

Diseño de un Controlador Predictivo para la Etapa de Acondicionamiento de un Convertidor de Energía de las Olas

Iván de Jesus Osio Chavez * Paul Rolando Maya Ortiz *

* Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México,
04310 Coyoacán, México (e-mail: ivandejesusosio@gmail.com,
paulm@ctrl.fi-b.unam.mx.)

Resumen: En este artículo se presenta la aplicación de un controlador predictivo generalizado en dos pasos adaptable (en sus siglas en inglés, Adaptive Two Step Generalized Predictive Control, ATSGPC) con el fin de resolver el problema de regulación de la velocidad del flujo de salida proporcionado por un inyector de aguja hacia una turbina hidráulica. El proceso es visto como un caso particular de un convertidor de energía de las olas (etapa de acondicionamiento) y por ello, no se considera el problema de máxima extracción de energía. El diseño de control, permite tratar directamente con la no linealidad de entrada (físicamente representada por el movimiento lineal de la aguja del inyector), y además, realiza en línea la estimación de los parámetros representativos a un posible sistema lineal para el diseño de un modelo de predicción. La evaluación del sistema de control se realiza mediante una simulación numérica considerando un modelo lineal para el flotador con fuerza de difracción irregular.

Keywords: Control Predictivo Generalizado, Tanque presurizado, No linealidad estática, convertidor de energía de las olas, inyector de aguja.

1. INTRODUCCIÓN

Ya sea por el problema de la contaminación, Michael Hoel (1996) o bien por el posible agotamiento inmediato de los combustibles fósiles, Mikael Hook (2013), Creina Day (2017), es necesario plantear nuevas alternativas con el fin de fomentar el uso de las energías renovables. En el mundo existe un gran potencial de extracción de energía de las olas y un gran número de tecnologías de extracción, junto con sus correspondientes estrategias de control, Linguo Wang (2018), así que, una alternativa viable, para sustituir el uso de combustibles fósiles y además amigable con el ambiente, bien podría ser el uso de la energía proveniente de las olas del mar.

A los dispositivos que se encargan de extraer la energía de las olas y convertirla en energía eléctrica útil se les conoce como, convertidores de energía de las olas (en sus siglas en inglés, Wave Energy Converters, WEC), Arthur Pecher (2017), Yonggang Lin (2015). El estudio y la utilización de los WECs conlleva varios beneficios significativos para la sociedad, porque la energía de las olas del mar es considerada como una fuente de energía sustentable e ilimitada, además puede contribuir significativamente a la red eléctrica, reforzando a las energías renovables que se encuentran en uso actualmente, Tiago Neves Sequeira (2018).

Con el objetivo de minimizar las pérdidas en el proceso de conversión de energía de las olas, el principal tema de

estudio desde los 70's ha sido el problema referente a la máxima extracción de energía, Falnes J. (1978), Paula B. Garcia-Rosa (2017), ya que este, es prácticamente un problema genérico para cualquier dispositivo WEC. Resulta ser muy interesante, plantear otro problema de control cuyo objetivo bien podría ser el de *suavizar* la energía extraída, que en principio es de naturaleza intermitente. Este artículo se enfoca en una tecnología en particular, conocida como convertidor de energía de las olas del tipo hiperbárico, Paulo R. Costa (2010), M. Martinez (2012), dicha configuración permite tratar el problema de regulación de la velocidad del chorro de agua que es proporcionado mediante un inyector hacia una turbina pelton. Se omite el problema de máxima extracción de energía y se considera simplemente un flujo variante a la entrada del tanque presurizado.

2. MODELO SIMPLIFICADO DE UN CONVERTIDOR DE ENERGÍA DE LAS OLAS

La sección del WEC hiperbárico (Figura 1) a tratar puede ser descrito principalmente mediante dos etapas: una etapa de extracción, conformada por un flotador, una etapa de acondicionamiento que se encarga de *filtrar* la energía extraída mediante el uso de dispositivos hidroneumáticos (principalmente bombas de desplazamiento lineal, válvulas de una sola vía, una cámara hiperbárica y un tanque presurizado provisto de un inyector de aguja).

