

Laboratorio #2 Control Análogo

Gerónimo Aristizábal * Daniel Jiménez **

* Escuela de Ingeniería de Antioquia, Envigado, Colombia (e-mail: geronimoaristizabal@hotmail.com).

** Escuela de Ingeniería de Antioquia, Envigado, Colombia (e-mail: danieljimenez92@gmail.com).

Resumen: El control de una planta real implica un conocimiento del comportamiento de esta. En base a pruebas de reacción en la planta del generador eléctrico, se obtuvo una función de transferencia y con base a esta se sintonizaron y parametrizaron diferentes controladores para conseguir un buen desempeño.

Keywords: Función de transferencia, Control Análogo, Laboratorio, Planta, Generador, Voltaje, Motor, sintonización, parametrización, controlador PID, Síntesis Directa, Ganancia Última, Integral del Error, Optimización por Integral del Error, ITAE, Asignación de Polos.

1. INTRODUCCIÓN

Controlar una planta es algo esencial para el correcto funcionamiento automático de esta. Los controladores pueden ser elaborados por diferentes métodos y con diferentes estructuras. En particular, los algoritmos de control PID son una fuerte herramienta para lograr establecer el comportamiento de la planta en lazo cerrado al tomar en cuenta los datos presentes y pasados, y prediciendo el comportamiento futuro. Se pueden buscar parámetros establecidos y cumplir con las condiciones de diseño como la rapidez de respuesta y los máximos sobre-impulsos. Para dar valores a los parámetros de un controlador de este tipo, se pueden usar varias herramientas de sintonización y parametrización, se aplicaron algunas de estas a un generador eléctrico para lograr controlar el voltaje generado.

2. PROCEDIMIENTO

2.1 Diseño de circuito y HMI

Para esta entrega, se utilizó un filtro T en búsqueda de mejorar la señal obtenida por adquisición de datos, de tal manera que el controlador no tuviese problemas por los ruidos presentes a la hora de controlar la planta.

El servidor corre en un PCduino3. Programado en Nodejs, en este se realizan todos los cálculos del controlador y es el encargado de enviar la señal de control a la planta, además luego de cada prueba almacena los datos obtenidos en un archivo de texto. Invocando un subproceso de Octave GNU, el servidor puede graficar los datos almacenados en estas bases de datos cuando sean requeridos por el cliente. El cliente es una página de HTML con un canvas y formularios. En esta se tienen las opciones para que el usuario elija como se llevará a cabo el experimento. Las opciones principales son lazo abierto y lazo cerrado, y existe un menú en el que se escoge el método usado para encontrar los parámetros del controlador. Después de seleccionar lo deseado, con un botón de inicio se comienzan a recibir datos del servidor cada segundo y se actualiza la

gráfica. Se puede cambiar el controlador usado en cualquier momento, al igual que el set-point. El hecho de que el HMI se encuentre en un servidor web, permite al usuario controlar la planta desde cualquier lugar del mundo, solo necesitando un dispositivo con conexión a internet (como un celular).

El código fuente del software usado puede ser encontrado en el repositorio: <https://github.com/leyenda/ControlLab>

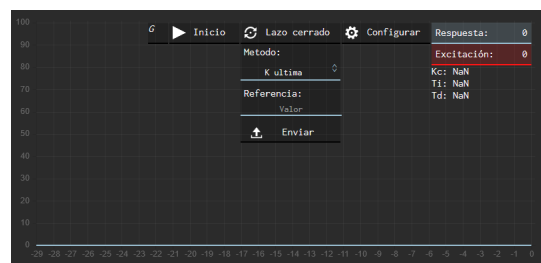


Figura 1. HMI

2.2 La planta

La planta consta de un motor eléctrico unido a un generador eléctrico por medio de una polea. Para los experimentos se usó una velocidad constante del motor DC del 30 % de su velocidad nominal, y una carga de 25W. La variable medida es el voltaje del generador, que tiene un rango de 0-150VAC, se midió una salida analógica de 2-10VDC. La variable de control es el voltaje de excitación del generador, que tiene un rango de 0-15VDC, se midió una salida analógica de 0-10VDC.

