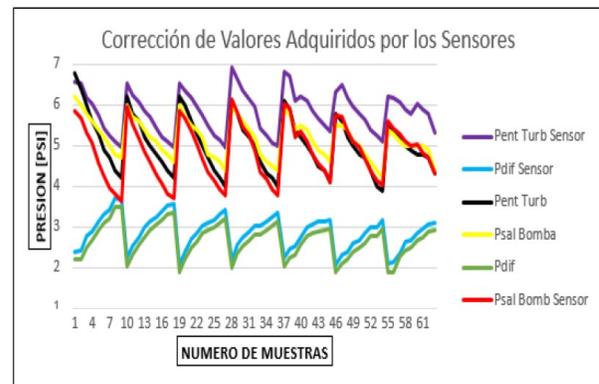


Figura 11: Gráfica comparativa de valores corregidos

Las fuentes de error por causas eléctricas se originan en la amplificación de la señal proveniente del sensor debido a que son utilizados componentes electrónicos con tolerancias variables con respecto a las definidas por sus fabricantes, continúan con

un circuito de aterramiento que influye una caída de tensión directa de la señal medida por la presencia de la resistencia que regula la corriente ante posibles fallas en el servicio eléctrico, finalmente la línea de tendencia por software introduce un error en la medición debido a que es un polinomio que se acerca al comportamiento de conversión del sensor, pero no es su ecuación característica, ni representa al 100% el comportamiento real del dispositivo. Los errores en la medición por causas mecánicas son atribuidos a las pérdidas de presión existentes a lo largo del nuevo esquema de conexiones de los sensores, para compatibilidad con el sistema de turbina Kaplan, además de las pequeñas variaciones que pueden existir causadas por el roce del fluido con los accesorios involucrados, tales como válvulas, bridas, placa orificio, impulsor de la bomba entre otros. Se detectó un punto de falla importante durante las pruebas, que afecta la estabilidad del sistema y por ende las mediciones a realizar, que corresponde a fallas en el mecanismo del freno prony de la turbina.

La elaboración de la interfaz gráfica funciona de dos formas dependiendo de la proveniencia de los datos, la primera consiste en la manipulación de datos precargados en tablas que conforman una base de datos patrón, y la segunda adquiere, organiza y manipula los datos provenientes del proceso de medición al momento de realizar la práctica. La Figura 12 presenta cómo se inicializa el sistema con su nombre SAD para luego proceder a definir el tipo de usuario (estudiante o profesor), lo cual se realiza a través de un sistema de control de acceso que permite a cada usuario ingresar al sistema donde solo el usuario “profesor” podrá observar las gráficas obtenidas a partir del sistema de datos precargados. La Figura 13 muestra otros ejemplos de las ventanas de la interfaz gráfica.

También se crearon ventanas para indicar la posición de las válvulas de paso (abiertas o cerradas) para las distintas mediciones, como se muestran en la Figura 14.

Una vez finalizada la toma de mediciones y generada la respectiva tabla, es mostrada al usuario, para posteriormente realizar un procedimiento de conversión de unidades, como se observa en la Figura 15.



Figura 12: Ventana de inicio de la interfaz gráfica

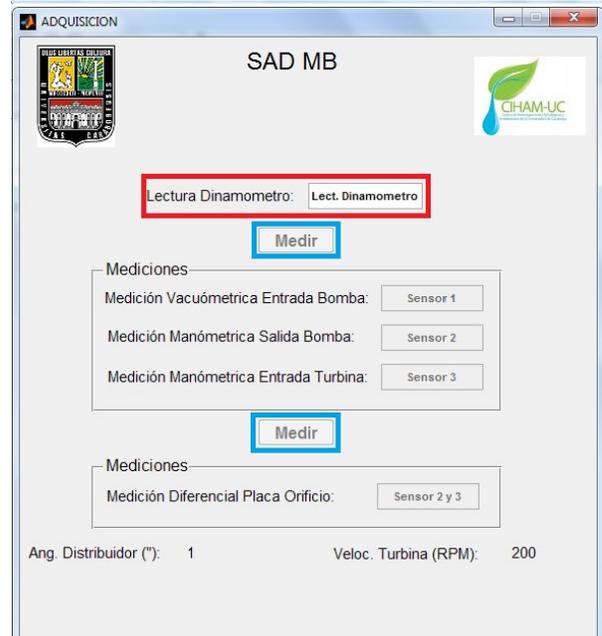


Figura 13: Muestras de las ventanas de presentación y de mediciones de la interfaz gráfica