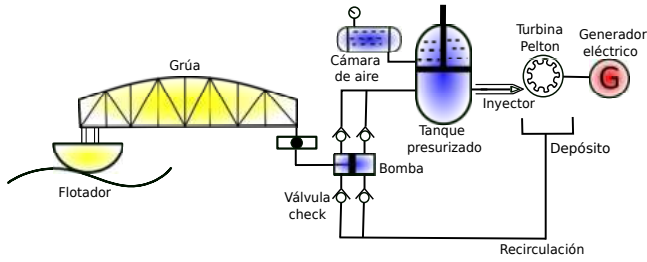


Figura 1. Esquema de un convertidor hiperbárico de energía de las olas por etapas.

Para la obtención del modelo matemático representativo al sistema hidroneumático se toman en cuenta las siguientes suposiciones:

- Fluido en estado líquido incompresible, unidimensional y régimen laminar.
- Proceso politrópico de expansión y contracción de un gas termodinámico.

2.1 Etapa de extracción

La descripción simplificada del modelo del flotador para el caso particular de pequeña amplitud, Falnes (2010) queda representado en la ecuación (1), en donde tanto la elevación de la superficie de la onda a_i como la frecuencia f_i de la misma, se consideran elementos que permiten representar una fuerza de excitación senoidal con amplitud y frecuencia variables, Figura 2.

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + kx = a_i \sin(2\pi f_i t). \quad (1)$$

la variable x representa la posición vertical del flotador y los parámetros m , b y k coeficientes de inercia, fricción y rigidez respectivamente, Cummins (1962), Arthur Pecher (2017).

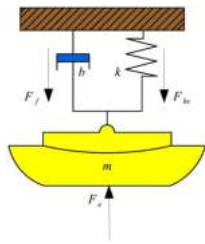


Figura 2. Flotador, visto como un modelo masa-resorte-amortiguador

El flujo bombeado $q_i(t)$ queda representado por

$$q_i(t) = A |\dot{x}| \quad (2)$$

donde A es un área transversal de tubería.

2.2 Principio de conservación de la masa aplicado al tanque presurizado

La tasa de variación de la masa en un tanque cilíndrico se representa matemáticamente como

$$\dot{h} = \frac{q_i}{A_T} - \frac{A_p}{A_T} v \quad (3)$$

donde v es la velocidad promedio a la salida del inyector definida como $v = \frac{\int_0^\infty \bar{v} dA_p}{\int_0^\infty dA_p}$, A_p el área transversal de tubería a la salida del tanque, q_i el caudal de entrada, A_T el área transversal del tanque y h la altura de la columna de agua.

2.3 Proceso politrópico de un gas ideal

En el proceso de expansión y compresión de un gas ideal (4) encerrado en un émbolo de modo que se puede variar la presión P y el volumen V_g , se puede usar la primera ley de la termodinámica (5) para modelar la posible trayectoria de estado del sistema termodinámico.

$$PV_g = nRT \quad (4)$$

$$dU = dQ - dW \quad (5)$$

donde T es la temperatura, n el número de moles de sustancia, R es una constante de proporcionalidad igual para todos los gases, U es la energía interna, Q es energía en forma de calor, W es el trabajo neto.

Considerando un proceso adiabático de un gas ideal (no hay transferencia de calor entre el sistema y el exterior) y la segunda ley de la termodinámica se puede obtener

$$TV_g^{(\gamma-1)} = PV_g^\gamma = cte \quad (6)$$

donde a γ se le conoce como índice politrópico.

Ya que PV_g^γ es siempre igual a una constante entonces la variación en el tiempo de esta ecuación debe cumplir con

$$\dot{P}V_g^\gamma + P\gamma V_g^{\gamma-1}\dot{V}_g = 0 \quad (7)$$

y además se puede obtener $\dot{P}$ como

$$\dot{P} = -\frac{P\gamma V_g^{\gamma-1}\dot{V}_g}{V_g^\gamma} = -\frac{\gamma P\dot{V}_g}{V_g} \quad (8)$$

de la ecuación de continuidad (3) sabemos que el volumen del gas varía inversamente a la variación del volumen del agua en el tanque, es decir, $\dot{V} = -A_T\dot{h} = -(q_i - A_p v)$, y de la geometría del tanque se sabe que el volumen total del tanque V_T cumple con

