

Experimental identification of the dynamics characteristics of a peltom model turbinel

Ramon A. Valencia, M.Sc.¹, Osiel Arbelaez, M.Sc.¹, and Andres Valencia, PhD.²

¹Universidad Tecnologica de Pereira, Colombia, ravalenci@utp.edu.co, osiel@utp.edu.co

²University of Maryland, USA, avalenco@umd.edu

Abstract -- In this work, we present the experimental results concerning the process of identification of the dynamic characteristics of a Pelton turbine prototype, in a test bench in the laboratory of fluids and hydraulic machines of the Faculty of Mechanical Engineering of the Technological University of Pereira, Colombia. It was made an adequacy of the test bench, consisting of a disturbance system to generate the input signal and a system to generate the output signal on the axis of the turbine. Likewise, a data acquisition system was installed for these signals. After preliminary tests to determine the behavior of the components, using mathematical algorithms included in specialized tools of Matlab, six models were determined. These models identified by almost 93% the dynamic characteristics of the turbine. Finally the model ARS 321 was chosen, for presenting the best behavior. This result has been used to establish a control system to keep the speed of turbine rotation constant in a process of microgeneration of electricity in the laboratory.

Keywords – Identification, Turbine Pelton, Controler, Dynamic. characteristics, Matlab Identification Tool Box.

Digital Object Identifier (DOI):
<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2019.1.1.356>
ISBN: 978-0-9993443-6-1 ISSN: 2414-6390

IDENTIFICACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS CARACTERÍSTICAS DINAMICAS DE UN MODELO DE TURBINA PELTON.

Ramon A. Valencia, M.Sc.¹, Osiel Arbelaez, M.Sc.¹, and Andres Valencia, PhD.²

¹Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia, ravalenci@utp.edu.co, osiel@utp.edu.co

²University of Maryland, USA, avalenco@umd.edu

Abstract— In this work, we present the experimental results concerning the process of identification of the dynamic characteristics of a Pelton turbine prototype, in a test bench in the laboratory of fluids and hydraulic machines of the Faculty of Mechanical Engineering of the Technological University of Pereira. Colombia. It was made an adequacy of the test bench, consisting of a disturbance system to generate the input signal and a system to generate the output signal on the axis of the turbine. Likewise, a data acquisition system was installed for these signals. After preliminary tests to determine the behavior of the components, using mathematical algorithms included in specialized tools of Matlab, six models were determined. These models identified by almost 93% the dynamic characteristics of the turbine. Finally the model ARS 321 was chosen, for presenting the best behavior. This result has been used to establish a control system to keep the speed of turbine rotation constant in a process of microgeneration of electricity in the laboratory.

Keywords— *Identification, Turbine Pelton, Controler, Dynamic. characteristics, Matlab Identification Tool Box*

Resumen— En este trabajo, se presentan los resultados obtenidos experimentalmente del proceso de identificación de las características dinámicas de un prototipo de turbina Pelton, instalada en un banco de pruebas en el laboratorio de fluidos y máquinas hidráulicas de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Tecnológica de Pereira-Colombia. Se hizo una adecuación del banco de pruebas, instalándole un sistema de perturbación para generar la señal de entrada (presión), y un sistema para generar la señal de salida (rpm) en el eje de la turbina. Igualmente se instaló un sistema de adquisición de datos para estas señales. Después de haber hecho pruebas preliminares para determinar el comportamiento de los componentes, mediante la aplicación de algoritmos matemáticos especialmente la aplicación de las herramientas del Matlab, se determinaron seis modelos que identificaron casi en un 93% las características dinámicas de la turbina. Finalmente fue elegido el modelo ARS 321, por presentar el mejor comportamiento. Hecha la identificación, el principal objetivo, es el de diseñar un sistema de control para mantener constante la velocidad de rotación de la turbina en un proceso de microgeneración de electricidad en el laboratorio.

Digital Object Identifier (DOI):
<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2019.1.1.356>
 ISBN: 978-0-9993443-6-1 ISSN: 2414-6390

I.-INTRODUCCION.

Colombia es un país que por sus características geográficas, es difícil llevar la energía eléctrica a algunas regiones apartadas como en algunas comunidades de la costa pacíficas para las cuales sería costosa conectarlas al sistema eléctrico nacional, pero que cuentan con recursos hídricos suficientes para la generación de energía eléctrica mediante la implementación de una mini o micro central hidráulica.

Para una buena calidad de la energía generada se requiere que la velocidad de la turbina sea constante la mayor parte del tiempo, y que ante cualquier perturbación regrese rápidamente al valor óptimo de referencia; esto se logra controlando el flujo de agua que llega a las cucharas de la turbina en el caso de una turbina Pelton. Para el diseño del dispositivo que realiza esta labor, llamado controlador, es necesario hacer la identificación de la turbina, lo que determina la ecuación de transferencia del modelo que más se identifica con el comportamiento en el tiempo de la turbina en este caso.