Para la medición fue necesario usar un circuito de adquisición, permitiendo ajustar rangos para la comunicación planta-PCDUINO, y filtrar el ruido generado en el laboratorio.

2.3 Controladores calculados

Se llevaron a cabo varios experimentos en lazo abierto para obtener una función de transferencia promedio que aproximara el comportamiento de la planta de forma matemática. Ésta función fue obtenida mediante el método de curva de reacción, buscando que fuera de segundo orden para lograr describir adecuadamente a la planta. La función encontrada es la siguiente:

$$\frac{92,3196}{s^2 + 9,5052s + 27,3539} \cdot e^{-0,6544s} \quad (1)$$

De la ec. 1 se pueden obtener los siguientes parámetros:

$$\begin{aligned} K &= 3.375 \\ \xi &= 0.9087 \\ \omega_n &= 5.23 \\ \tau_{eq} &= 0.21 \\ \theta &= 0.6544 \end{aligned}$$

Ganancia última:

Para la ganancia última se evaluó el diagrama de Bode de la función, tomando el margen de ganancia (Mg) y la frecuencia a la que ocurre (ω_π) para encontrar la ganancia última y el tiempo último.

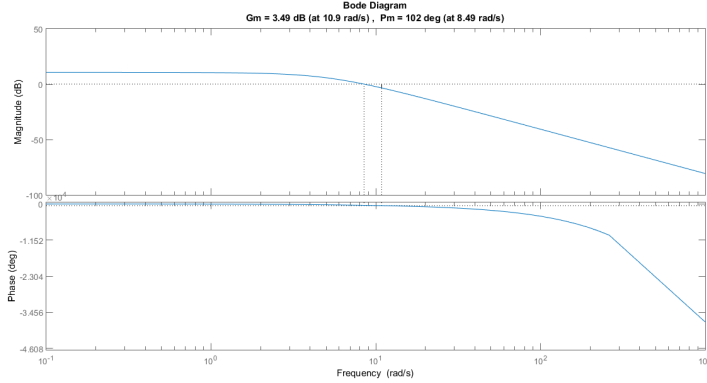


Figura 2. Diagrama de Bode de la función de transferencia calculada (Ver Ec. 1)

$$Ku = 10^{\frac{Mg}{20}} = 1,4945 \quad (2)$$

$$Tu = \frac{2\pi}{\omega_\pi} = 0,5765 \text{ seg} \quad (3)$$

Usando la tabla para sintonización de un PID paralelo de Ziegler Nichols en lazo cerrado, se obtienen:

$$K_c = 0,75Ku = 1,121 \quad (4)$$

$$T_i = Tu/1,6 = 0,36 \text{ seg} \quad (5)$$

$$T_d = Tu/80,0577 \text{ seg} \quad (6)$$

Integral del error

Usando como criterio la integral del error (ITAE) para un controlador regulador, usando como autor a Kaya y Sheib, basándose en la ec. 1), se tiene:

$$K_c = \frac{0,77902}{K} \left(\frac{\theta}{\tau_{eq}} \right)^{-1,06401} = 0,07 \quad (7)$$

$$T_i = \frac{\tau_{eq}}{1,14311} \left(\frac{\theta}{\tau_{eq}} \right)^{-0,70949} = 0,411 \text{ seg} \quad (8)$$

$$T_d = 0,57137\tau_{eq} \left(\frac{\theta}{\tau_{eq}} \right)^{1,03826} = 0,39 \text{ seg} \quad (9)$$

Optimización

Se calculó un controlador funcionando como servomecanismo, minimizando la integral del error (IAE).

$$K_c = \frac{0,3295 + 0,7182 \left(\frac{\theta}{\tau_{eq}} \right)^{-0,9971}}{K} = 0,323 \quad (10)$$

$$T_i = \tau_{eq} \left(0,9781 + 0,3723 \left(\frac{\theta}{\tau_{eq}} \right)^{0,8486} \right) = 0,41 \text{ seg} \quad (11)$$

$$T_d = \tau_{eq} \left(0,3416 \left(\frac{\theta}{\tau_{eq}} \right)^{0,9414} \right) = 0,21 \text{ seg} \quad (12)$$

Síntesis directa

Para síntesis directa se planteó una función de transferencia en lazo cerrado deseada, como una función de primer orden, con un tiempo equivalente λ igual a la mitad del τ_{eq} en lazo abierto, y en base a ésta se calculó la función del controlador.