$$V_T = V_a - V_g \quad (9)$$

donde V_a es el volumen que ocupa el agua dentro del tanque. De esta manera usando (3) y (9) en (8) se obtiene la dinámica de la presión

$$\dot{P} = \frac{\gamma P(q_i - A_p v)}{V_T - A_T h} \quad (10)$$

2.4 Ley de conservación de la cantidad de movimiento aplicada al inyector

Un inyector realiza dos principales tareas: la primera tiene que ver con la boquilla del inyector, esta convierte la energía potencial del agua, en energía cinética y la segunda tarea consiste en regular el caudal a través de una aguja incorporada que es accionada mediante un servomotor, Figura 3. La ley de la conservación de la cantidad de movimiento nos permite representar matemáticamente

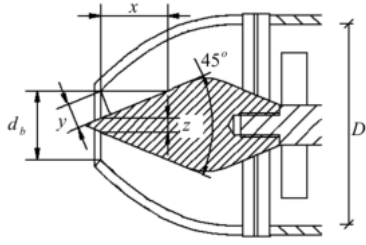


Figura 3. Inyector: la velocidad del fluido se regula ajustando la posición x de la aguja en la boquilla.

la conversión de energía potencial del agua, en energía cinética

$$\frac{d(mv)}{dt} = \sum_{i=1}^n F_i \quad (11)$$

se puede llegar a un modelo reducido de la velocidad de salida sustituyendo las siguientes relaciones $F = PA_p$ y $m = \rho l_p A_p$ en (11), donde l_p es una longitud de tubería y A_p es el área transversal de la misma. Así, la dinámica de la velocidad se obtiene con

$$\dot{v} = \frac{1}{(\rho l_p)} \left(\sum_{i=1}^n P_i \right) \quad (12)$$

donde las P_i pueden ser debidas a

- Presión inicial y final en el volumen de control (P_1, P_2).
- Presión debido a una maquina hidráulica.
- Presión proporcionada por el gradiente de presión (una columna de líquido).
- Pérdidas de carga por fricción tanto en tuberías, codos, uniones, estrechamientos y válvulas.

Por simplicidad no se modelan las perdidas por fricción en la tubería, pero sí se modelan las perdidas P_{fr} proporcionadas por el inyector (válvula de aguja) de la turbina. Ya que la presión a la entrada del volumen de control es $P_1 = P + \rho gh$ y $P_2 = P_{fr}$ la ecuación queda de la siguiente forma

$$\dot{v} = \frac{1}{(\rho l_p)} (P + \rho gh - P_{fr}). \quad (13)$$

El caudal se regula ajustando la carrera de la aguja x en la boquilla. Para calcular las perdidas por fricción P_{fr} se usa

$$P_{fr} = \phi_{D0} \frac{v^2}{2g} \quad (14)$$

donde ϕ_{D0} es el llamado coeficiente de descarga que depende del área efectiva de la contracción del inyector, Zhang (2016). La apertura se definirá con la variable x , la sección de paso del fluido está dada por

$$S = \pi \left(\frac{d_b + z}{2} \right) y \quad (15)$$

De acuerdo a la Figura 3. se cumple

$$\begin{aligned} y &= x \sin(\alpha) \\ z &= d_b - 2y \cos(\alpha) \end{aligned} \quad (16)$$

donde α vale la mitad del ángulo del punzón, reemplazando estas relaciones en (15) se tiene

$$S = \pi x \sin(\alpha) (d_b - x \sin(\alpha) \cos(\alpha)). \quad (17)$$

Para calcular el coeficiente de perdidas ϕ_{D0} se debe obtener experimentalmente la gráfica característica, esta se genera a partir de diferentes valores de contracción d_{eq}/D , con estos valores se puede encontrar una relación polinomial, por ejemplo, un polinomio de orden dos

$$\phi_{D0} = -a_1 (d/D)^2 - a_2 (d/D) + a_3 \quad (18)$$

donde d es el diámetro a la salida de la reducción y D diámetro a la entrada de la reducción. Ya que la sección de salida no es circular, se aproxima mediante un diámetro equivalente

