

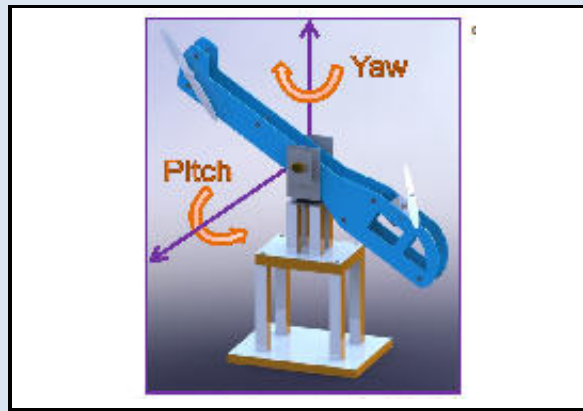
CONTROL PID MULTIVARIABLE DE UN PROTOTIPO DE HELICÓPTERO DE DOS GRADOS DE LIBERTAD UTILIZANDO ALGORITMOS EVOLUTIVOS

Ricardo Villalonga^{1*}, Luis Parraguez¹, Danilo Navarro¹, José Eduardo Rengel²

1: Universidad de Oriente, Núcleo de Anzoátegui, Postgrado en Ingeniería Eléctrica, Barcelona, Venezuela.

2: Universidad de Oriente, Núcleo de Anzoátegui. Departamento de Ingeniería Mecánica, Venezuela

* e-mail: villalonga.ricardo@gmail.com



RESUMEN

El desarrollo de aplicaciones de control para helicópteros representa un gran desafío por sus numerosos grados de libertad, su predominante dinámica no lineal y el fuerte acoplamiento entre sus variables. Para abordar esta problemática, se construyó un prototipo a escala de un helicóptero de dos grados de libertad (H2-GdL) utilizando materiales de bajo costo y tecnologías open source (Arduino y Scilab / Xcos). El modelo del prototipo se obtuvo con el toolbox de identificación de sistemas de MATLAB y luego se analizó la interacción entre las variables del sistema. Como estrategia de control, se emplearon controladores PID-2GdL ideales con filtro de primer orden y desacoplo estático. Los controladores se sintonizaron con los algoritmos evolutivos: optimización por enjambre de partículas (PSO) y búsqueda de cuco (CS), minimizando mediante simulación por lotes una función multiobjetivo que contempló los índices de desempeño IAE e IAU. Los mejores modelos identificados en lazo abierto con el método del error de predicción (PEM) presentaron estructuras Box Jenkins y ARMAX con una precisión moderada, los cuales arrojaron los menores errores durante la estimación y validación. La técnica de control aplicada permite obtener controladores PID con excelentes prestaciones, baja variabilidad, adecuada robustez para el seguimiento de la referencia y el rechazo de perturbaciones de carga con un mínimo error en estado estacionario y un esfuerzo de control aceptable.

Palabras Clave: H2-GdL, Arduino, Scilab, identificación de sistemas, desacoplo, PID-2GdL, PSO y CS.

MULTIVARIABLE PID CONTROL OF A TWO-DEGREE-OF-FREEDOM HELICOPTER PROTOTYPE USING EVOLUTIONARY ALGORITHMS

ABSTRACT

The development of helicopter control applications represents a great challenge due to its several degrees of freedom, its predominantly non-linear dynamics and the strong coupling between its variables. To tackle this problem, a scale prototype of a two-degrees-of-freedom (2-DOF) helicopter was built using low-cost materials and open source technologies (Arduino and Scilab / Xcos). The prototype model is obtained with the MATLAB systems identification toolbox and then the interaction between the system variables is analyzed. As a control strategy, ideal PID-2GdL controllers with first order filter and static decoupling were used. The controllers were tuned to the evolutionary algorithms: particle swarm optimization (PSO) and cuckoo search (CS), minimizing by batch simulation a multiobjective function that contemplated the performance indices IAE and IAU. The best models identified in open-loop with the prediction error method (PEM) presented Box Jenkins and ARMAX structures with a moderate precision, which yielded the minor errors during the estimation and validation. The applied control technique allows obtaining PID controllers with excellent performance, low variability, adequate robustness for reference tracking and load disturbance rejection with a

minimum error in steady state and an acceptable control effort.

Keywords: 2-DOF helicopter, Arduino, Scilab, system identification, decoupling, PID-2GdL, PSO and CS.

