

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROLADOR DIFUSO, SINTONIZADO CON ALGORITMOS GENETICOS PARA EL SISTEMA 3DCRANE

Victor Verdezoto

vicpat5@hotmail.com

Departamento de Eléctrica y Electrónica
ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

RESUMEN: El presente trabajo aborda el diseño e implementación de un control difuso y una sintonización mediante algoritmos genéticos de un controlador PID para el modulo de grúa de tres dimensiones, denominado 3DCRANE, como una contribución en la línea de investigación de Automática y Robótica.

El sistema 3DCRANE es una plataforma, grúa, con libertad de movimiento a lo largo de los ejes X, Y y Z. La plataforma traslada la carga útil en cada cambio de posición de acuerdo a la necesidad del usuario.

Se diseño un sistema de control difuso que permite controlar el cambio de posición de la plataforma y minimizar el balanceo de la carga útil que se produce por dicho cambio de posición.

En una segunda instancia se diseño un algoritmo genético que permite determinar los valores de los parámetros de los controladores PID que optimizan el funcionamiento del sistema al realizar el cambio de posición.

1. INTRODUCCIÓN

La Lógica Difusa o Lógica Fuzzy es una forma de razonamiento lógico que permite incorporar en los sistemas de automatización esquemas de razonamiento típicamente humanos.

En cierto sentido, la lógica fuzzy se parece a la manera en que los humanos toman decisiones y tienen la habilidad de trabajar con datos aproximados o parciales y poder encontrar soluciones precisas.

La lógica difusa nos permite tratar información imprecisa en términos de conjuntos borrosos a partir de los cuales se obtendrán un conjunto de reglas que nos permiten determinar que acción se debe tomar.

Las partes que conforman un controlador difuso se muestran en la figura 1.

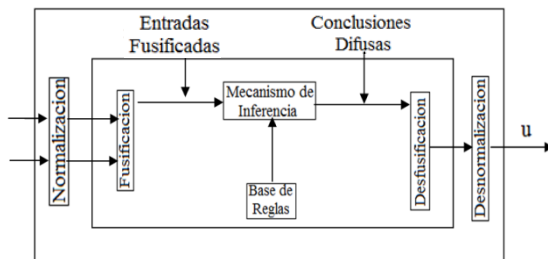


Figura 1. Etapas controlador difuso

- Normalización: entrada de datos físicos al controlador.
- Fusificación: conversión de los datos físicos en variables difusas mediante las funciones de pertenencia. Asignación de los grados de pertenencia.
- Mecanismo de Inferencia: aplicación de las reglas (reglas lingüísticas) para obtener las variables difusas manipuladas.
- Desfusificación: conversión de las variables difusas de salida en un valor concreto de la variable real de salida.
- Desnormalización: aplicación de la variable real de salida como acción de control.

El control difuso desarrollado nos permitió controlar el cambio de posición de la plataforma, con la carga útil, hacia la posición deseada por el usuario dentro de los límites mecánicos, y minimizando el balanceo de la carga en dicho cambio de posición.

Los Algoritmos Genéticos se constituyen en una técnica robusta de búsqueda, y pueden tratar con éxito una gran variedad de problemas de diferentes áreas, incluyendo aquellos en los que otros métodos encuentran dificultades.

Se usó el modelo de un algoritmo genético canónico para la elaboración del código que se implementó en Matlab, que sigue la estructura que se presenta en la figura 2.

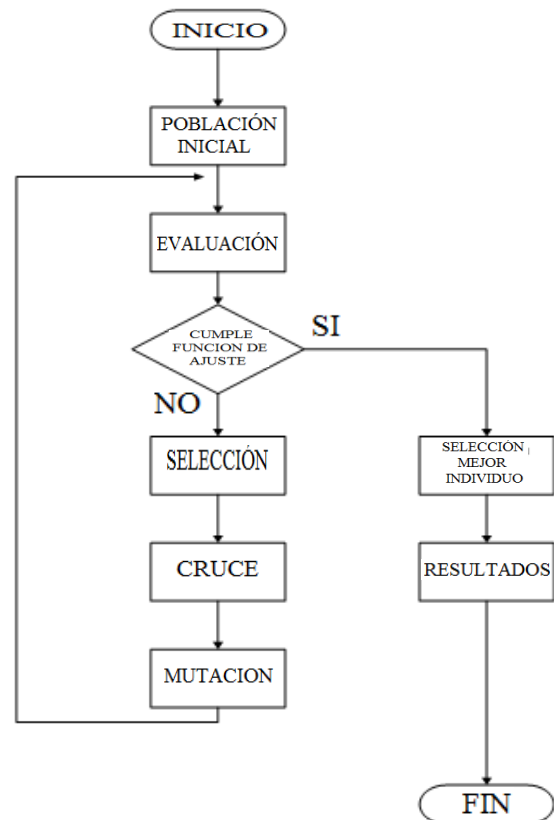


Figura 2. Algoritmo Genético Canónico

Durante la ejecución del algoritmo diseñado, los padres son seleccionados para la reproducción, a continuación dichos padres seleccionados se cruzan, se analiza por pares la posibilidad de cruce, formando nuevos individuos, sobre los cuales actúa el operador de mutación de forma individual. El resultado de este proceso es un conjunto de individuos (posibles soluciones al problema), los cuales en la evolución del Algoritmo Genético forman parte de la siguiente población. El algoritmo genético diseñado seguirá realizando su proceso recurrentemente hasta que uno de los individuos de la población logre su máximo desempeño; el criterio de finalización aplicado se basa en el acondicionamiento del parámetro de adaptabilidad denominado `error_costo`.

El Algoritmo Genético realizado nos permitió obtener los parámetros de los controladores PID que minimizan el error de estado estacionario y el error transitorio que se produce en el cambio de posición del sistema y de manera paralela minimiza el balanceo de la carga útil.

2. MODELO MATEMÁTICO

El sistema de coordenadas esféricas es el elegido para este modelamiento debido a su versatilidad al momento de tratar movimientos de rotación dinámica.