$$\pi (d_{eq}/2)^2 = S$$

y despejando el diámetro equivalente d_{eq}

$$d_{eq} = 2\sqrt{S/\pi}$$

En nuestro caso el coeficiente de pérdidas se aproximara por una recta con pendiente k , entonces

$$P_{fr} = -k (d_{eq}/D) \frac{v^2}{2g} \quad (19)$$

$$d_{eq} = 2\sqrt{x \sin(\alpha) (d_b - x \sin(\alpha) \cos(\alpha))}$$

3. CONTROL PREDICTIVO GENERALIZADO EN DOS PASOS

3.1 Modelos Hammerstein y GPC

Un modelo tipo Hammerstein, K. P. Fruzzetfi (1997), Ding Bao-Cang (2003) se representa mediante un modelo dinámico lineal y una no linealidad estática a la entrada, i. e.,

$$\begin{aligned} A(z^{-1})y(k) &= B(z^{-1})v(k) \\ v(k) &= f(u(k)), \quad f(0) = 0 \end{aligned} \quad (20)$$

en donde $A(z^{-1})y(k) = B(z^{-1})v(k)$ es un modelo en tiempo discreto en términos del operador retraso z^{-1} , $u(k)$ es la entrada física a la planta en el tiempo k , que a su vez es mapeada a través de una no linealidad $f(u)$ con el fin de obtener $v(k)$ que es la entrada del sistema dinámico lineal, se asume que la no linealidad $f(u)$ es invertible y $y(k)$ la salida del sistema.

El control predictivo generalizado (por sus siglas en inglés, Generalized Predictive Control, GPC), puede ser aplicado directamente sobre modelos Hammerstein. El GPC resuelve el problema de control calculando una secuencia de entradas $u(k)$, $\{k = 1, \dots, M\}$, que minimizan una cierta función de costo $J(k)$, haciendo uso de un modelo predictivo.

Para ser más explícitos definimos nuestro objetivo de control como sigue:

Objetivo de control: dado un sistema hidroneumático descrito por (3),(10),(13) y (19) suponiendo que se logra representar dicho modelo hidroneumático mediante (20) (esto se puede conseguir usando datos de entrada/salida o bien discretizando un modelo linealizado), donde $y(k)$ representa la velocidad del chorro de agua a la salida del inyector, $v(k) = f(u(k))$ una señal intermedia de control, $u(k)$ el desplazamiento horizontal de la aguja del inyector

y $A(z^{-1}), B(z^{-1})$ polinomios a determinar. Diseñar una ley de control por GPC usando (20), que permita regular la velocidad del chorro de agua a la salida del inyector. Para la aplicación de dicha ley de control, la señal q_i se conseguirá resolviendo (1) y (2).

3.2 Modelo de predicción

Un modelo de predicción puede obtenerse a partir del uso de un modelo lineal CARIMA (por sus siglas en inglés, Controlled Auto-Regressive Integrated Moving Average), D. W. Clarke (1987).

$$A(z^{-1})y(k) = B(z^{-1})u(k-1) + \frac{C(z^{-1})\xi}{\Delta} \quad (21)$$

donde

$$\begin{aligned} A(z^{-1}) &= 1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_{n_a} z^{-n_a} \\ B(z^{-1}) &= b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_{n_b} z^{-n_b} \\ C(z^{-1}) &= c_0 + c_1 z^{-1} + \dots + c_{n_c} z^{-n_c} \end{aligned} \quad (22)$$

z^{-1} es el operador retraso, $\Delta = 1 - z^{-1}$ el operador diferencia y $\{\xi\}$ es una secuencia de ruido blanco con media cero.