Tras despejar los parámetros se tiene:

$$K_c = \frac{2\xi}{K\lambda\omega_n} = 0,21 \quad (13)$$

$$T_i = \frac{2\xi}{\omega_n} = 0,35 \text{ seg} \quad (14)$$

$$T_d = \frac{1\xi}{2\omega_n} = 0,1052 \text{ seg} \quad (15)$$

Asignación de Polos

Para la asignación de polos se tuvieron como parámetros de diseño un ξ de 0.5 y un ω_n de $13,33 \frac{\text{rad}}{\text{seg}}$. Con eso, la ecuación característica deseada es:

$$\alpha_d = s^2 + 13,33s + 177,69 = 0 \quad (16)$$

La ecuación característica de la función de transferencia con un controlador PID es:

$$T_i s(s^2 + 9,5052s + 27,3539) + K_c(T_i T_d s^2 + T_i s + 92,3126)(92,3126) = 0 \quad (17)$$

Para igualar las ecuaciones fue necesario añadir un polo no dominante, se eligió una distancia prudente al ponerlo en $s=-40$, casi 3 veces mas lejos del origen del plano complejo s que las demás raíces. Resolviendo el sistema de ecuaciones se tiene:

$$K_c = 7,405 \quad (18)$$

$$T_i = 0,09617 \text{ seg} \quad (19)$$

$$T_d = 0,065 \text{ seg} \quad (20)$$

3. RESULTADOS

Los controladores obtenidos fueron simulados usando Euler hacia adelante, las gráficas muestran el set-point y la respuesta del sistema en lazo cerrado. En los experimentos con los algoritmos de control en la planta se efectuaron los

mismos cambios de referencia y de carga con todos los controladores. Los cambios de set point y perturbaciones, en orden son:

- 10 %
- 30 %
- 20.5 %
- 15 %
- 20 %
- Se añaden 100W de carga
- Se retiran los 100W de carga

En las gráficas se pueden observar el set-point, el esfuerzo de control, la respuesta de la planta en lazo cerrado, y el error.