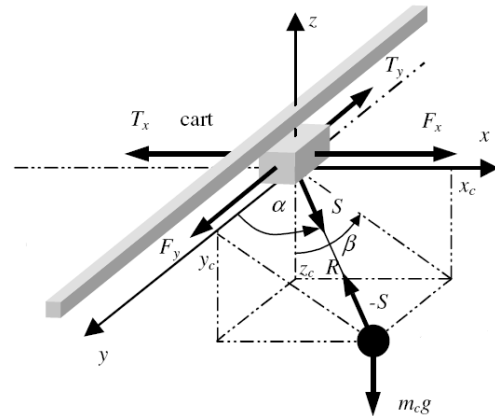


Figura 3. Diagrama esquemático de 3DCRANE

De este diagrama se definen las siguientes variables medidas:

- \mathbf{x}_w : distancia del ferrocarril con el carro desde el centro de la estructura.
- \mathbf{y}_w : distancia del carro desde el centro del riel.
- \mathbf{R} : longitud de la línea de elevación.
- α : ángulo formado entre el eje y y la línea de elevación.
- β : ángulo formado entre la dirección negativa del eje z y la proyección de la línea de elevación en el plano xz.

Se denotan las siguientes variables:

- \mathbf{m}_c : masa de la carga
- \mathbf{m}_w : masa del carro.
- \mathbf{m}_s : masa del riel (donde se mueve el carro).
- \mathbf{x}_c : coordenada en el plano x de la carga.
- \mathbf{y}_c : coordenada en el plano y de la carga.
- \mathbf{z}_c : coordenada en el plano z de la carga.
- \mathbf{S} : fuerza de reacción en la línea de elevación que actúa sobre el carro

- F_x : fuerza que actúa sobre el riel con el carro.
- F_y : fuerza que actúa sobre el carro a lo largo del riel.
- F_R : fuerza que controla la longitud de la línea de elevación.
- T_x : fuerza de fricción en x.
- T_y : fuerza de fricción en eje y.
- T_R : fuerza de fricción en línea de elevación.

A partir de esto se establecen las siguientes relaciones básicas que son utilizadas en el modelamiento:

$$\mu_1 = \frac{m_c}{m_w}; \quad \mu_2 = \frac{m_c}{m_w + m_s}$$

$$u_1 = \frac{F_y}{m_w}; \quad u_2 = \frac{F_x}{m_w + m_c}; \quad u_3 = \frac{F_R}{m_c}$$

$$T_1 = \frac{T_y}{m_w}; \quad T_2 = \frac{T_x}{m_w + m_c}; \quad T_3 = \frac{T_R}{m_c}$$

$$N_1 = u_1 - T_1; \quad N_2 = u_2 - T_2$$

$$N_3 = u_3 - T_3; \quad s = \frac{s}{m_c}$$

La posición de la carga es descrita por las siguientes ecuaciones:

$$x_c = x_w + R \sin \alpha \sin \beta$$

$$y_c = y_w + R \cos \alpha$$

$$z_c = -R \sin \alpha \cos \beta$$

La dinámica de la grúa está descrita por las siguientes ecuaciones:

$$m_c \ddot{x}_c = -S_x$$

$$m_c \ddot{y}_c = -S_y$$

$$m_c \ddot{z}_c = -S_z - m_c g$$

$$(m_w + m_s) \ddot{x}_w = F_x - T_x + S_x$$

$$m_w \ddot{y}_w = F_y - T_y + S_y$$

Cuando S_x , S_y y S_z son componentes del vector S (fuerza de reacción en la línea de elevación).

$$S_x = S \sin \alpha \sin \beta$$

$$S_y = S \cos \alpha$$

$$S_z = -S \sin \alpha \cos \beta$$

Se asume que la línea de elevación siempre va a estar estirada, de lo que se deduce la siguiente ecuación:

$$S_x(x_c - x_w) + S_y(y_c - y_w) + S_z z_c > 0$$

En el caso de que se levante o se baje la carga con el uso de la fuerza de control F_R , S será reemplazado por:

$$S = F_R - T_R$$

Cuando se tiene tres fuerzas de control, asumiendo que la desviación de la carga en el eje z es pequeña tenemos las siguientes ecuaciones:

$$\cos \alpha = \cos \left(\frac{\pi}{2} + \Delta \alpha \right) \cong -\Delta \alpha$$

$$\sin \alpha = \sin \left(\frac{\pi}{2} + \Delta \alpha \right) \cong 1$$

$$\cos \beta \cong 1$$

$$\sin \beta \cong \Delta \beta$$

De donde la fuerza de reacción en la línea de elevación queda dada por:

$$S_x = S(1)(\Delta \beta) = S \Delta \beta$$

$$S_y = S(-\Delta \alpha) = -S \Delta \alpha$$

$$S_z = -S(1)(1) = -S$$

Las diferentes simplificaciones nos permiten separar parcialmente las ecuaciones de la plataforma. Las ecuaciones que describen el movimiento a lo largo del eje x son independientes de las ecuaciones que describen el movimiento en a lo largo del eje y . De tal manera que el sistema puede ser tratado como dos subsistemas independientes.

3. CASOS DE ESTUDIO CONTROL DIFUSO.

En el presente proyecto los controladores difusos están caracterizados por dos entradas y una salida.

El controlador difuso de posición tiene como entradas el error de posición y la integral del error de posición. El controlador difuso de balanceo tiene como entradas la medida del ángulo de oscilación y la integral del ángulo de oscilación.

La base de reglas utilizada en el mecanismo de inferencia de cada controlador cuenta con 25 reglas respectivamente.

Las salidas obtenidas, de los controladores implementados, se suman entre sí para obtener una única señal de control que permite optimizar el funcionamiento del sistema total.

3.1 Caso 1: Control Fuzzy eje X

Elementos del Controlador Fuzzy de Posición.

Definiciones variables de entrada:

- Integral del error de posición.
- Error de posición.