1. INTRODUCCIÓN

El H2-GdL es un sistema aerodinámico, multivariable, no lineal y altamente acoplado que permite observar un comportamiento simplificado del helicóptero real con un número reducido de grados de libertad. Consiste en un modelo de helicóptero montado sobre una base fija con dos hélices que son accionadas por motores de corriente continua. La hélice frontal controla la inclinación del helicóptero alrededor del eje de elevación o cabeceo (pitch) y la hélice trasera controla los movimientos alrededor del eje de dirección o guiñada (yaw), dichos ejes se muestran en la Figura 1. El control de un H2-GdL representa un gran desafío por el fuerte acoplamiento entre sus actuadores y la dinámica no lineal del sistema, motivo por el cual el H2-GdL es una elección frecuente para el estudio de diferentes estrategias de control (adaptativo, predictivo, óptimo, robusto, híbrido, entre otros.) en sistemas multivariables de dos entradas y dos salidas (TITO). Es por esta razón, que en este artículo se evaluó el control proporcional, integral y derivativo (PID) multivariable en un prototipo de H2-GdL desarrollado bajo un enfoque software in the loop (SIL).

2. PARTE EXPERIMENTAL

2.1. Diseño y Construcción del Prototipo

El prototipo fue diseñado y construido tomando como base el H2-GdL del fabricante Quanser y los prototipos desarrollados en otros trabajos. El control del H2-GdL se efectuó por medio de la comunicación serial (USB) entre un computador con el *software* Scilab / Xcos y la placa de desarrollo Arduino UNO, la cual realizó la lectura de las señales analógicas que indican las posiciones angulares en los ejes de *pitch* y *yaw* (variables controladas). Además, la placa Arduino UNO transmitió señales digitales tipo *PWM* de 5 Vcc de amplitud a las entradas de los amplificadores del *driver* L293B, el cual a su vez suministró en las respectivas salidas señales PWM con una amplitud menor a 12 VCC al motor principal y de cola (variables manipuladas). El voltaje de alimentación de los motores fue proporcionado por un adaptador eléctrico. El diagrama de bloques del sistema de adquisición de datos y control (SAD&C) se muestra en la Figura 1.



Figura 1. Prototipo de H2-GdL con ejes de rotación y diagrama de bloques del SAD&C

2.2. Identificación del Sistema

El modelo lineal del H2-GdL se obtuvo con la ayuda del *toolbox* de identificación de sistemas de MATLAB, utilizando un enfoque de identificación en lazo abierto con señales de excitación tipo *PWM* (*Pulse-Width Modulation*), una cantidad de 60 muestras y un período de muestreo de 0,1 seg, el cual fue seleccionado por medio del análisis del espectro de frecuencia de las señales medidas y la respuesta dinámica en lazo cerrado, cumpliendo con el teorema de Nyquist y Shannon. La primera mitad de los datos

registrados se utilizaron en la identificación y la otra mitad en la validación de los modelos. La Figura 2(a) muestra el diagrama de bloques con los mejores modelos paramétricos obtenidos, los cuales fueron seleccionados tomando en cuenta el menor error de predicción final (*FPE*), el menor error medio cuadrático (*MSE*), el menor número de parámetros posibles, la estabilidad absoluta y relativa, la autocorrelación de los residuos de las salidas, la correlación cruzada entre las entradas y los residuos de las salidas, que las funciones de transferencia fueran propias, el mejor ajuste de los datos de estimación y validación.

2.3. Evaluación del Acoplamiento

Partiendo del modelo obtenido, se evaluó la interacción entre las variables de entrada y salida del sistema, observando un mayor acoplamiento del voltaje del motor de pitch sobre el ángulo de yaw, que del voltaje del motor de yaw sobre el ángulo de pitch. Por lo tanto, para reducir dicha interacción en estado estacionario o en bajas frecuencias se obtuvo el desacoplador estático mostrado en la Figura 2(b).