La predicción $y(k+j | k)$ se realiza resolviendo la ecuación diofántica

$$1 = E_j(z^{-1})A(z^{-1})\Delta + z^{-j}F_j(z^{-1}) \quad (23)$$

donde E_j y F_j son polinomios a determinar, y son de la forma

$$\begin{aligned} E_j(z^{-1}) &= e_{j,0} + e_{j,1}z^{-1} + \dots + e_{j,j-1}z^{-(j-1)}, \\ F_j(z^{-1}) &= f_{j,0} + f_{j,1}z^{-1} + \dots + f_{j,n_a}z^{-n_a}. \end{aligned} \quad (24)$$

multiplicando (21) por $E_j(z^{-1})\Delta z^j$, y utilizando (23), la predicción de salida en el tiempo $k+j$ se puede reescribir de la siguiente forma

$$y(k+j | k) = E_j B \Delta u(k+j | k) + F_j y(k) + E_j \xi(k+j) \quad (25)$$

además, en el tiempo k los valores de $\xi(k+j)$, $i \in \{1, \dots, j\}$ son desconocidos, entonces, la mejor predicción de $y(k+j)$ que podemos lograr es

$$\bar{y}(k+j | k) = E_j(z^{-1})B(z^{-1})\Delta u(k+j-1 | k) + F_j(z^{-1})y(k) \quad (26)$$

si en (26), denotamos $G_j(z^{-1}) = E_j(z^{-1})B(z^{-1})$, entonces se puede introducir otra ecuación diofántica

$$G_j(z^{-1}) = E_j B = \tilde{G}_j(z^{-1}) + z^{-(j-1)}H_j(z^{-1}) \quad (27)$$

donde

$$\tilde{G}_j(z^{-1}) = g_{j,0} + g_{j,1}z^{-1} + \dots + g_{j,j-1}z^{-(j-1)}, \quad (28)$$

$$H_j(z^{-1}) = h_{j,1}z^{-1} + h_{j,2}z^{-2} + \dots + h_{j,n_b}z^{-n_b} \quad (29)$$

así la predicción puede ser reescrita como

$$\bar{y}(k+j | k) = \tilde{G}_j(z^{-1})\Delta u(k+j-1 | k) + H_j(z^{-1})\Delta u(k) + F_j(z^{-1})y(k) \quad (30)$$

con (30) la salida futura puede ser predicha aplicando la secuencia de entradas conocidas, salidas y entradas futuras.

3.3 Optimización del horizonte de predicción

En GPC, la función de costo a ser minimizada posee la siguiente forma

$$\begin{aligned} \min J(k) &= E \left\{ \sum_{j=N_1}^{N_2} [y(k+j | k) - y_s(k+j)]^2 \right\} \\ &+ E \left\{ \sum_{j=1}^{N_u} \lambda(j) [\Delta u(k+j-1 | k)]^2 \right\} \end{aligned} \quad (31)$$

donde y_s es la trayectoria de referencia, λ la definimos como una constante a ser diseñada, N_1, N_2 son los instantes iniciales y finales para el horizonte de predicción y N_u es el horizonte de control.

Aplicando la predicción al modelo (30) se obtiene

$$\begin{aligned} \bar{y}(k+1 | k) &= G_1(z^{-1})\Delta u(k) + F_1(z^{-1})y(k) = g_{1,0}\Delta u(k | k) + f_1(k) \\ \bar{y}(k+2 | k) &= G_2(z^{-1})\Delta u(k+1 | k) + F_2(z^{-1})y(k) \\ &= g_{2,0}\Delta u(k+1 | k) + g_{2,1}\Delta u(k | k) + f_2(k) \\ &\vdots \\ \bar{y}(k+N | k) &= G_N(z^{-1})\Delta u(k+N-1 | k) + F_N(z^{-1})y(k) \\ &= g_{N,N-N_u}\Delta u(k+N_u-1 | k) + \dots \\ &+ g_{N,N-1}\Delta u(k) + f_N(k) \end{aligned} \quad (32)$$

donde

$$\begin{aligned} f_1(k) &= [G_1 - g_{1,0}]\Delta u(k) + F_1 y(k) \\ f_2(k) &= z[G_2 - z^{-1}g_{2,1} - g_{2,0}]\Delta u(k) + F_2 y(k) \\ &\vdots \\ f_N(k) &= z^{N-1}[G_N - z^{-(N-1)}g_{N,N-1} - \dots - g_{N,0}] \\ &\Delta u(k) + F_N y(k) \end{aligned}$$

así, cuando $\lambda I + G^T G$ es no singular, la solución óptima para la función de costo es

$$\Delta \bar{u}(k | k) = (\lambda I + G^T G)^{-1} G^T [\bar{w}(k) - \bar{f}(k)] \quad (33)$$

y los movimientos óptimos de control están dados como

$$u(k) = u(k-1) + d^T [\bar{w}(k) - \bar{f}(k)] \quad (34)$$

donde d^T es el primer renglón de $(\lambda I + G^T G)^{-1} G^T$, y $\bar{w}(k) = [y_s(k+1), \dots, y_s(k+N)]^T$, $\bar{f}(k) = [f_1(k), \dots, f_N(k)]^T$, vectores conformados por parámetros previamente definidos.