Para un sistema lineal de parámetros constantes, la Función de Transferencia se define como el cociente entre la Transformada de Laplace de la señal de salida $Y(s)$ y la Transformada de Laplace de la señal de entrada $U(s)$, suponiendo todas las condiciones iniciales nulas. Esto es, si el sistema viene dado por la ecuación diferencial [1].

$$a_n y^n(t) + a_{n-1} y^{n-1}(t) + \dots + a_1 \dot{y}(t) + a_0 = b_m u^m(t) + b_{m-1} u^{m-1}(t) + \dots + b_1 \dot{u}(t) + b_0 \quad (1)$$

La función de transferencia se define como:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0} \quad (2)$$

Obtenida la función de transferencia del modelo que describe el sistema (turbina), se tiene una descripción completa de las características dinámicas del sistema. Dependiendo de las raíces que presente el polinomio del numerador (ceros) y del denominador (polos), se determinará algunas características del sistema, una de ellas su estabilidad para diseñar el controlador apropiado. Por consiguiente una vez identificado el sistema, el paso inmediato es el diseño de un controlador, para mantener constante la velocidad de rotación del sistema turbina – generador.

Algunos trabajos encontrados, relacionados con identificación de sistemas dinámicos entre otros fueron:

1. Identificación y control de una turbina eólica a pequeña escala, [2] en donde se utiliza el filtro de Kalman que es un algoritmo recursivo que sirve para identificar sistemas dinámicos lineales.
2. Interfaz gráfica para la identificación de sistemas lineales usando Matlab.[3], El objetivo de este trabajo es la construcción de una herramienta de software que permita la identificación modelos matemáticos de sistemas dinámicos, que se obtendrán a partir de la medición de los datos de entrada/salida, para observar el sistema como caja negra; y proponer una función de transferencia o ecuación diferencial como modelo del sistema dinámico.
3. Identificación de sistemas: Aplicación al diseño de controladores de temperatura.[4], en este trabajo mediante las aplicaciones de las herramientas del Matlab se identifican modelos para el diseño de controladores automáticos de temperatura.

Ni los trabajos arriba mencionados, y con la excepción de los de la referencia [9], y [10], no se encontraron trabajos que como este, hayan dirigido sus objetivos a la identificación de turbinas hidráulicas y especialmente a un prototipo de turbina Pelton.

I.I TEORIA

A. Identificación de sistemas

Se entiende por identificación de sistemas a la obtención de forma experimental de un modelo que reproduzca con suficiente exactitud, las características dinámicas del **SISTEMA** objeto de estudio [5]. En términos generales, el proceso de identificación comprende los siguientes pasos [5]:

1. *Obtención de datos EXPERIMENTALES de entradas-salidas:* Para lo cual se debe excitar el sistema mediante la aplicación de estrategias para generar señales de entradas y salidas registrando la evolución de estas entradas y salidas durante un intervalo de tiempo.
2. *Tratamiento previo de los datos registrados:* Los datos registrados están generalmente acompañados de ruidos indeseados u otros tipos de imperfecciones que deben ser corregidos antes de iniciar la identificación del modelo. Se debe, entonces de preparar los datos para facilitar y mejorar el proceso de identificación.

3. *Elección de la estructura del modelo:* Si el modelo que se desea obtener es un modelo paramétrico como es el caso que se considera en este trabajo, el primer paso es determinar la estructura para dicho modelo, es decir, determinar la forma de la ecuación de transferencia del modelo.
4. *Obtención de los parámetros del modelo:* A continuación se procede a la determinación de los parámetros de la estructura que mejor ajustan la respuesta del modelo a los datos de entrada-salida obtenidos experimentalmente.
5. *Validación del modelo:* El último paso consiste en determinar si la curva de comportamiento de los
6. modelos identificados con el 50% de los datos experimentales, es al menos semejante a la curva de comportamiento del mismo modelo pero con el otro 50% de los datos experimentales También se pueden comparar los modelos identificados, con modelos obtenidos por distintos procedimientos. Por ejemplo comparar un modelo del sistema obtenido por métodos paramétricos con el modelo del sistema obtenido por métodos no paramétricos. Este procedimiento, se denomina validación del modelo. Si se llega a la conclusión de que el modelo no es válido, se deben revisar los siguientes aspectos como posibles causas:

-El conjunto de datos de entrada salida, no proporciona suficiente información sobre la dinámica del sistema.

-La estructura seleccionada, no proporciona buena descripción del modelo

-El criterio de ajuste de parámetros seleccionado, no es el adecuado.