Finalmente, se realiza la gráfica para el análisis del comportamiento del sistema como se muestra

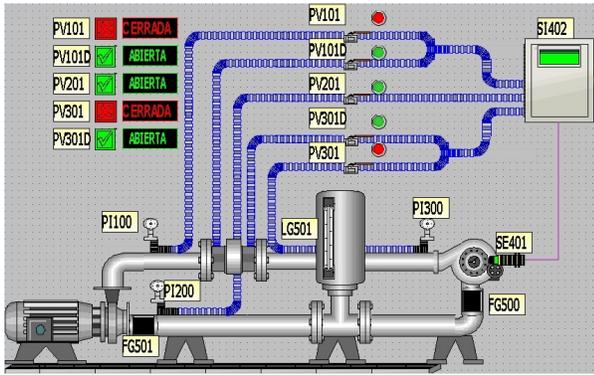


Figura 14: Ilustración de la posición de las válvulas para las de mediciones

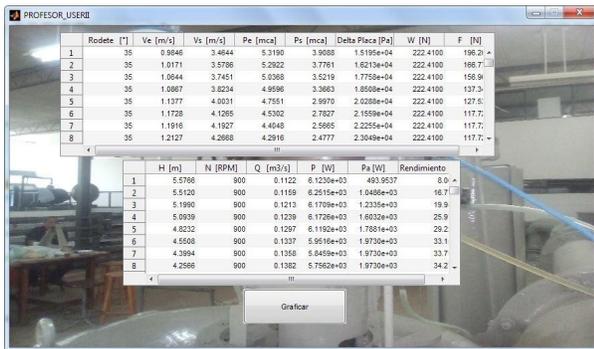


Figura 15: Ventana de conversión de unidades y cálculo de variables independientes

en la Figura 16, la cual a partir de las mediciones facilita la visualización de la relación entre los diferentes parámetros de trabajo de la turbina.

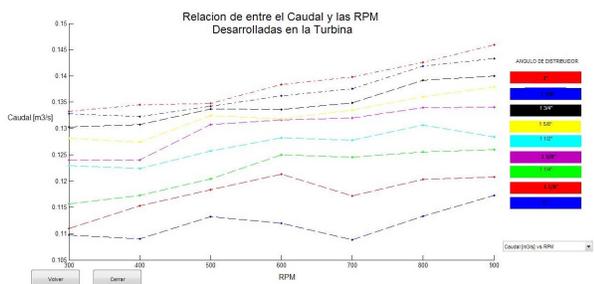


Figura 16: Gráfica de curvas de colina de la turbina Kaplan generada

Esta investigación se convierte en una herramienta necesaria para desarrollar una práctica de laboratorio de las escuelas de ingeniería civil y mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo, ya que permite la construcción de las curvas características de la

turbina Kaplan para: a) diferentes posiciones de los álabes del distribuidor desde 1” hasta 2”, con incrementos de 1/8”; b) diferentes velocidades de giro de la turbina desde 300 RPM hasta 900 RPM, con un incremento constante de 100 RPM; la cual no era posible realizar de forma manual con el volumen de datos obtenidos. En comparación con los otros autores referenciados en esta investigación, al igual que ellos se logró la efectividad esperada utilizando tanto el software MATLAB, como SCADA, para obtener una herramienta que permite el acercamiento a una tecnología avanzada, que involucra al usuario en mejoras de capacidades computacionales y permite estudiar la influencia de múltiples parámetros en el funcionamiento de las turbinas, pero además facilita la actividad facilitador-usuario al poner a su alcance las diferentes opciones en forma rápida de respuestas de la práctica de laboratorio.