3.4 GPC adaptable

En GPC, los parámetros del modelo pueden ser estimados en línea, utilizando datos de entrada y salida. Si reescribimos la parte lineal de (20) como

$$A(z^{-1})\Delta y(k) = B(z^{-1})\Delta u(k-1)$$

entonces

$$\Delta y(k) = -A_1(z^{-1})\Delta y(k) = B(z^{-1})\Delta u(k-1)$$

donde $A_1(z^{-1}) = A(z^{-1}) - 1$, de esta manera podemos definir el siguiente regresor lineal

$$\Delta y(k) = \phi(k)^T \theta$$

donde

$$\theta = [a_1 \dots a_{n_a} b_0 \dots b_{n_b}] \quad (35)$$

y

$$\phi(k) = [-\delta y(k-1) \dots -\Delta y(k-n_a)\Delta u(k-1) \dots \Delta u(k-n_b-1)]^T. \quad (36)$$

Con el modelo representado de esta manera podemos utilizar un método iterativo, i.e., mínimos cuadrados con olvido exponencial para estimar el vector de parámetros:

$$\begin{aligned}\hat{\theta} &= \hat{\theta}(k-1) + K(k)[\Delta y(k) - \phi(k)^T \hat{\theta}(k-1)] \\ K(k) &= P(k-1)\phi(k)[\phi(k)^T P(k-1)\phi(k) + \mu]^{-1} \\ P(k) &= \frac{1}{\mu}[I - K(k)\phi(k)^T]P(k-1)\end{aligned}\quad (37)$$

donde $0 < \mu < 1$ es el factor de olvido, $K(k)$ es el factor de peso, $P(k)$ es una matriz de covarianza definida positiva.

3.5 Control en dos pasos

El control en dos pasos aplica a una clase de sistemas en específico, i.e., sistemas con no linealidades a la entrada, como saturación, zona muerta, etc.

Ya que los modelos con representación Hammerstein están compuestos por una no linealidad estática seguida por un submodelo dinámico lineal, entonces es posible aplicar el TSGPC Ding Bao-Cang (2003). En TSGPC primero se diseña la acción de control de la variable intermedia usando GPC, para después calcular el control aplicado resolviendo una ecuación algebraica no lineal. El algoritmo a seguir es el siguiente

- Usando datos de entrada/salida, calcule (37) para estimar los parámetros del modelo $A(z^{-1})$, $B(z^{-1})$.
- Utilice este modelo para diseñar el control predictivo generalizado, para obtener $v(k)$. Así la ley de control GPC es

$$\Delta v(k) = d^T(\vec{w} - \overleftarrow{f}) \quad (38)$$

- Use $v(k) = v(k-1) + \Delta v(k)$ para calcular $u(k)$ el cual es aplicado a la planta real, i.e., resolviendo la siguiente ecuación:

$$f(u(k)) - v(k) = 0 \quad (39)$$

4. RESULTADOS

Con el fin de evaluar el desempeño del ATSGPC en la planta representada por el modelo de ecuaciones diferenciales no lineales, se usa los siguientes valores para resolver la simulación.

- Un retén de orden cero con frecuencia de muestreo de $0.1[s]$ y una señal de referencia $y_s = 20[m/s]$.
- Se parte la simulación con un desplazamiento de la aguja de $0.000657[m]$, $\bar{h} = 1.66[m]$, $\bar{P} = 98100[Pa]$ y $\bar{v} = 10[m/s]$
- Para el flotador se usan los siguientes parámetros: $m = 20000[kg]$, $b = 20000[kg/s]$, $k = 30819.02[kg/s^2]$, y una sección de tubería $A_p = 0.02[m^2]$.
- Los parámetros de control se eligieron como: $N_1 = 1$, $N_2 = 3$, $N_u = 3$, $\lambda = 20$.
- Los parámetros para identificación: $\mu = 10$, y las condiciones iniciales para el vector de parámetros y la matriz de covarianza, $\theta = [0.1 \ 0.2 \ 0.25 \ 0.35]$ y $P =$

$$\begin{bmatrix} 10 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 11 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 10.7 \end{bmatrix} \text{ respectivamente.}$$