El diseño de un controlador continuo o discreto ya sea mediante técnicas clásicas o en variable de estado, requiere de un modelo del sistema a controlar que reproduzca su comportamiento dinámico. Este modelo permite al diseñador realizar y validar mediante simulación, el ajuste de los parámetros del controlador que conduzcan a obtener una respuesta que satisfaga las especificaciones de diseño. En este trabajo, dado que se utiliza **una entrada y una salida**, se aplica el **concepto clásico** de sistema [5].

B. Concepto de sistema

Un sistema es una combinación de componentes que actúan conjuntamente y cumplen determinado objetivo [2], la Fig.1 es el esquema de un sistema, donde interactúan variables de

diferentes tipos para producir señales observables. Las señales observables que son de interés para el observador, se denominan **salidas** del sistema, en la figura 1 se representa por $y(t)$, mientras que las señales que pueden ser manipuladas libremente por dicho observador son las **entradas** del mismo, que en la figura 1, se representa por $u(t)$. El resto de señales que influyen en la evolución de las salidas pero no pueden ser manipuladas por el observador se denominan **perturbaciones**, representadas por $e(t)$.

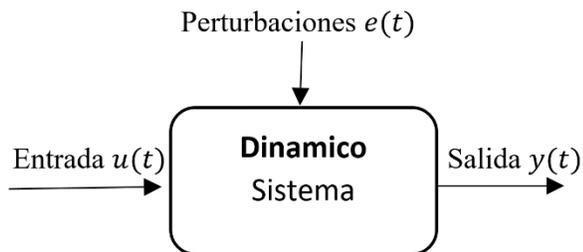


Fig. 1 Esquema de un sistema dinámico.

III. METODOLOGIA

A. Sistema a identificar y descripción de componentes complementarios

El sistema a identificar es un prototipo de turbina Pelton de eje horizontal (figura 2), con las siguientes características técnicas

- Diámetro de la tobera: 0,75 pulgadas
- Angulo de salida del alabe: 168°
- Número de alabes: 16



Fig. 2 Vista frontal de la turbina Pelton estudiada. Fotografía tomada en el laboratorio de fluidos y máquinas hidráulicas de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Tecnológica de Pereira.

En las figura 3 y 4, se muestran elementos utilizados para la identificación del sistema. Un sensor de presión piezoeléctrico marca *Icsensors* mostrado en la fig.4# 1 con

circuito de salida de 4 a 20 mA que transforma la señal de entrada (presión) en voltaje. La presión que alimenta la turbina fue medida con la ayuda de un manómetro FIMA con capacidad de 7 bares-100 psi, (fig.4#2). La turbina Pelton fue instalada sobre el banco de experimentación mostrado en la fig.4#3. El agente generador de perturbaciones fue constituido por la válvula de bola de 1,5 pulgadas de cierre rápido mostrada en la fig.3 # 4, la cual fue instalada en una tubería de PVC de 1,5 pulgadas de diámetro y al motor-reductor de velocidad variable mostrado en la fig.3# 2.



Figura 3. Motor -válvula excitadora -variador de velocidad



Figura 4. Equipo ensamblado para la experimentación.

Una bomba centrífuga de velocidad variable fue utilizada para suministrar el agua a las turbinas (fig.4 # 6). El agua es almacenada en el tanque mostrado en la fig.4# 7). Una conexión flexible (fig.4 N0 4) fue utilizada para unir el eje de la turbina con el transductor de velocidad de rotación para eliminar el efecto vibratorio. El transductor de velocidad (fig 4 #5), que convierte las rpm en voltaje.

En la Fig.5, se muestran los componentes del sistema de adquisición de dato, que se describen a continuación:

- Tacómetro digital Foto /contacto modelo DT- 2236 (fig.5 #1)
- Osciloscopio digital Fluke 123, que actúa como instrumento de adquisición de datos, (fig.5# 2)
- PC
- Amplificador separador MCR de tres vías configurable (fig.5 # 4).
- Conversor corriente- voltaje (fig.5 #5)
- Fuente de 0 – 15 v. (fig 5#6)



Figura 5. Equipo de acondicionamiento de adquisición de señales.

La Fig.6, muestra la forma como el osciloscopio presenta en pantalla los datos y las gráficas de comportamiento de la señal de entrada (curva B), y de salida (curva A).

Las figuras 2, 3, 4, 5, 6 son fotografías tomadas en el laboratorio de Fluidos y máquinas hidráulicas de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Tecnológica de Pereira-Colombia.