Definición variable de salida:

- Control del sistema

Definición de la función de membresía integral del error de posición.

Integral del error de posición	Rango	Tipo Función
Muy Negativo	[-1e+004 -5 -2.5]	Trimf
Negativo	[-5 -2.5 0]	Trimf
Cero	[-2.5 0 2.502]	Trimf
Positivo	[0 2.502 5.006]	Trimf
Muy Positivo	[2.502 5.006 2500]	Trimf

Tabla 1. Rangos entrada integral error de posición

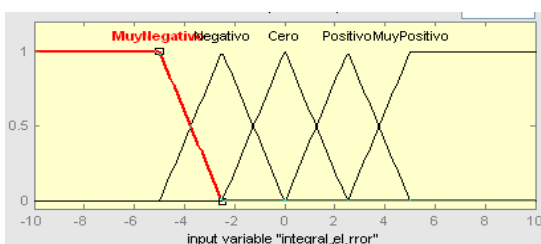


Figura 4. Adjetivos entrada integral del error de posición

Definición de función de membresía Error de posición.

Error de posición	Rango	Tipo Función
Lejos Izquierda	[-100 -0.0375 -0.01562]	Trimf
Cerca Izquierda	[-0.04063 -0.01562 0]	trimf
Punto	[-0.01562 0 0.01562]	trimf
Cerca Derecha	[0 0.01562 0.04063]	trimf
Lejos Derecha	[0.01562 0.04063 625]	trimf

Tabla 2. Rangos entrada error de posición

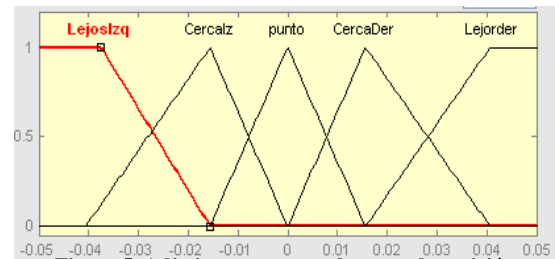


Figura 5. Adjetivos para entrada error de posición

Definición de función de membresía Control del Sistema.

Control del Sistema	Rango	Tipo Función
Reducir Mucho	[-50 -0.6 -0.3]	Trimf
Reducir	[[-0.6 -0.3 0]	trimf
Mantener	[-0.3 0 0.3]	trimf
Aumentar	[0 0.3 0.6]	trimf
Aumentar Mucho	[0.3 0.6 50]	trimf

Tabla 3. Rangos salida control del sistema

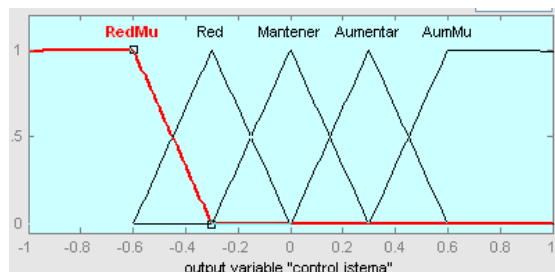


Figura 6. Adjetivos para salida Control Sistema

Se establece un cuadro de doble entrada que indica la acción a tomar en función de las variables de entrada.

	MuyNegativo	Negativo	Cero	Positivo	MuyPositivo
LejosIzq	AumMu	AumMu	AumMu	AumMu	Aumentar
CercaIzq	AumMu	AumMu	Aumentar	Dejar	Red
Punto	AumMu	Aumentar	Dejar	Red	RedMu
CercaDer	Aumentar	Dejar	Red	RedMu	RedMu
LejosDer	Red	RedMu	RedMu	RedMu	RedMu

Tabla 4. Reglas para señal de control posición

De la interpretación de este cuadro de doble entrada se establece que son 25 las reglas a utilizar que determinarán el comportamiento del sistema.

Elementos del Controlador Fuzzy de Balanceo:

Definiciones variables de entrada

- Error ángulo.
- Integral error ángulo.

Definición variable de salida

- Control ángulo

Definición de la función de membresía Error ángulo.

Error Angulo	Rango	Tipo Función
Muy Negativo	[-100 -0.05 -0.025]	Trimf
Negativo	[-0.05 -0.025 0]	trimf
Cero	[-0.025 0 0.02502]	trimf
Positivo	[0 0.02502 0.05006]	trimf
Muy Positivo	[0.02502 0.05006 25]	trimf

Tabla 5. Rangos entrada error ángulo.

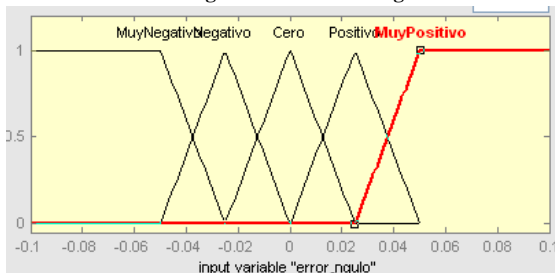


Figura 7. Adjetivos para la entrada Error de Angulo

Definición de función de membresía Integral Error de ángulo

Integral Error de Angulo	Rango	Tipo Función
Gran Control Izq. (G.C.Izq)	[-100 -0.0375 -0.01562]	trimf
Control Izq. (C.Izq)	[-0.04063 -0.01562 0]	trimf
Equilibrio	[-0.01562 0 0.01562]	trimf
Control Der. (C.Der)	[0 0.01562 0.04063]	trimf
Gran Control Der. (G.C.Der)	[0.01562 0.04063 625]	trimf

Tabla 6. Rangos entrada integral error de ángulo.

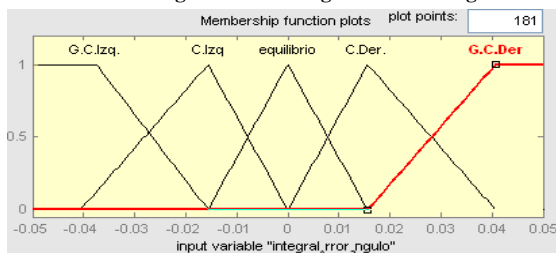


Figura 8. Adjetivos entrada integral error de ángulo.