- Para el tanque presurizado se usan los parámetros de la Tabla 1

Tabla 1: Parámetros del tanque presurizado

Parámetro	Valor
γ	1.4
ρ	$1000[Kg/m^3]$
g	$9.81[m/s^2]$
V_T	$1.691[m^3]$
A_T	$0.5675[m^2]$
A_p	$0.003[m^2]$
l_p	$0.4[m]$
$\bar{D}$	$0.004[m]$
k	$310 \times 10^4 [\frac{kg}{m \cdot s^2}]$
α	22.5°
d_b	$0.003[m]$

4.1 Comentarios

La dinámica del sistema comienza en la condición inicial dada, en el mismo instante es afectado por una variación en la señal q_i . La Figura 4, muestra la señal de flujo de entrada al tanque. La Figura 5 muestra la velocidad del flujo de salida, debe notarse que si bien no se consigue mantener la velocidad exactamente en la referencia deseada, esta se mantiene alrededor del punto de operación deseado pese al tamaño de la variación de q_i , esto debido a que en promedio el flujo de entrada es más grande en comparación al de salida.

La señal de control aplicada por el TSGPC se muestra en la Figura 6, esta señal se obtiene a partir del diseño mediante TSGPC para sistemas con no linealidades a la entrada. Finalmente en la Figura 7 se muestran los parámetros estimados por medio del método de mínimos cuadrados recursivos.

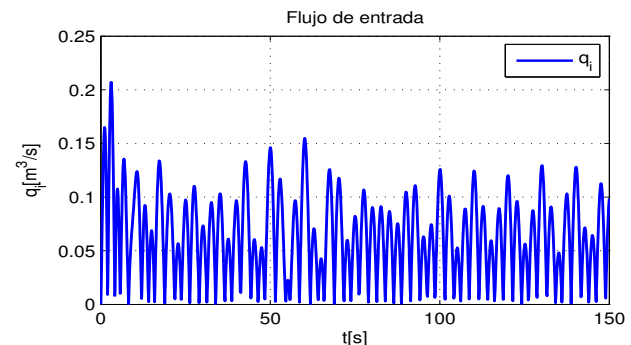


Figura 4. Flujo de entrada al tanque presurizado.

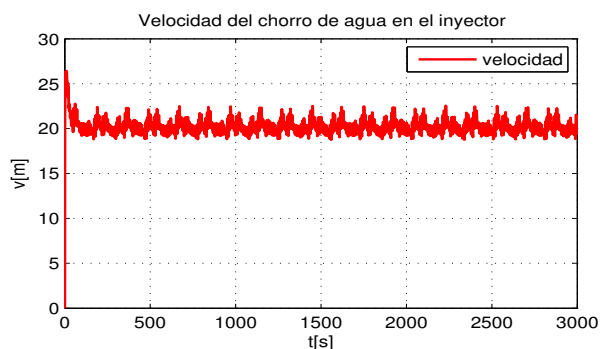


Figura 5. Velocidad del chorro de salida a la turbina hidráulica.

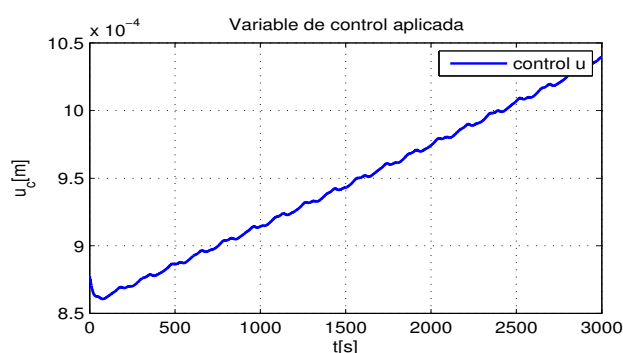


Figura 6. Señal de control aplicada a la válvula.