B. Ensayos previos para la adquisición de los datos experimentales.

Una vez acondicionado todo el sistema para la recolección de los datos, se realizaron algunos ensayos para determinar el funcionamiento de cada uno de los componentes, lo que permitió corregir los efectos de ruidos presentados en las señales de salida y de entrada del sistema, como se muestra en la Fig.7. Los elementos piezoeléctricos, son materiales cristalinos que al deformarse físicamente por la acción de una presión, generan una señal eléctrica, son elementos ligeros de pequeño tamaño y de construcción robusta. Su señal de respuesta a una variación de presión es lineal y son adecuados para medidas dinámicas, al ser capaces de respuestas frecuenciales de hasta un millón de ciclos por segundos [4]. Se hicieron varios ensayos donde se comprobó la linealidad del sensor dada en catálogos.

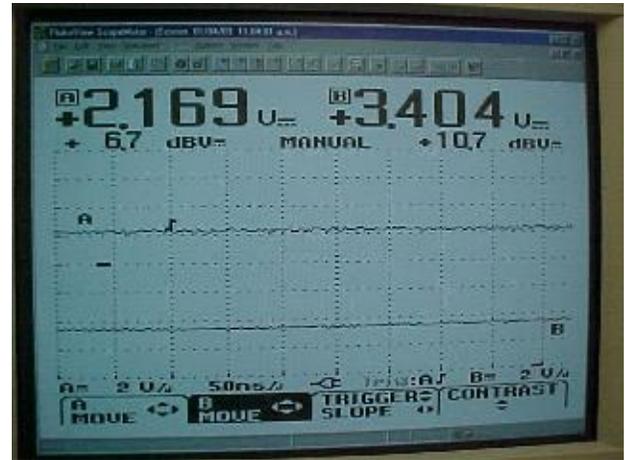


Figura 6. Datos capturados por el osciloscopio y presentados en la pantalla.

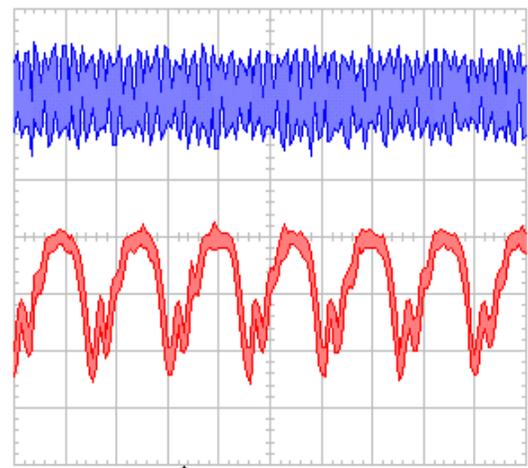


Figura 7. Ejemplo de la Señales de entrada (Rojo) y salida (Azul) en uno de los ensayos de prueba. Eje vertical en Voltios y eje horizontal en Tiempo

La figura 8 muestra el resultado obtenido al determinar experimentalmente el comportamiento del transductor de velocidad (curva de puntos) y su tendencia (continua). Las puntos tiende hacia la recta $\omega = 95,251v + 585,55$ con $R^2 = 0,9363$, y pendiente positiva, dando un coeficiente de correlación $R = 0,9676$. La cercanía de este coeficiente a +1 indica una fuerte relación entre la señal de entrada y la señal de salida [10]:

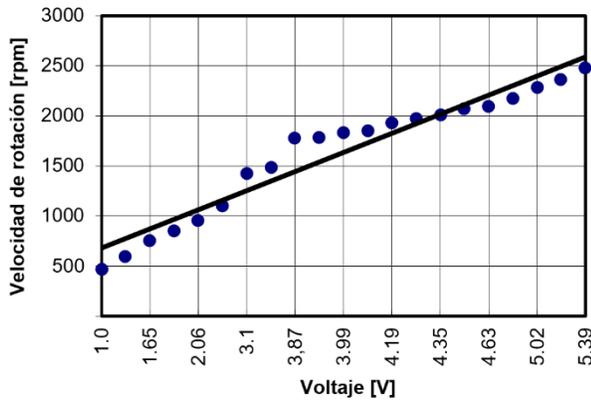


Figura 8. Comportamiento del transductor de velocidad.

IV. RESULTADOS

A. Curva de comportamiento para los datos experimentales

La figura 9 muestra el comportamiento de la señal de entrada u_1 (presión) y de salida y_1 (rpm) para los datos (1000 datos tomados en intervalos de 0.5 segundos) utilizados para la identificación del sistema.