3.1 Controlador por ganancia ultima

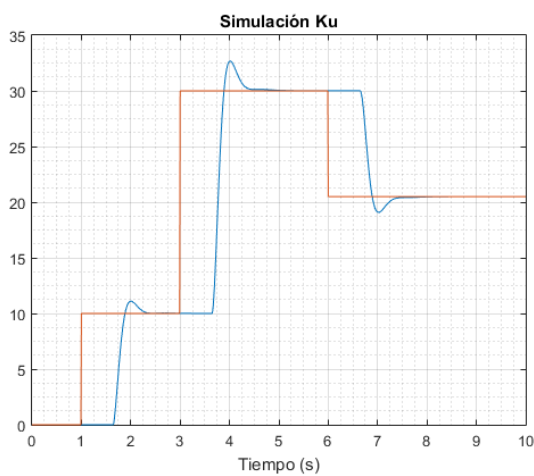


Figura 3. Simulación Sintonización por método de ganancia ultima

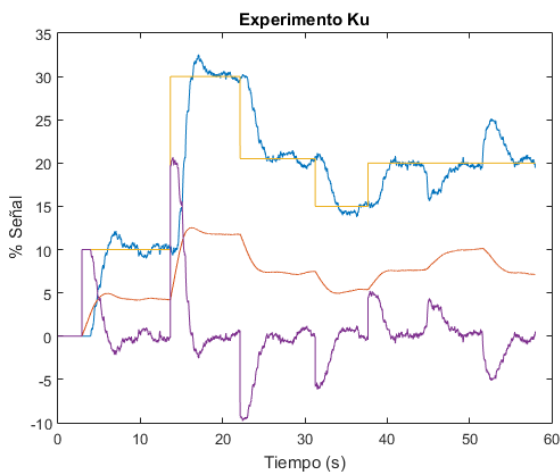


Figura 4. Resultados planta en lazo cerrado Ku

En el resultado obtenido por ganancia ultima Fig. 4 con respecto a la simulación en la Fig. 3 valida la implementación con éxito en el controlado paralelo que fue programado en el PCduino, el sobre impulso esta en un rango tolerable y los tiempos de estabilización, si bien no son tan rápidos como lo esperado, no son largos comparados con

la reacción en lazo abierto, que era de aproximadamente 1 segundo.

Podemos ver los tiempos de reacción a las perturbaciones a partir del segundo 40, donde se aprecia la acción del controlador actuando como regulado, mientras mantiene la salida en la referencia deseada.

3.2 Controlador por Integral del error

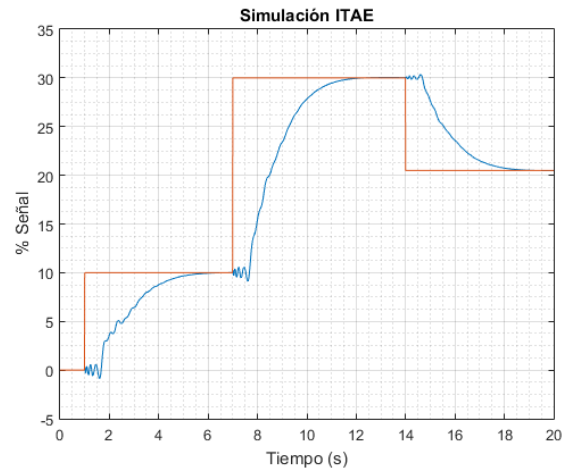


Figura 5. Simulación Sintonización por método de integral del error, aproximación de Padé grado 8 para el tiempo muerto.

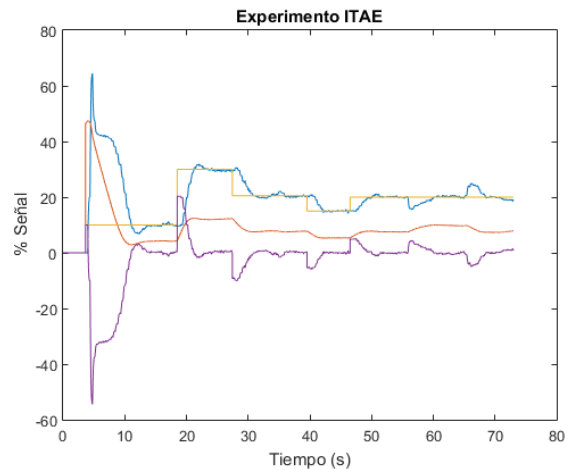


Figura 6. Resultados planta en lazo cerrado ITAE

Comparando la fig. 5 con la fig.6, se vé que la respuesta es similar a la esperada, teniendo sobreimpulsos despreciables, y con tiempos de estabilidad reales aún más rapidos de lo esperado. Cabe resaltar que el primer escalón tuvo un comportamiento peculiar debido a la acción derivativa al comenzar el experimento, pero más tarde se ve una buena respuesta en los demás set-points.