Definición de función de membresía Control ángulo

Control Angulo	Rango	Tipo Función
Reducir Mucho (RedMu)	[-20 -0.24 -0.12]	trimf
Reducir	[-0.24 -0.12 0]	trimf
Mantener	[-0.12 0 0.12]	trimf
Aumentar	[0 0.12 0.24]	trimf
Aumentar Mucho (AumMu)	[0.12 0.24 20]	trimf

Tabla 7. Rangos salida control ángulo.

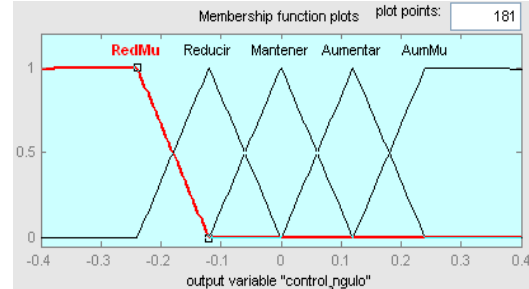


Figura 9. Adjetivos para salida Control ángulo

Se establece un cuadro de doble entrada que indica la acción a tomar en función de las variables de entrada.

	MuyNegativo	Negativo	Cero	Positivo	MuyPositivo
G.C.Izq	RedMu	RedMu	RedMu	RedMu	Reducir
C.Izq	RedMu	Reducir	Reducir	Mantener	Aumentar
Equilibrio	RedMu	Reducir	Mantener	Aumentar	AumMu
C.Der	Reducir	Mantener	Aumentar	AumMu	AumMu
G.C.Der	Aumentar	AumMu	AumMu	AumMu	AumMu

Tabla 8. Reglas para señal de control balanceo

De la interpretación de este cuadro de doble entrada se establece que son 25 las reglas a utilizar que determinarán el comportamiento del sistema.

El esquema de control de posición de la plataforma en el eje x sin control de balanceo se muestra en la Figura 10.

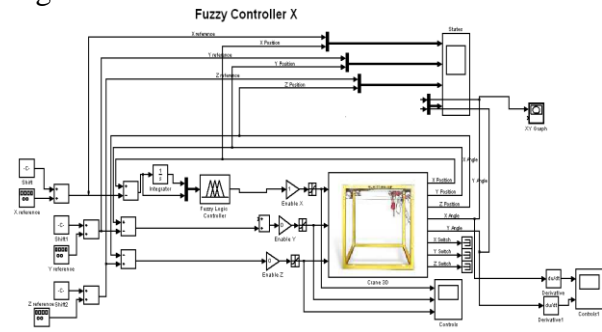


Figura 10. Esquema control posición eje X.

Señales obtenidas en la implementación se presentan en la Figura 11.

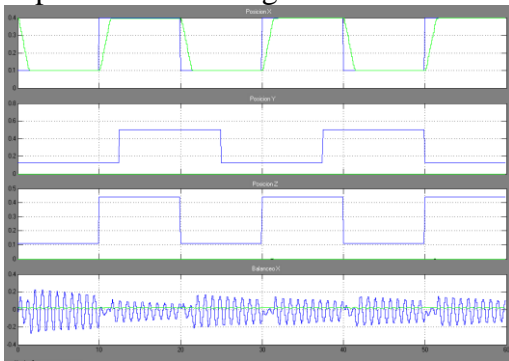


Figura 11. Señales implementación eje X sin control balanceo

El esquema para el control de posición y balanceo de la plataforma en el eje X se presenta en la Figura 12.

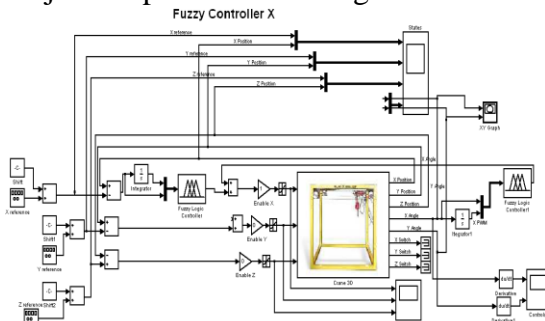


Figura 12. Esquema control posición y balanceo eje X. Señales obtenidas en la implementación se presentan en la Figura 13.

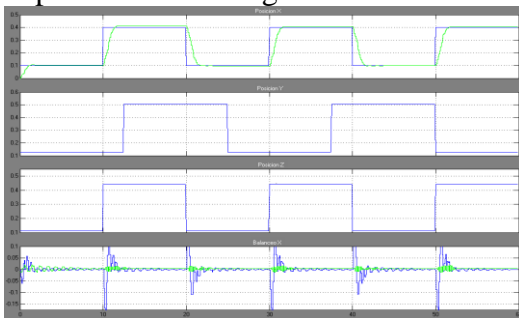


Figura 13. Señales implementación eje X con control balanceo

Análisis Resultados.

	Sin control de balanceo	Con control de balanceo
Error estado estacionario	Mínimo	Mínimo, pero mayor en comparación al caso sin control de balanceo.
Error ángulo	[-0.4 0.4] rad	[-0.2 0.2] rad
Oscilaciones de ángulo	Constantes durante todo el periodo de simulación entre los valores de -0.2 y 0.2 [rad]	Mínimas, mayor fluctuación se produce en el cambio de posición y oscila entre valores de 0.1 y -0.1 [rad]

Tabla 9. Resultados eje X

3.2 Caso 2: Control Fuzzy eje Y

Se utilizaron los controladores fuzzy diseñados en el Caso de estudio 1.

El esquema de control de posición de la plataforma en el eje Y sin control de balanceo se presenta en la Figura 14.