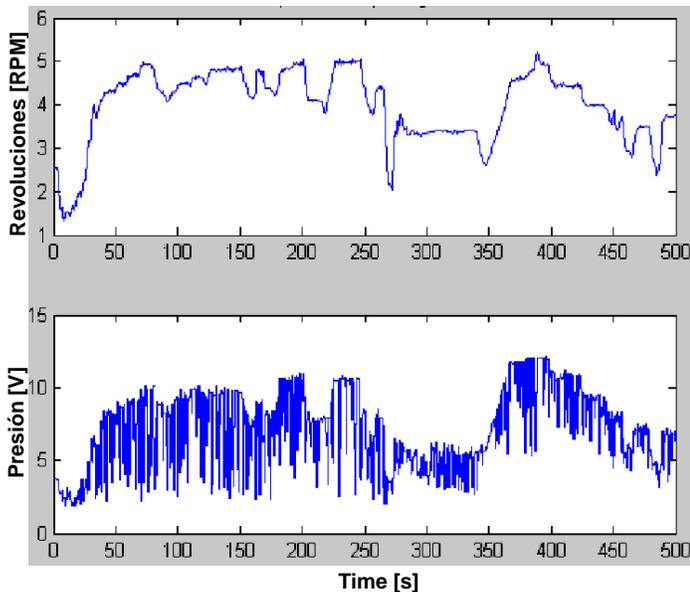


Figura 9. Comportamiento de los datos de entrada y de salida.

B. Identificación de sistemas con Matlab

El programa Matlab, dispone de una colección de funciones aplicables al campo de la identificación de sistemas, agrupadas en el System Identification Toolbox, que constituyen una herramienta de gran utilidad para la identificación y modelado de sistemas dinámicos. Estas funciones incluyen diferentes algoritmos para el ajuste de parámetros en todo tipo de modelos. Así mismo, permiten examinar las propiedades de los modelos obtenidos, e incluso realizar un pre-procesamiento

de los datos utilizados para la identificación, en caso de que sea necesario. [7]:

Los datos de entrada y de salida suelen encontrarse almacenados en ficheros ASCII, que pueden ser cargados en el workspace de Matlab mediante la función *load* para procesarlos después. Todas las funciones del Toolbox de Identificación que requieren como parámetros los datos de entrada-salida, deben recibir dichos datos en una matriz de dos columnas y N filas, siendo N el número de datos (muestras) de entrada-salida registrados. En la primera columna aparecen las salidas en sucesivos períodos de muestreo y en la segunda las correspondientes entradas. La Fig.10, muestran las Salidas (voltajes correspondientes a las velocidades de rotación de la turbina, con respecto al tiempo en segundos) producidas con los datos utilizados para la identificación del modelo Pelton, y las salidas producidas por algunos de los modelos alternativos ARS seleccionados. La 1 manifiesta el comportamiento con respecto al tiempo de las salidas de algunos de los modelos seleccionados; 2 muestra el comportamiento con respecto al tiempo de la salida presentada por los datos utilizados para la identificación y que se tomará como referencia para la selección del modelo final y 3 muestra la salida del modelo seleccionado por el Matlab.

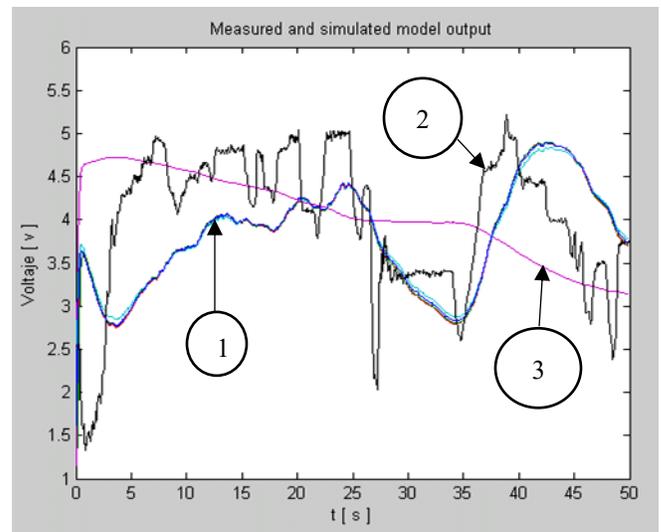


Figura 10. Salida presentada por algunos modelos alternativos seleccionados con datos utilizados para la identificación.

La Fig.11-1 muestra la salida medida con los datos de la identificación superpuesta con las diferentes salidas predichas por los modelos seleccionados pero un paso adelante, esto es en un tiempo $t_1 > t_0$, t_0 es el tiempo donde se presenta la situación de la figura 10.

De la figura 11, se observa que los modelos ARS 631, ARS 521, ARS 441, ARS 321, y ARS 312, se ajustan en aproximadamente el 93% al sistema, lo que indica que los modelos obtenidos describen altamente el comportamiento dinámico del sistema (turbina) que se está identificando.