3.3 Optimización de IAE

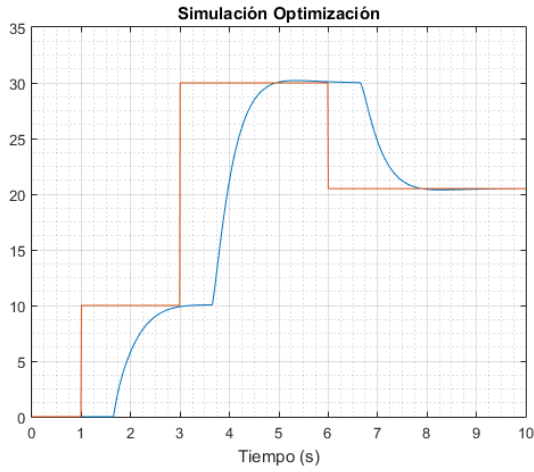


Figura 7. Simulación optimización de ITAE

3.4 Parametrización por asignación de polos

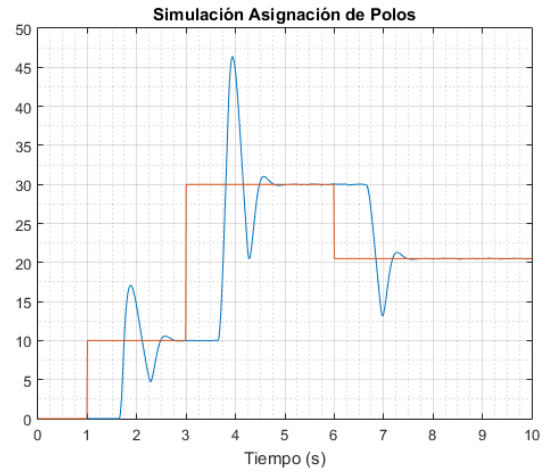


Figura 9. Simulación asignación de polos

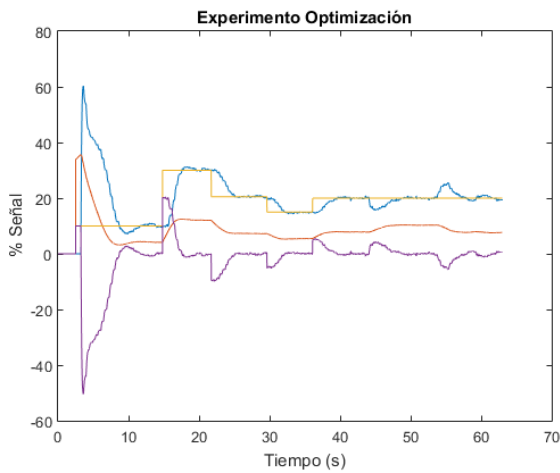


Figura 8. Resultados planta en lazo cerrado optimización ITAE

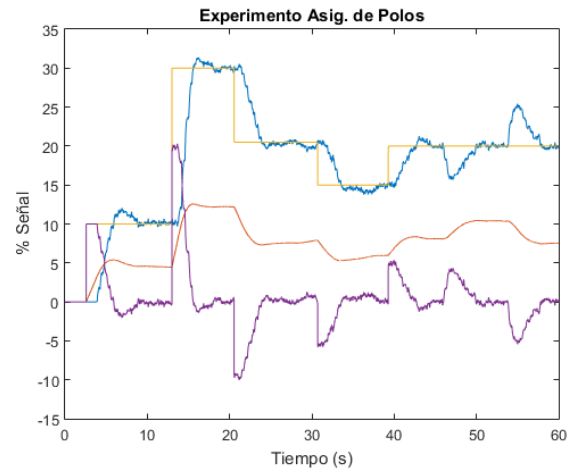


Figura 10. Resultados planta en lazo cerrado asignación de polos

Trás ensayar dos controladores, se decidió sintonizar minimizando la integral del error (IAE). Se observa el mismo comportamiento peculiar en el primer escalón, pero luego se regula la acción derivativa al comenzar a actuar la proporcional y la integral. El resultado del experimento concuerda muy bien con los esperado por simulación, con las respuestas siendo sobre-amortiguadas y teniendo tiempos de establecimiento de aproximadamente 1.5seg.

A pesar de que en la Fig. 9 se observa un sobre-impulso mayor al deseado, está resuelto de una manera matemáticamente correcta, y durante la puesta en marcha en la planta se observa que el sobre-impulso es menor al simulado (ajustándose mejor a los parámetros de diseño). Fig. 10.

En el diseño del controlador, se probaron diferentes valores para el polo no dominante asignado., sin embargo no se logró la respuesta esperada en simulación.