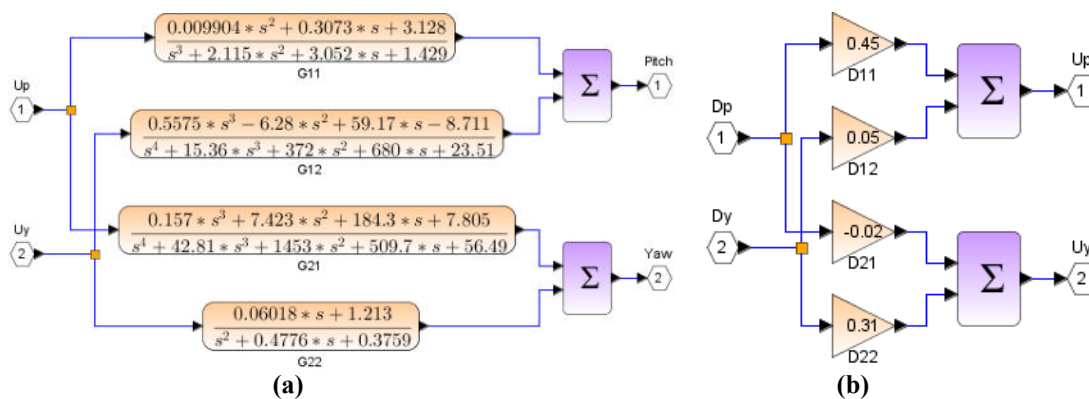


Figura 2. Diagramas de bloques del modelo lineal del H2-GdL (a) y de la red de desacoplo estático (b).

2.4. Sintonización de los Controladores PID de 2-GdL

Con el propósito de garantizar un buen compromiso entre el seguimiento del punto de consigna (servo control) y el rechazo de perturbaciones externas (control regulatorio), reduciendo a su vez el efecto del ruido en la señal de control, se implementó la forma ideal del controlador PID de 2-GdL con filtrado de la señal medida (1) dada por Alfaro y Vilanova [1].

$$U(s) = K_p \cdot \left[\left(\beta + \frac{1}{T_i \cdot s} \right) \cdot R(s) - \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot s} + T_d \cdot s \right) \cdot \left(\frac{1}{T_f \cdot s + 1} \right) \cdot Y(s) \right] \quad (1)$$

donde $U(s)$ es la señal de salida del controlador, $Y(s)$ es la variable controlada del proceso, K_p es la ganancia proporcional, T_i es la constante de tiempo integral, T_d es la constante de tiempo derivativa, β es la ponderación del punto de consigna (*set-point*), T_f es la constante de tiempo del filtro de primer orden de la señal medida, que viene dada por $T_f = T_d / N$, donde N es llamada ganancia derivativa.

La sintonización de los controladores primero se realizó utilizando la herramienta *PID Tuner* de MATLAB bajo un enfoque de diseño equilibrado, y luego a través de los algoritmos evolutivos *PSO* y *CS*, los cuales fueron implementados con el *software* Scilab / Xcos en un computador con sistema operativo Windows 7 de 64 bits. Para *PSO* se empleó el algoritmo desarrollado por Parraguez [2], considerando una topología de vecindario del mejor global, un control de inercia constante, un factor de forma normal, un peso de inercia $w = 0,729$, una constante cognitiva $c_1 = 1,49445$ y una constante social $c_2 = 1,49445$. Con respecto a *CS*,

se aplicó el algoritmo elaborado por Yang [3] con una probabilidad de descubrimiento de huevos ajenos $p_a = 0,25$. Ambos algoritmos contemplaron una dimensión del problema de 8 variables $[K_{p(\theta)}, T_{i(\theta)}, T_{d(\theta)}, \beta_\theta, K_{p(\psi)}, T_{i(\psi)}, T_{d(\psi)}, \beta_\psi]$ con $T_f = T_d / 5$, un tamaño de la población o número de nidos de 10 soluciones y un número máximo de 100 iteraciones. El dominio de búsqueda fue acotado entre un límite inferior de $[0.1, 0.1, 0, 0, 0.1, 0.1, 0, 0]$ y un límite superior de $[15, 5, 5, 1, 15, 5, 5, 1]$. La función multiobjetivo consistió en la minimización de los índices de desempeño de la integral del valor absoluto del error (IAE) y la integral del valor absoluto del esfuerzo de control (IAU). La función de costo total (J_T) fue:

$$J_\theta = p_{e(\theta)} \cdot J_{IAE(\theta)} + p_{u(\theta)} \cdot J_{IAU(\theta)} \quad (2)$$

$$J_\psi = p_{e(\psi)} \cdot J_{IAE(\psi)} + p_{u(\psi)} \cdot J_{IAU(\psi)} \quad (3)$$

$$J_T = J_\theta + J_\psi \quad (4)$$

donde p_e y p_u son los pesos que permiten dar mayor o menor relevancia a los términos de la función multiobjetivo, dependiendo de los requerimientos establecidos. Los índices IAE e IAU vienen dados por:

$$J_{IAE} = \int_0^\infty |e(t)| \cdot dt \quad y \quad J_{IAU} = \int_0^\infty |u(t)| \cdot dt \quad (5)$$