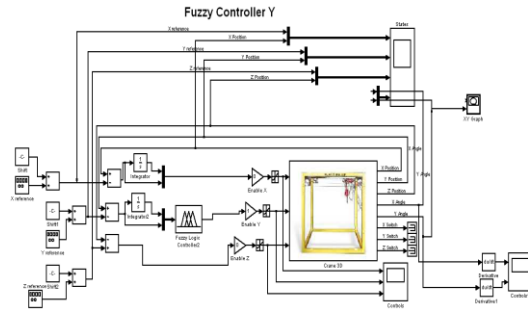


Figura 14. Esquema control posición eje Y. Señales obtenidas en la implementación se presentan en la Figura 15.

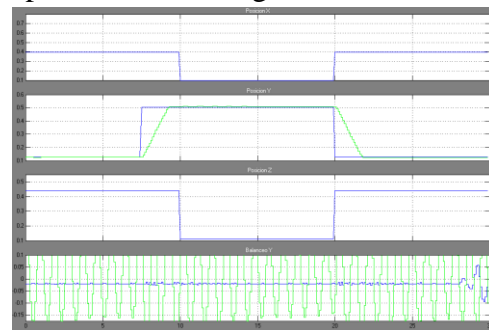


Figura 15. Señales implementación eje Y sin control balanceo

El esquema para el control de posición y balanceo de la plataforma en el eje Y se presenta en la Figura 16.

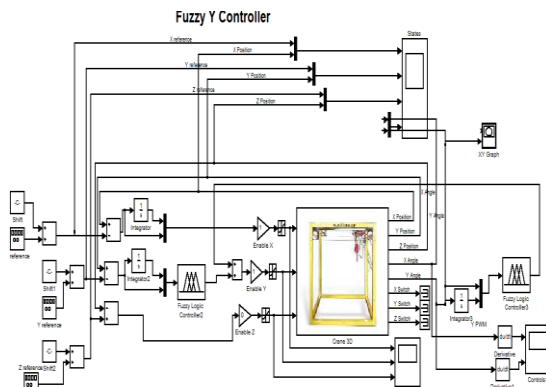


Figura 16. Esquema control posición y balanceo eje Y.

Señales obtenidas en la implementación se presentan en la Figura 17.

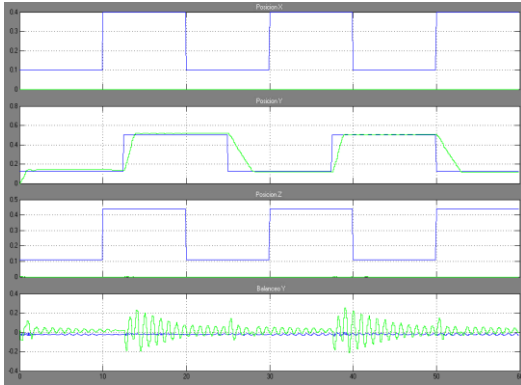


Figura 17. Señales implementación eje Y con control balanceo

Análisis Resultados.

	Sin control de balanceo	Con control de balanceo
Error estado estacionario	Mínimo	Mínimo, pero mayor en comparación al caso sin control de balanceo.
Error ángulo	[-0.35 0.35] rad	[-0.25 0.25] rad
Oscilaciones de ángulo	Constantes durante todo el periodo de simulación entre los valores de -0.35 y 0.35[rad].	Mínimas, mayor fluctuación entre 0.25 y -0.25 [rad].

Tabla 10. Resultados eje Y

3.3 Caso 3: Control Fuzzy en ejes X y Y con control de balanceo en un solo eje.

Se utilizaron los controladores fuzzy diseñados en el Caso de estudio 1.

El esquema para el control de posición de la plataforma en el eje X y Y, simultáneamente, con control de balanceo únicamente en el eje X se presenta en la Figura 18.

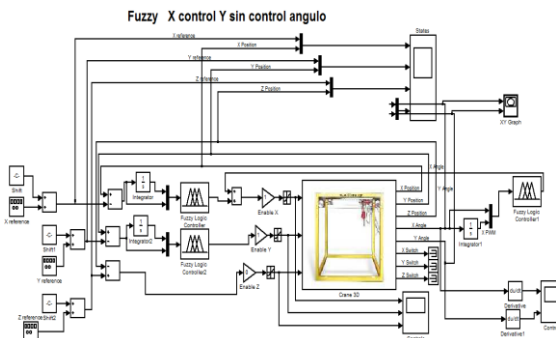


Figura 18. Esquema control posición X y Y con control de balanceo en X.

Señales obtenidas en la implementación se presentan en la Figura 19.

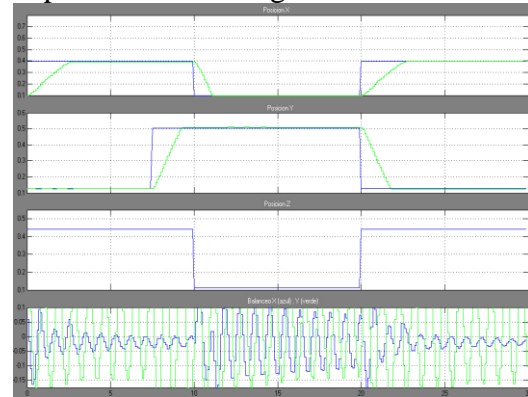


Figura 19. Señales implementación eje X y Y con control de balanceo en eje X.

El esquema para el control de posición de la plataforma en el eje X y Y, simultáneamente, con control de balanceo únicamente en el eje Y se presenta en la Figura 20.

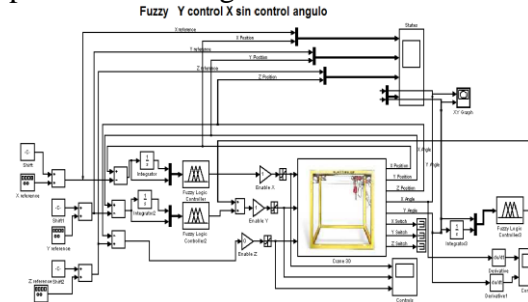


Figura 20. Esquema control posición X y Y con control de balanceo en Y.