3.5 Parametrización por Síntesis directa

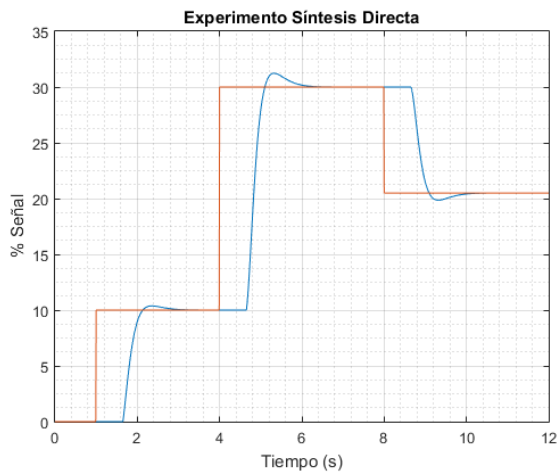


Figura 11. Simulación síntesis directa

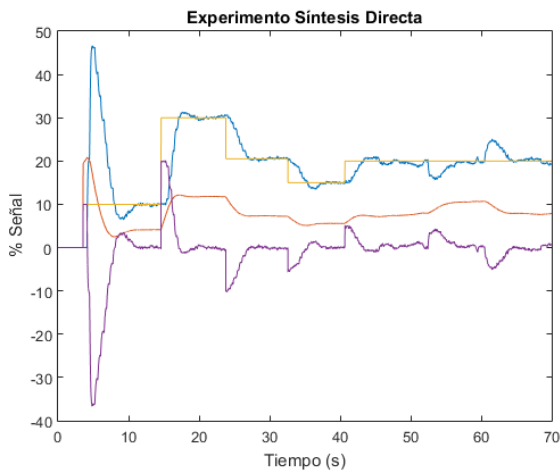


Figura 12. Resultados planta en lazo cerrado síntesis directa

Junto a la optimización de la integral del error, síntesis directa fue uno de los métodos en los que los resultados de la Fig. 12 y la simulación Fig. 11 tuvieron mayor concordancia, y así pues se concluye que tuvo éxito la validación mostrada.

Se puede ver en ambas figuras que se presenta un pequeño sobre impulso, aproximadamente del 5% respecto al escalón, que es relativamente pequeño y puede aproximarse el sistema al planteado en el cálculo de síntesis directa, un sistema sobre-amortiguado.

4. DEFINICIONES

Imprecisión en los parámetros: Los parámetros son variables o condiciones usadas en el diseño de sistemas. Conocer los valores reales de estos puede llegar a ser muy complejo, pues en un experimento existen factores como desgaste. También puede haber imprecisión debido a aproximaciones numéricas o aproximaciones a modelos que no incluyen todas las características. Por ejemplo representar

una sección transversal compleja con un rectángulo de área equivalente, o hacer cálculos para engranes como dos círculos girando uno con respecto al otro sin deslizarse. Wood and Antonsson (1966).

Dinámicas no modeladas: También conocido incertidumbre no estructurada, es cuando se conoce que existen discrepancias entre la planta real y el modelo, y posiblemente se conocen las magnitudes de dichas desviaciones de determinadas medidas entrada/salida. Por ejemplo la diferencia en respuesta frecuencial causada por la dinámica de alta frecuencia no modelada Rubio and Sánchez (1996).

No linealidades: Son fenómenos cuya salida no es proporcional a la entrada (no cumple las propiedades homogénea y aditiva). Los sistemas reales no presentan linealidad perfecta. Existen diferentes tipos de no linealidad y existen varios grados, aunque algunos sistemas pueden acercarse bastante a un modelo lineal, en especial con entradas pequeñas. Los sistemas no lineales presentan frecuencias en su salida inexistentes en su entrada. Un ejemplo es un reproductor de sonido, que produce armónicos en su señal de salida, los cuales dañan la calidad del sonido y son más notables en niveles de volumen alto Glenn (2003).