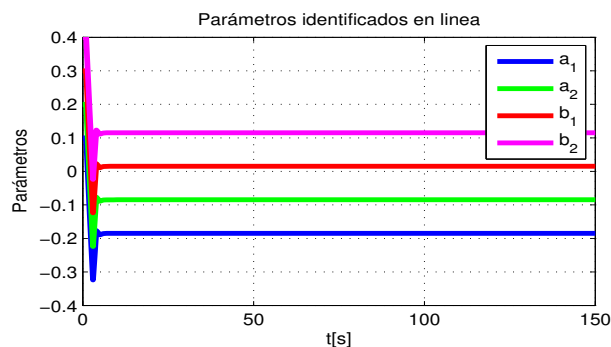


Figura 7. Parámetros estimados.

5. CONCLUSIONES

El controlador ATSGPC cumplió con el objetivo de control en el sentido de matener el valor nominal de la velocidad del chorro de salida alrededor del valor nominal, sin embargo, tanto la presión del gas como la altura de la columna de agua, no se mantuvieron alrededor de un valor fijo, esto se debe principalmente a que en promedio entra más flujo del que sale en el tanque, cuando la velocidad del flujo de salida es estabilizada, por esta razón, este tipo de tanques cuenta con valvulas de alivio. Por otro lado aunque no se esperaba tener convergencia paramétrica, estos resultaron converger a valores fijos y en menos de 10 segundos.

REFERENCIAS

- Arthur Pecher, J.P.K. (2017). *Handbook of Ocean Engineering and Oceanography*, volume 7. Springer Open.
- Creina Day, G.D. (2017). Climate change, fossil fuel prices and depletion: The rationale for a falling export tax. *Economic Modelling*, 63, 153–160.
- Cummins, W. (1962). the impulse response function and ship motions. *Department of the navy David Taylor model basin*.
- D. W. Clarke, C. Mohtadi, P.S.T. (1987). Generalized predictive control-part 1. the basic algorithm. *Automatica*, 23(2), 137–148.
- Ding Bao-Cang, Li Shao-Yuan, X.Y.G. (2003). Stability analysis of generalized predictive control with input nonlinearity based-on popov's theorem. *Acta Automatica SINICA*, 29(4).
- Falnes, J. (2010). *Ocean Waves and Oscillating Systems, Linear interactions including wave energy extraction*. Cambridge University Press.
- Falnes J., B.K. (1978). Wave power conversion by point absorbers. *Norwegian Maritime Research*, 6(4), 2–11.
- K. P. Fruzzetfi, A. Palazoglu, K.A.M. (1997). Nonlinear model predictive control using hammerstein models. *Journal of Process Control*, 7, 31–41.
- Linguo Wang, Jan Isberg, E.T. (2018). Review of control strategies for wave energy conversion systems and their validation: the wave-to-wire approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81(1), 366–379.
- M. Martinez, M.G. Molina, I.M.P.M.E.W. (2012). Modelling and simulation of wave energy hyperbaric converter (wehc) for applications in distributed generation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(19), 14945–14950.
- Michael Hoel, S.K. (1996). Depletion of fossil fuels and impacts of global warming. *Resource and Energy Economics*, 18, 115–136.
- Mikael Hook, X.T. (2013). Depletion of fossil fuels and anthropogenic climate change: A review. *Energy Policy*, 52, 797–809.
- Paula B. Garcia-Rosa, Geir Kulia, J.V.R.M.M. (2017). Real-time passive control of wave energy converters using the hilbert-huang transform. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1), 14705–14710.
- Paulo R. Costa, Paula B. Garcia-Rosa, S.F.e. (2010). Phase control strategy for a wave energy hyperbaric converter. *Ocean Engineering*, 37(17), 1483–1490.
- Tiago Neves Sequeira, M.S.S. (2018). Renewable energy and politics: A systematic review and new evidence. *Journal of Cleaner Production*, 192, 553–568.
- Yonggang Lin, Jingwei Bao, H.L.W.L.L.T.D.Z. (2015). Review of hydraulic transmission technologies for wave power generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 194–203.
- Zhang, Z. (2016). *Pelton Turbines*. Springer.