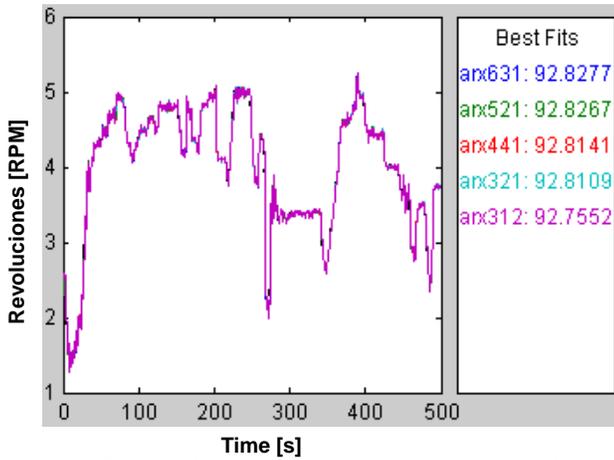


Figura 11. Salidas presentada por los datos par $t_1 > t_0$

C. Selección de modelos alternativos para el sistema

Los modelos paramétricos contemplados por el Toolbox de Matlab, se enmarcan a la siguiente estructura.

$$A(q^{-1}) \cdot y(t) = \frac{B(q^{-1})}{F(q^{-1})} \cdot u(t) + \frac{C(q^{-1})}{D(q^{-1})} \cdot e(t) \quad (3)$$

Donde $u(t)$, $y(t)$ y $e(t)$ son las entrada, salida y ruido del sistema respectivamente, y A, B, C, D y F son polinomios función del operador retardo o desplazamiento. Escoger una estructura es escoger las órdenes de todos los polinomios que intervienen. En ocasiones esta elección conduce a simplificaciones típicas de la estructura general anterior entre estas se encuentra el ARX, aplicado por Matlab para la identificación y que permite obtener los coeficientes del modelo por método de mínimos cuadrados recursivos, y cuya estructura obedece. [5]:

$$\text{ARX: } A(q^{-1}) \cdot y(q^{-1}) = B(q^{-1}) \cdot u(t) + e(t) \quad (4)$$

El Matlab utiliza simultáneamente el criterio de error final de predicción de Akaike (FPE su sigla en Inglés) y el criterio de información de Akaike., ambos simulan la situación de validación cruzada, donde se simula el modelo con los datos de validación, y están basados en la parsimonia y la calidad de ajuste que tiene el modelo.

La idea de parsimonia, consiste en que un buen modelo, tiene pocos parámetros ya que ha capturado las propiedades intrínsecas de la serie que analiza, un modelo complicado con demasiados parámetros, es un modelo sin parsimonia, en consecuencia de los modelos alternativos, se elige aquel que tenga menos parámetros [5].

Después de aplicar la Interfaz Gráfica de Usuario (GUI) del System identification Toolbox a los datos experimentales al

sistema Pelton y aplicar programación en Matlab, algunos de los modelos alternativos estimados fueron:

ARX 312 (Numero de coeficiente del polinomio $A = n_a = 3$, numero de coeficiente del polinomio $B = n_b = 1$, numero de retardos entre la entrada y la salida = $n_k = 2$) que se ajustó a la curva de los datos para la identificación en 92.7552%, con función de pérdida 0.0036174, FPE 0.00367574 y función de transferencia:

$$G(s) = \frac{0.0006539 s^3 + 0.005769 s^2 + 0.006457 s - 0.1386}{s^4 + 5.409 s^3 + 48.74 s^2 + 44.2 s - 0.2577} \quad (5)$$

FPE = Error final de predicción de Akaike = $V(1 + \frac{d}{N}) / (1 - \frac{d}{N})$, Donde V es la función de pérdida, d es el número de parámetros estimados y N el número de datos [1]

ARX 521 que se ajustó a la curva de los datos para la identificación en 92,826 %, con función de pérdida de 0.0035566, FPE 0.0036576 y función de transferencia:

$$G(s) = \frac{0.005596 s^5 + 0.067769 s^4 + 0.5248 s^3 + 2.184 s^2 + 5.085 s + 4.564}{s^6 + 9.04 s^5 + 82.13 s^4 + 310.5 s^3 + 869.6 s^2 + 497.3 s + 7.427} \quad (6)$$

ARX 441 que se ajustó a la curva de los datos para la identificación en 92,814 %, con función de pérdida 0.0035595 y FPE 0.00367159 y función de transferencia

$$G(s)_{441} = \frac{0.01995 s^3 + 0.02307 s^2 + 0.2688 s + 0.1086}{s^4 + 5.9 s^3 + 32.85 s^2 + 23.71 s + 0.1708} \quad (7)$$

ARX 321 que se ajustó a la curva de los datos para la identificación en 92,810 %, con función de pérdida 0.00357067, FPE 0.0036428 y función de transferencia:

$$G(s)_{321} = \frac{0.005646 s^3 + 0.04968 s^2 + 0.2618 s + 0.355}{s^4 + 5.443 s^3 + 48.87 s^2 + 44.6 s + 0.5666} \quad (8)$$

$$G(s)_{321} = \frac{0,0056(s + 1.871)(s^2 + 6.879s + 33.88)}{(s + 0.9868)(s + 0.02102)(s^2 + 4.441s + 44.42)}$$