En la optimización se consideraron pesos iguales a la unidad. La evaluación de la función multiobjetivo fue realizada mediante simulación por lotes de un diagrama de bloques elaborado en el entorno Xcos de Scilab, el cual contempló señales de referencia y perturbaciones externas tipo escalón unitario.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las Figuras 3 y 4 se muestran las respuestas dinámicas y las señales de control obtenidas aplicando los controladores PID-2GdL ideales con filtro sintonizados con *PID Tuner*, *PSO* y *CS*. En el cuadro de leyendas de las variables controladas se indican los parámetros de los controladores $[K_p, T_i, T_d, T_f, \beta]$ siendo $T_f = T_d / 5$, junto con los valores característicos de la respuesta dinámica para el seguimiento de la referencia: el sobreimpulso máximo (M_p), el tiempo de asentamiento (t_s) para el criterio del 2% de la salida en estado estacionario y el tiempo de subida (t_r) para una respuesta subamortiguada (10-90%).

En la Tabla 1 se observan los valores de costo del error y del esfuerzo de control obtenidos para cada grado de libertad utilizando *PID Tuner* y los algoritmos evolutivos (*PSO* / *CS*), también se indica la iteración donde se encontró el mejor costo total y el tiempo de ejecución para el número máximo de iteraciones.

Tabla 1. Resultados obtenidos con *PID Tuner* y los algoritmos evolutivos.

Método	$J_{IAE(\theta)}$	$J_{IAU(\theta)}$	$J_{IAE(\psi)}$	$J_{IAU(\psi)}$	Mejor costo total	Iteración del mejor costo total	Tiempo de ejecución [min]
<i>PID Tuner</i>	5,686	29,407	7,204	18,277	60,575	N/A	N/A
<i>PSO</i>	2,478	29,562	1,796	17,136	50,973	87	36,077
<i>CS</i>	2,445	29,615	1,558	17,343	50,961	89	89,898

Los controladores PID-2GdL sintonizados con *PID Tuner* bajo el enfoque de diseño equilibrado produjeron el menor sobrepaso para el seguimiento de la referencia, pero grandes sobreimpulsos ante la presencia de perturbaciones de carga, lo cual se evidencia en las respuestas dinámicas de la Figura 3. Además, según la Tabla 1 se puede inferir que los controladores obtenidos con esta herramienta presentaron mayor error y acciones de control menos bruscas como se muestra en la Figura 4. *PSO* demostró ser más rápido en culminar el total de las iteraciones con respecto a *CS* de acuerdo a la Tabla 1; sin embargo, ambos convergieron a valores

óptimos con costos totales (J) muy cercanos y las respuestas transitorias presentaron el menor error (IAE) y un esfuerzo de control (IAU) moderado. Los controladores con mayor robustez fueron los obtenidos mediante el algoritmo de *PID-Tuner* para el ángulo de *pitch* y *PSO* para el ángulo de *yaw*. Las salidas de los controladores mostradas en la Figura 4 revelan que los controladores sintonizados con los algoritmos evolutivos son más agresivos, aunque presentan un buen compromiso entre el seguimiento de la referencia y el rechazo de perturbaciones de carga. El espacio de búsqueda establecido para los algoritmos evolutivos permite obtener dos esquemas adicionales de control: PI-D con filtrado de la señal medida para $\beta = 1$ e I-PD con filtrado de la señal medida para $\beta = 0$.