Señales obtenidas en la implementación se presentan en la Figura 21.

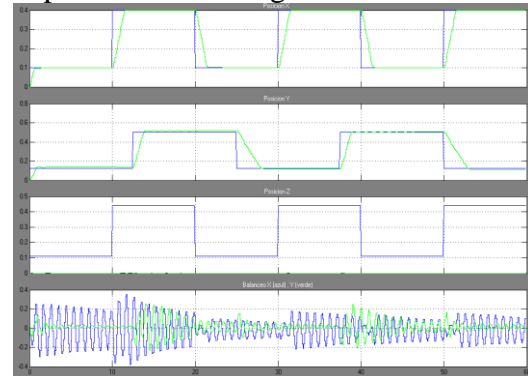


Figura 21. Señales implementación eje X y Y con control de balanceo en eje Y.

Análisis Resultados.

	Sin control de balanceo en Y	Sin control de balanceo en X
Error estado estacionario	Mínimo	Mínimo, pero mayor en eje Y en comparación al caso sin control de balanceo en Y.
Error ángulo (2 ejes)	Marcada inestabilidad en el eje Y sin aproximación a 0.	Marcada inestabilidad en el eje X sin aproximación a 0.
Oscilaciones de ángulo	Constantes en eje Y. En eje X son mínimas, con picos más altos cuando se da el cambio de posición de la plataforma en el eje X.	Mínimas, picos mayores presentados en eje X. Mientras se controla el eje Y, paulatinamente van disminuyendo las variaciones presentadas en el eje X.

Tabla 11. Resultados control de posición X y Y con control de balanceo en un solo eje.

3.4 Caso 4: Control Fuzzy en ejes X y Y con control de balanceo.

Se utilizaron los controladores fuzzy diseñados en el Caso de estudio 1.

El esquema para el control de posición de la plataforma en el eje X y Y, simultáneamente, sin control de balanceo se presenta en la Figura 22.

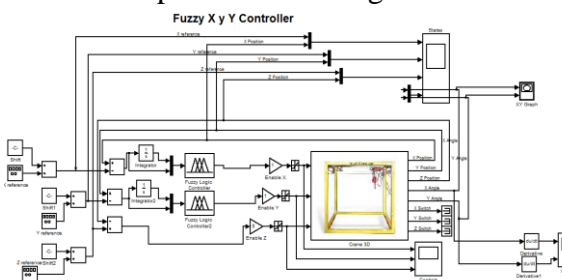


Figura 22. Esquema control posición X y Y sin control de balanceo.

Señales obtenidas en la implementación se presentan en la Figura 23.

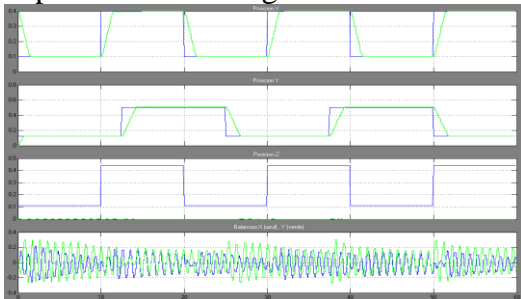


Figura 23. Señales implementación eje X y Y sin control de balanceo.

El esquema para el control de posición de la plataforma con control de balanceo de la carga útil en los ejes X y Y se presenta en la Figura 24.

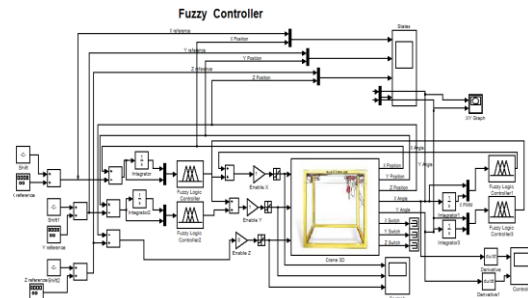


Figura 24. Esquema control posición X y Y con control de balanceo.

Señales obtenidas en la implementación se presentan en la Figura 25.

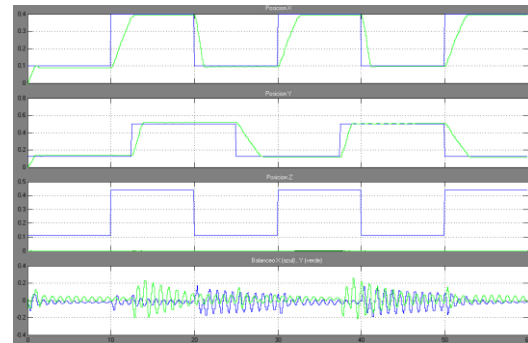


Figura 25. Señales implementación eje X y Y con control de balanceo.

Análisis Resultados.

	Sin control de balanceo	Con control de balanceo
Error estado estacionario	Mínimo	Mínimo, pero mayor en eje Y y en eje X en comparación al caso sin control de balanceo.
Error ángulo (2 ejes)	Gran dispersión de puntos en la grafica resultante. Cambios constantes en el balance de la carga sin tendencia de aproximación a 0.	Baja dispersión de puntos en la grafica resultante. Cambios pequeños en el balance de la carga con tendencia de aproximación a 0.
Oscilaciones de ángulos	Variaciones constantes en los dos ejes durante todo el tiempo de prueba.	Mínimas, las variaciones son mayores en el eje X que en el eje Y.

Tabla 12. Resultados control posición X y Y con control de balanceo.

4. CASOS DE ESTUDIO ALGORITMO GENÉTICO

El algoritmo genético diseñado trabajara sobre una población inicial de 20 individuos que es generada al azar. Cada uno de ellos representa una posible solución en la obtención de los parámetros para los controladores PID.

Una vez generada la población al azar, se representó el problema, mediante una codificación binaria.

La función de ajuste o adaptación al problema, la cual asigna un número real a cada posible solución codificada es $f(e_1^2 + e_2^2)dt$; donde e_1 representa el error de posición de la plataforma y e_2 representa el error del ángulo de oscilación de la carga.