Finalmente, fue seleccionado el modelo **ARX 321** por las siguientes razones:

1. La figura 12, muestra que los resultados del análisis de correlación, están dentro del margen de confianza que define la validez del modelo, según los criterios del Matlab.
2. El Matlab, utiliza simultáneamente el criterio de error final de predicción de Akaike (FPE) y el criterio de información de Akaike, ambos simulan la situación de validación cruzada, donde se simula el modelo con los datos de validación, y están basado en el concepto de

parsimonia y en la calidad de ajuste del modelo. La idea de parsimonia establece que un buen modelo, tiene pocos parámetros, porque ha capturado las propiedades intrínsecas de la serie que analiza. Un modelo con muchos parámetros, es un modelo complicado sin parsimonia. El modelo ARX 321, presentó mejor ajuste de la salida obtenida con los datos de validación, con la salida producida con los datos utilizados para la identificación.

de confianza La Figura.12 muestra los resultados del análisis de correlación del modelo escogido, en donde se aprecia que está dentro del margen de confianza que define la validez de estos modelos según los criterios del Matlab.

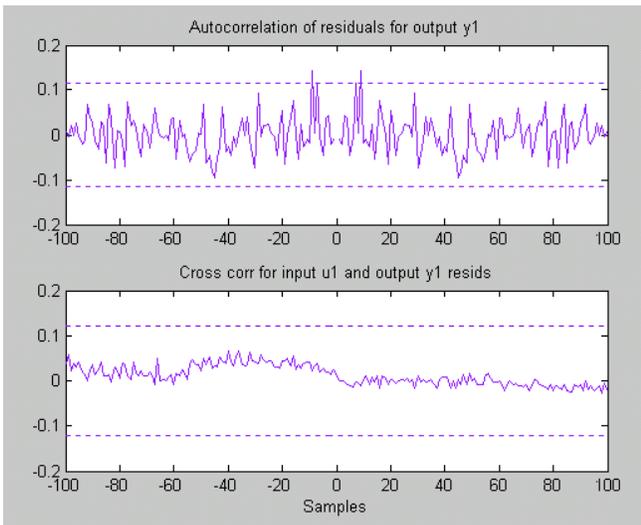


Figura 12. Analisis de correlación del Modelo ARX 321 (na =3, nb= 2, nk=1)

V. CONCLUSIONES

El modelo seleccionado ARX₃₂₁ es consistente con el comportamiento lineal del sistema, por su respuesta ante una entrada escalón que fue simulada por una apertura y un cierre súbito de la válvula perturbadora. También por su respuesta al principio de superposición, que fue simulado por el cierre en dos pasos de la válvula.

La validez del método de identificación aplicado, se puede verificar, analizando los polos dominantes y los ceros de la ecuación (6) de la siguiente manera:

El polo -0.988 se encuentra muy lejos del origen comparado con la distancia al origen del polo dominante -0.02102, lo que indica que se puede cancelar su efecto [8]. Cancelando este polo, el polinomio característico queda reducido a tercer orden lo mismo que el orden del polinomio

característico de la ecuación de transferencia del sistema (9), obtenida de su respuesta en frecuencia [9]. Además los polos complejos conjugados, son prácticamente los mismos.

$$G(s) = \frac{0.0155(s + 3.76)(s + 12.5)}{(s + 0.0144)(s^2 + 4.57s + 47.28)} \quad (9)$$

La validez del modelo obtenido, también se puede verificar Comparando un modelo semidetallado cuya función de transferencia fué obtenida matemáticamente mediante la aplicación de los Bond-Graph y diagramas de estados [10], descrita por la ecuación (10) y se observa que también es de orden tres.

$$G(s) = \frac{11s^2 + 1,063 * 10^{-5}s + 0.554 * 10^{-11}}{s(s + 84)(s + 0.956 * 10^{-10})} \quad (10)$$

Se concluye que la elección del método de identificación es determinante para obtener un modelo que realmente identifique el comportamiento del sistema, y que permita el diseño de un controlador para el sistema identificado.

VI PASOS SEGUIDOS

Una vez identificado el sistema, se determinó la estabilidad, el comportamiento en el tiempo, la respuesta en frecuencia, la controlabilidad, la observabilidad entre otras características, que permitió establecer una estrategia de control que condujo a la implementación de un controlador **PID** a un módulo de turbina pelton en una micro central hidráulica de laboratorio figuras 13 y Figura 14 para mantener constante de forma automática la velocidad de generación eléctrica de un generador de 2 kw unido a la turbina mediante un sistema de correa - polea. La acción final de control se efectúa mediante un sistema tornillo sin fin corona que unido a una válvula de aguja, regula el flujo de agua que llega a la turbina.