4. Conclusión

Se implementó un sistema de adquisición de datos de bajo costo, seleccionando sensores compatibles para las mediciones en medios hidráulicos, con un rango de presión adecuado para las mediciones del proceso, salidas de tipo analógica para mediciones diferencial y lineal basadas en sensores de puente de Wheatstone, que cumplieron con las características esenciales requeridas de precisión, repetibilidad y exactitud, lo que permitió registrar las variables para construir las curvas características de una turbina Kaplan, brindando de esta forma una herramienta que es útil para la enseñanza no solo en el área de ingeniería hidráulica, y mecánica sino que permite a los usuarios involucrarse en el campo de la instrumentación y programación e ir adaptando el sistema a sus necesidades.

El SAD implementado mostró su eficacia como sistema automatizado para la adquisición de datos en la práctica de laboratorio diseñada para construir la curva característica de una turbina Kaplan, la cual corresponde a la gráfica dispuesta para la evaluación del estudiante al finalizar la práctica.

Agradecimientos

Los autores expresan sus más sincero agradecimiento al Centro de Investigaciones Hidráulicas y Ambientales de la Universidad de Carabobo (CIHAM-UC) por el apoyo brindado en la realización de esta investigación que forma parte del proyecto: Reactivación de tres bancos de pruebas de generadores eléctricos de alta, media y baja potencia para la conservación de energía hidráulica adaptados a condiciones locales y regionales de Venezuela, en el Laboratorio de Hidráulica “Elías Sánchez Díaz” de la Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo.

5. Referencias

- [1] S. Medina y A. Venegas, “Energías renovables un futuro óptimo para Colombia,” *Revista Punto de Vista*, vol. 9, no. 13, 2018.
- [2] C. Mataix, *Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas*, Segunda ed., 1982.
- [3] S. Morales, L. Corredor, J. Paba, y L. Pacheco, “Etapas de desarrollo de un proyecto de pequeñas centrales hidroeléctricas: Contexto y criterios básicos de implementación,” *Revista DYNA*, vol. 81, no. 184, pp. 178–185, 2014.
- [4] S. L. Dixon, *Fluid Mechanics, Thermodynamics of Turbomachinery*, 4th ed. Butterworth-Heinemann, 1998.
- [5] C. Pacha, “Estudio de un sistema de adquisición de datos para generar guías de prácticas y reportes en las turbina Michell Banki del laboratorio de energías alternativas de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica,” Trabajo de grado para optar al Título de Ingeniero Mecánico, Universidad de Ambato, Ecuador, 2011.
- [6] O. Ambo y H. Chango, “Diseño e implementación de sistemas SCADA con LABVIEW para la turbina Turgo y el generador en el Laboratorio de Turbomáquinaria Hidráulica de la Facultad de Mecánica de la ESPOCH,” Trabajo de grado para optar al Título de Ingeniero de Mantenimiento, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador, 2017.
- [7] A. Plaza, “Sistema de adquisición de datos para turbinas Pelton y Francis,” Trabajo de grado para optar al Título de Ingeniero de Industrial, Universidad Pontificia, Madrid, España, 2000.
- [8] J. Vicéns, B. Zamora, y A. Kaiser, “Simulación de flujo en una turbina Kaplan mediante dinámica de fluidos computacional: Desarrollo de una herramienta para utilización docente,” *Revista Formación Docente*, vol. 4, no. 6, pp. 3–12, 2011.
- [9] R. De la Torre, “Creación de una aplicación gráfica con MATLAB para la caracterización y mejora de una turbina Kaplan,” Trabajo de grado para optar al Título de Ingeniero Mecánico, Universidad de Jaén, Jaén, España, 2016.
- [10] I. Salazar, “Propuesta de reactivación de los bancos de batería de turbinas Kaplan, Peltón y Francis del laboratorio de hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo,” Trabajo especial de grado, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela, 2015.
- [11] J. García, “Evaluación de la operación del sistema de Turbinas Kaplan en el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo,” Trabajo especial de grado, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela, 2015.
- [12] A. Manuel, D. Biel, J. Olivé, y J. Prat, *Instrumentación Virtual: Adquisición, procesado y análisis de señales*. Barcelona: Ediciones UPC, 2001.