El esquema de evaluación utilizado en el proceso de simulación se presenta en la Figura 26.

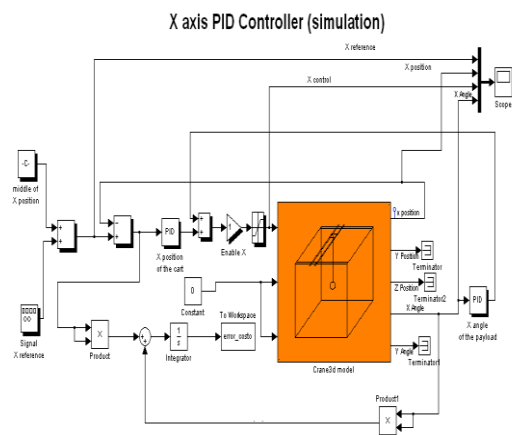


Figura 26. Esquema de evaluación controladores PID

Los resultados obtenidos en la evaluación se presentan en las Tablas 13 y 14.

Sintonización	error_costo	individuo_optimo
1	0.0538	17
2	0.0518	4
3	0.0546	18
4	0.0534	15
5	0.0530	6

Tabla 13. Resultados evaluación controladores PID.

Sintonización	kp	kp1	ki1	numero_generaciones
1	8	6	6	5
2	8	6	50	0
3	13	7	28	7
4	13	4	15	7
5	10	3	39	3

Tabla 14. Resultados evaluación controladores PID.

Cada una de las etapas del algoritmo genético implementado se detalla a continuación:

Población Inicial.

- Se establece el número de individuos de la población
 - 20 es el número establecido en el algoritmo de implementación.
 - pi, es el nombre asignado a la variable a utilizar
- Se establece el número de cromosomas de los individuos.
 - 18 es el número establecido en el algoritmo de implementación.
 - nind, es el nombre asignado a la variable a utilizar
- Se generan los individuos de la población inicial al azar.
- Todos los individuos de la población inicial son guardados en la matriz principal.
 - PI_azar, es el nombre de la matriz utilizada en el algoritmo de implementación

Evaluación.

- Se establece una función de evaluación la cual se encargara de receptor a la población y determinar la adaptabilidad de cada uno de ellos.
 - El nombre de la función a implementar es evaluar_genetico, la cual recibe los siguiente

- parametros (PI_azar, nind, pi)
- Cada individuo es identificado, se lo representa por su equivalente en su forma decimal.
 - Se determina la composición de los individuos
 - Los bits 1-6 representan K_p .
 - Los bits 7-12 representan K_{p1} .
 - Los bits 13-18 representan K_{i1} .
 - Se establece la función de adaptación
 - La función establecida que nos permite determinar el desempeño de los individuos es:

$$error_costo = \int (e_1^2 + e_2^2) dt;$$
 donde e_1 representa el error de posición de la plataforma y e_2 representa el error del ángulo de oscilación de la carga.
 - En la implementación se busca minimizar el error, tanto en la posición final de la plataforma como en las oscilaciones de la carga; por lo que la función de adaptabilidad se establecerá finalmente como: $desempeño = \frac{1}{error_costo}$
 - Se utiliza el comando `sim('Crane3D_modelo_algoritmogenetico',10)` que nos permite determinar el comportamiento de los controladores (PID) durante 10 segundos, tiempo para alcanzar una estabilización relativa, con cada individuo de la población.
 - Se complementa la matriz principal al

agregar dos parámetros, el valor decimal y el valor de desempeño de cada individuo respectivamente.

- Cada individuo de la matriz principal queda conformado de la siguiente manera:

[a a a a a b b b b b b c c c c c D E]

kp kp1 ki d de

d = decodificación; de = desempeño

Selección.

- Se establece que individuos de la población pasan a la siguiente generación.
 - Probabilidad de selección de cada individuo y la probabilidad acumulada.
- Se utilizara el tipo de selección por ruleta.
 - Generación de probabilidades al azar entre 0 y 1, en igual cantidad al número de individuos, que servirán en el proceso de selección para determinar a los más aptos.

Cruce.

- Todo cruce se realiza entre dos individuos, por lo que se analizará por pares la posibilidad de cruce entre los individuos de la población seleccionada.
- Se genera un número al azar entre 0 y 1, el cual determinara si se realiza o no el cruce entre los individuos.
 - En la implementación del algoritmo, el cruce se realizará con un 70 % de probabilidad, es decir siempre y cuando el número generado al azar sea menor a 0.7.

- El punto de cruce es generado al azar mediante el uso de dos funciones.
 - rand: genera un numero aleatorio entre 0 y 1
 - floor: aproxima un número decimal al entero menor más próximo.

Mutación.

- La posibilidad de mutación se analiza individualmente para cada miembro de la población.
- Se genera un número al azar entre 0 y 1, el cual determina si se realiza o no la mutación del individuo.
 - Este es un suceso muy poco probable y en la implementación del algoritmo la mutación se dará con un 3% de probabilidad, es decir siempre y cuando el número generado al azar sea menor a 0.03.
- El punto de mutación es generado al azar mediante el uso de dos funciones.
 - rand: genera un numero aleatorio entre 0 y 1
 - floor: aproxima un número decimal al entero menor más próximo.
 - La mutación se da en un solo bit del individuo, el cual es reemplazado por su complemento.

Criterio Finalización.

- El criterio de finalización aplicado se basa en el acondicionamiento del parámetro de adaptabilidad, de la siguiente manera: $\text{error_costo} \leq 0.056$.

4.1 Caso 5: Sintonización # 1

El esquema de control que nos permite comprobar y verificar el comportamiento de la plataforma en el eje X se presenta en la Figura 27.