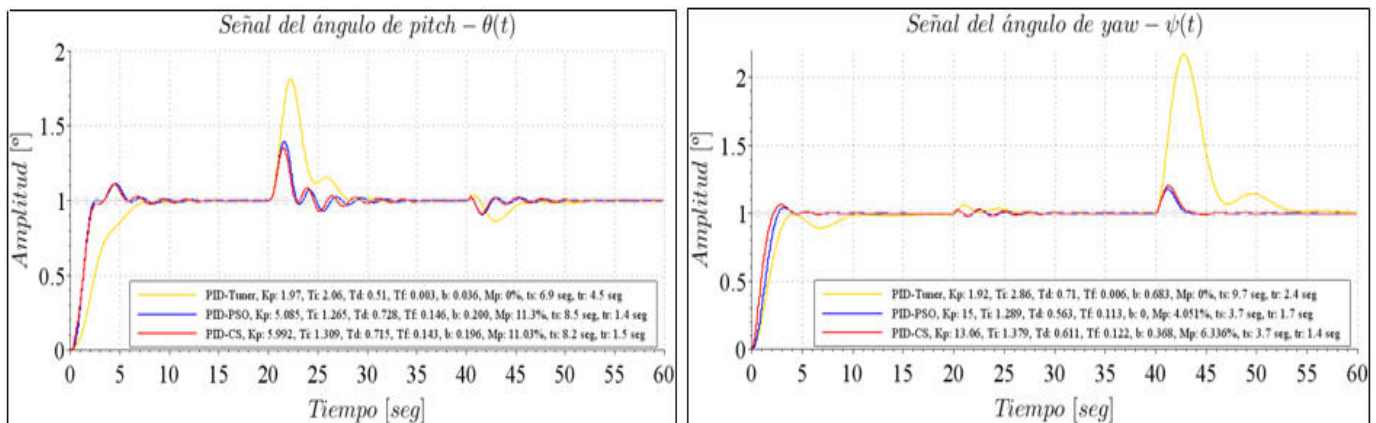


Figura 3. Respuestas dinámicas de $\theta(t)$ (arriba) y $\psi(t)$ (abajo) obtenidas con los controladores sintonizados con *PID Tuner*, *PSO* y *CS*.

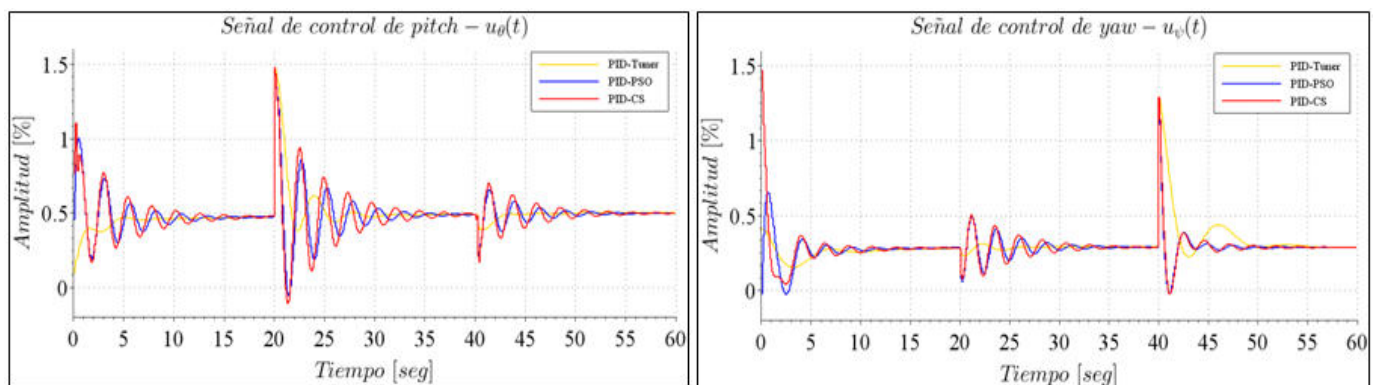


Figura 4. Señales de control $u_{\theta}(t)$ (arriba) y $u_{\psi}(t)$ (abajo) obtenidas con los controladores sintonizados con *PID Tuner*, *PSO* y *CS*.

4. CONCLUSIONES

La identificación del H2-GdL con el *toolbox* de MATLAB arrojó modelos moderadamente precisos que contemplaron parte de la dinámica de la planta real utilizando señales de excitación tipo pulso de amplitud y período constante. La aplicación del desacoplador estático sobre el prototipo redujo la interacción entre las variables en régimen estacionario con un consecuente aumento de la estabilidad del sistema. El mejor desempeño durante las pruebas funcionales de la plataforma experimental se obtuvo con los controladores PID-2GdL sintonizados con los algoritmos evolutivos tanto para el seguimiento de la referencia como para el

rechazo de perturbaciones de carga, mientras que los controladores obtenidos con *PID Tuner* arrojaron tiempos de asentamiento muy grandes. La entonación de los controladores PID-2GdL mediante algoritmos evolutivos (*PSO* / *CS*) y simulación por lotes utilizando las herramientas Scilab / Xcos representa una excelente estrategia para sintonizar con éxito sistemas de control *MIMO* con fuertes interacciones.

5. REFERENCIAS

- [1]. Alfaro V, Vilanova R. "Conversion formulae and performance capabilities of two-degree-of-freedom PID control algorithms", in 17th *IEEE International Conference on Emerging Technologies & Factory Automation, ETFA 2012*, September 17-21, 2012, Kraków, Polonia.
- [2]. Parraguez, L. "Control predictivo basado en modelos mediante algoritmos evolutivos paralelos", Trabajo de Grado de Maestría, Universidad de Oriente, Barcelona, Venezuela, 2014.
- [3]. Yang, X. "Cuckoo search (CS) algorithm. Version 1.3.0.0", *The MathWorks, Inc.*, 2013. [Online]. Available: <https://la.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/29809-cuckoo-search-cs-algorithm>.