Estos factores afectan negativamente al algoritmo de control pues impiden que éste tome en cuenta la totalidad de los factores que afectan el comportamiento del sistema. Al tomar datos en lazo abierto se ve que no todos los escalones reaccionaron de la misma manera, y fue necesario obtener una función de transferencia promedio, lo que ya implica cierta cantidad de error. El esfuerzo de control es la cantidad de energía que debe inyectarle el controlador al sistema para cumplir su función, gracias al error aportado por los factores mencionados, puede que se necesite más tiempo y energía para obtener la misma calidad de respuestas en lazo cerrado. Se debe tener un equilibrio al decidir que tomar en cuenta y que no, pues una alta complejidad del modelo aumenta los costos de computación.

5. CONCLUSIONES

Los métodos de sintonización vistos en clase y en los textos sugeridos, efectivamente logran de una manera cercana a las simulaciones estabilizar la planta en lazo cerrado con cierta precisión en los parámetros de diseño requeridos.

El ruido es un factor de gran peso a la hora de controlar, pues el algoritmo de control depende en gran medida de la señal captada en la adquisición de datos y por ende esta debe ser lo más limpia de ruido y estar ajustada lo mejor posible a la respuesta real de la planta.

Los algoritmos de control PID son de gran utilidad, y las diferentes formas de sintonizarlos y parametrizarlos generan comportamientos diferentes, por lo que puede ser prudente ensayar varios antes de elegir uno para una aplicación en particular.

LOGROS

Es un hecho la necesidad del control en el mundo moderno, y este laboratorio fue el primer contacto real con la vigencia del control clásico, más precisamente en la sintonización de controladores PID. En la culminación del

trabajo se obtuvo entonces, una aplicación que permite la elección de los parámetros del controlador con una interfaz funcional en cualquier dispositivo capaz de cargar paginas web y con acceso a internet (control de la planta en tiempo real desde cualquier lugar del mundo), aporte de software libre publicado en github bajo la licencia MIT y un sistema de adquisición de datos y control usando una tarjeta de desarrollo PCDUINO.

REFERENCIAS

- Glenn, W. (2003). Introducción al análisis de vibraciones.
- Rubio, F. and Sánchez, M. (1996). *Control adaptativo y robusto*. Colección Ingeniería. Universidad de Sevilla. URL <https://books.google.com.co/books?id=54I4mCHvNz8C>.
- Wood, K.L. and Antonsson, E.K. (1966). Computations with imprecise parameters in engineering design: Background and theory.

Apéndice A. DIAGRAMA DE FLUJO DEL CONTROLADOR

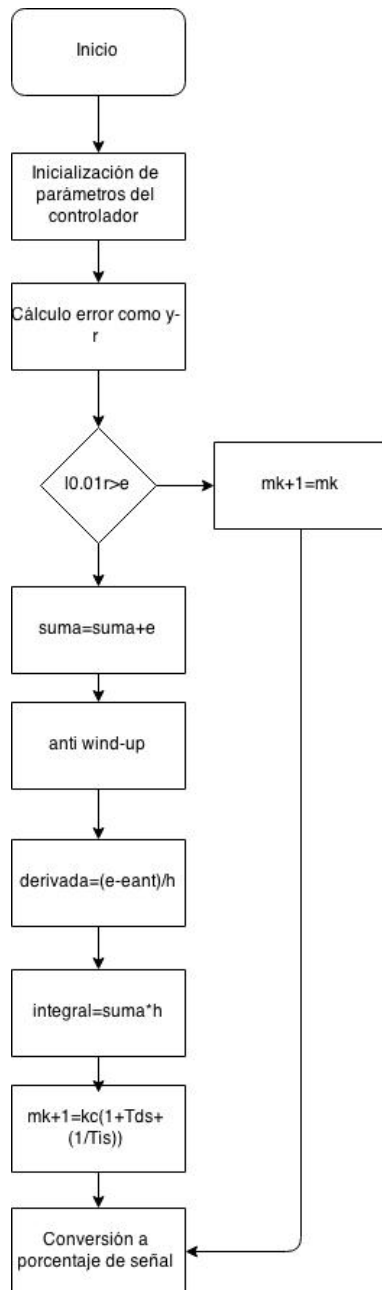


Figura A.1. diagrama de flujo [Controlador]