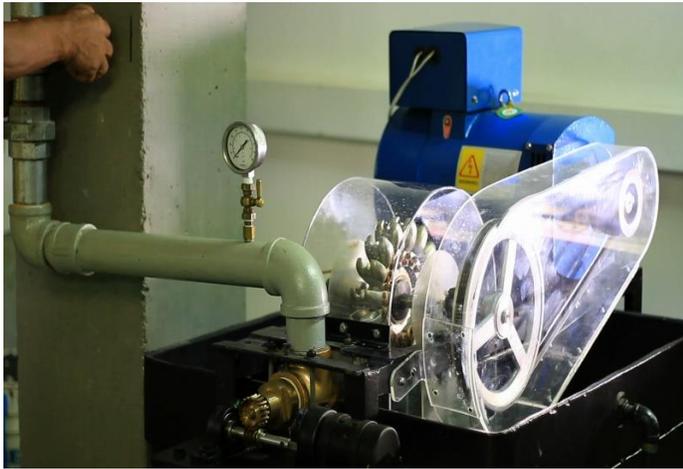


Figura 13 fotografía del prototipo de microcentral hidráulica en el laboratorio de Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulica de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Tecnológica de Pereira- Colombia

La figura 14 muestra el banco de bombillos incandescentes que simula la carga del prototipo de microcentral del laboratorio, el sistema corona sin fin que mediante la aplicación de un controlador **PID**, ejerce la acción final de control.

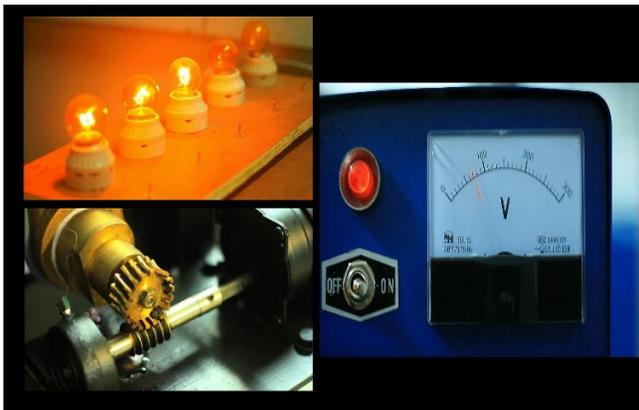


Figura 14.

fotografía del prototipo de microcentral hidráulica en el laboratorio de Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulica de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Tecnológica de Pereira - Colombia

Se espera implementar este sistema de control en una minicentral hidráulica en alguna comunidad que no se encuentre conectada al sistema eléctrico nacional, pero que cuente con los recursos hídricos necesarios.

VII. BIBLIOGRAFÍA

[1] KATSUHIKO Ogata:” Ingeniería de Control Moderna, 2nd , 1993 editorial Prentice-H all Hispanoamericana, S. A.H

[2] L Ernesto,” Identificación y control de una turbina eólica a pequeña escala mediante filtros de Kalman (EnKF)”. Universidad Tecnológica de Pereira facultad de Ingenierías. Eléctrica, Electrónica, Física y Ciencias de la Computación. Ingeniería Eléctrica. 2015.

[3] A Johanna “Interfaz gráfica para la identificación de sistemas lineales usando matlab”. Universidad Tecnológica de Pereira, facultad de ingenierías: Eléctrica Electrónica Física y Ciencias de la Computación. Ingeniería Eléctrica. 2015

[4] H. herrera, et al, “Identificación de Sistemas: Aplicación al diseño de controladores de temperatura” .memorias ii congreso latinoamericano de Ingeniería Biomédica, mayo 25 ,2001 Habana Cuba.

[5] L G., María “Identificación de sistemas. aplicación al modelado de un motor de continua”. departamento de electrónica

[6] M. Berenson y D. M. Levine,” Estadística básica en administración. Conceptos y aplicaciones”.6th ed, prentice Hall Eds. press 1996.

[7] L. Ljung. System Identification Toolbox for use with Matlab, User’s Version 4, The Math Works, Inc, Natick, MA, 1997

[8] L, Lennart: System Identification: Theory for the User 4nd E. prentice Hall, 1999

[9] R. Valencia: “Identificación de las características dinámicas de funcionamiento de dos turbinas hidráulicas para propósito de control de velocidad”. Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Ingeniería Mecánica. Trabajo de maestría Pereira. 2005.

[10] F. Alzate, R.Valencia,”Modelos para validar la identificación de Turbinas Hidráulicas para el diseño del control de velocidad”. SCIENTIA ET TECHNICA. Año VIII, N_o 18, PP 79-84, Abril 2002