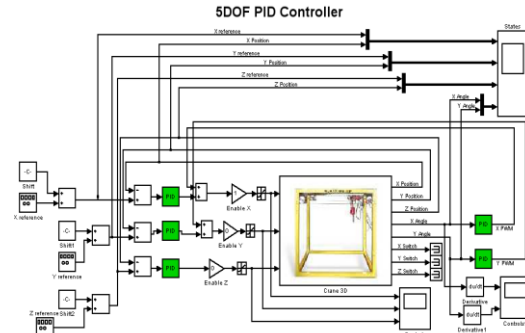


Figura 27. Esquema implementación controladores PID
Los parámetros obtenidos en la evaluación y con los cuales se implementó el funcionamiento del sistema son:

$$k_p=8; \quad k_{p1}=6; \quad k_{i1}=6$$

Señales obtenidas en la implementación se presentan en la Figura 28.

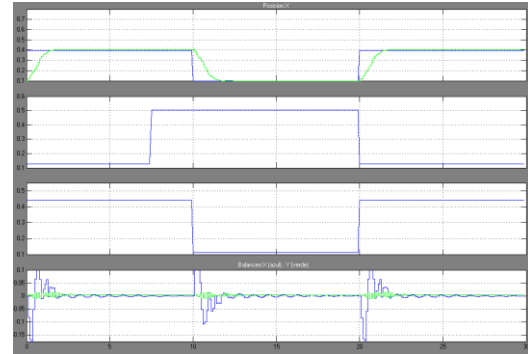


Figura 28. Señales implementación PID's eje X

4.2 Caso 6: Sintonización # 2

Se utilizó el mismo esquema de control diseñado en el caso de estudio 6 y presentado en la Figura 27.

Los parámetros obtenidos en la evaluación y con los cuales se realizó la implementación del sistema son:

$$k_p=8; \quad k_{p1}=6; \quad k_{i1}=50$$

Señales obtenidas en la implementación se presentan en la Figura 29.

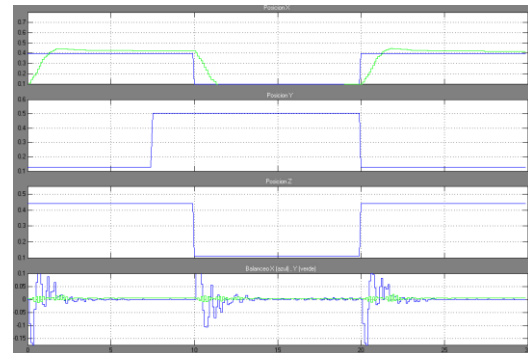


Figura 29. Señales implementación PID's eje X

4.3 Caso 7: Sintonización # 3

Se utilizó el mismo esquema de control diseñado en el caso de estudio 6 y presentado en la Figura 27.

Los parámetros obtenidos en la evaluación y con los cuales se realizó la implementación del sistema son:

$$k_p=13; \quad k_i=7; \quad k_d=28$$

Señales obtenidas en la implementación se presentan en la Figura 30.

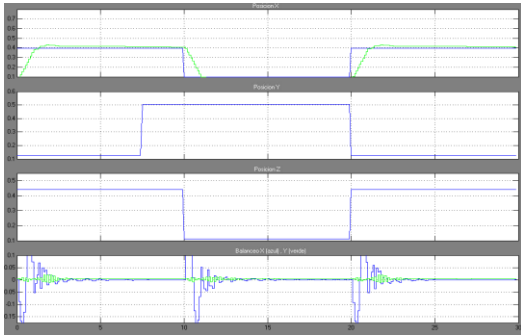


Figura 30. Señales implementación PID's eje X

Análisis Resultados.

La mejor respuesta del sistema se obtuvo con los valores del caso de estudio 5, sin dejar de tener en cuenta que los resultados presentados por los otros dos casos de estudio también son válidos, ya que las diferencias existentes entre las respuestas obtenidas del sistema son mínimas; esto implica el correcto funcionamiento y desempeño del algoritmo genético implementado durante el proceso de evaluación de los diferentes parámetros de los controladores.

5. CONCLUSIONES

- Los controladores fuzzy diseñados e implementados, permiten minimizar el balanceo de la carga útil en los diferentes cambios de posición a los cuales se somete a la plataforma 3DCRANE.

- Para el control fuzzy de posición y balanceo se utilizan como entradas la integral del error de posición y la integral de la oscilación del ángulo, debido a que se conoce que el efecto integral conduce a un error de cero en estado estable.
- Los controladores difusos implementados son una alternativa robusta y flexible de control para el sistema 3DCRANE.
- Los controladores difusos diseñados actúan de manera totalmente predecible y además es posible conocer el estado del sistema en cualquier momento y las razones por las que tomó una determinada decisión debido a las definiciones utilizadas en las bases de conocimiento y en las funciones de membresía.
- La estructura del controlador difuso propuesta en este trabajo permite su fácil adaptación a nuevos problemas ahorrando tiempo de desarrollo en el controlador.
- Un factor fundamental para lograr optimizar los resultados obtenidos durante la evaluación de los controladores PID es el parámetro de adaptabilidad, que se calculó como la integral de la suma de los errores cuadráticos de la posición y la oscilación, ya que la función de desempeño de los individuos depende directamente de este parámetro.
- La diversidad de resultados descubiertos en la sintonización

de los controladores PID, debido a las características que por naturaleza intrínseca presentan los algoritmos genéticos, nos permite inferir la existencia de un conjunto de respuestas con un nivel de validez aceptable

- La selección de la función de adaptación, implementada en el algoritmo genético en la fase de sintonización, demostró ser adecuada por cuanto produjo convergencia hacia las soluciones del sistema.

6. BIBLIOGRAFIA.

- www.inteco.com.pl, 3DCRANE
- FOGEL, David B, *Evolutionary Computation Toward a New Philosophy of Machine Intelligence*, Tercera Edición, Willy-IEEE Press, 23 de diciembre 2005, páginas 59-87.

7. BIOGRAFÍA



Nombres: Victor Patricio

Apellidos: Verdezoto Pereira

E-Mail: vicpat5@hotmail.com