Apéndice B. DIAGRAMA DE FLUJO SERVIDOR

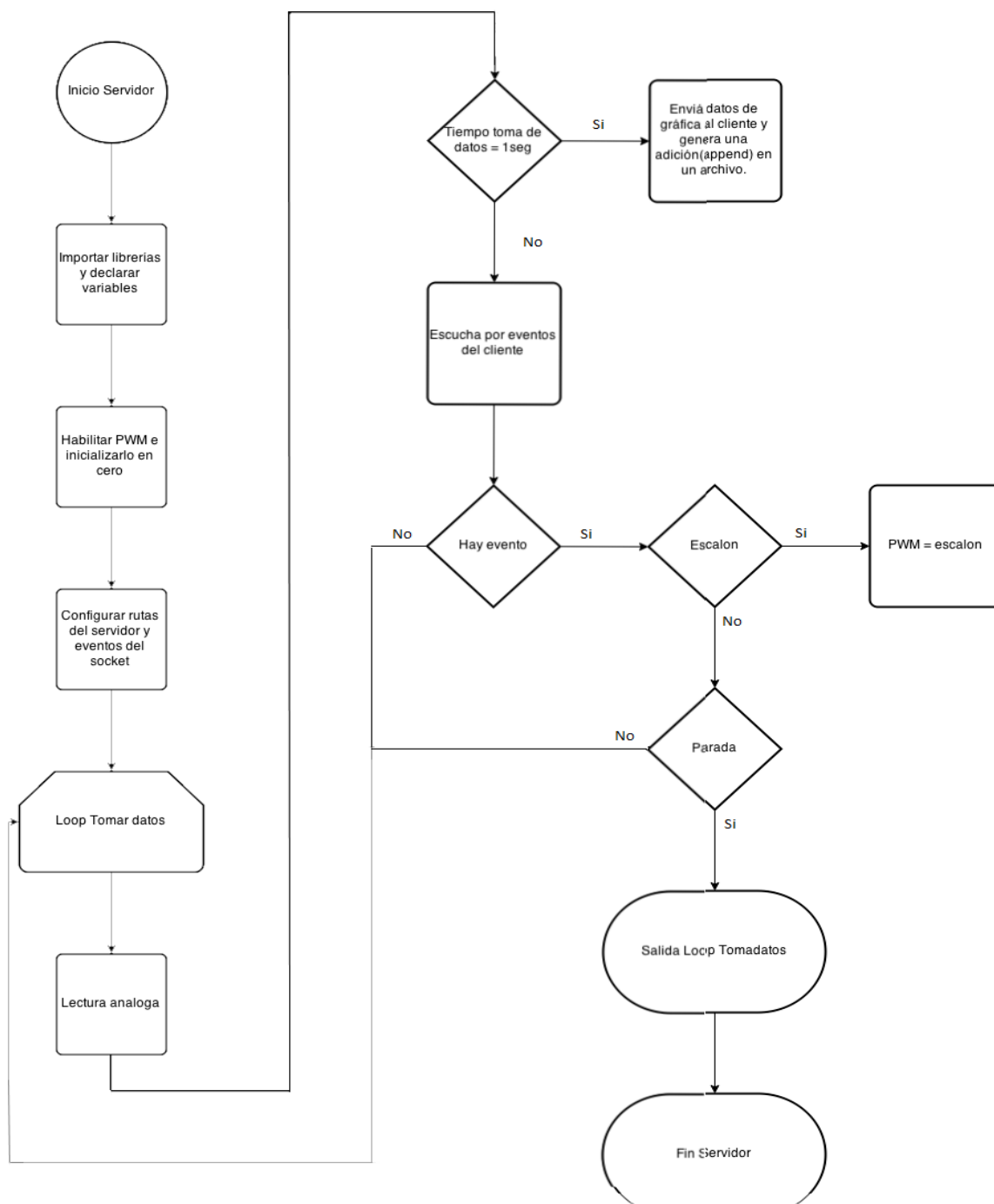


Figura B.1. Diagrama de flujo [Servidor].

Apéndice C. DIAGRAMA DE FLUJO CLIENTE

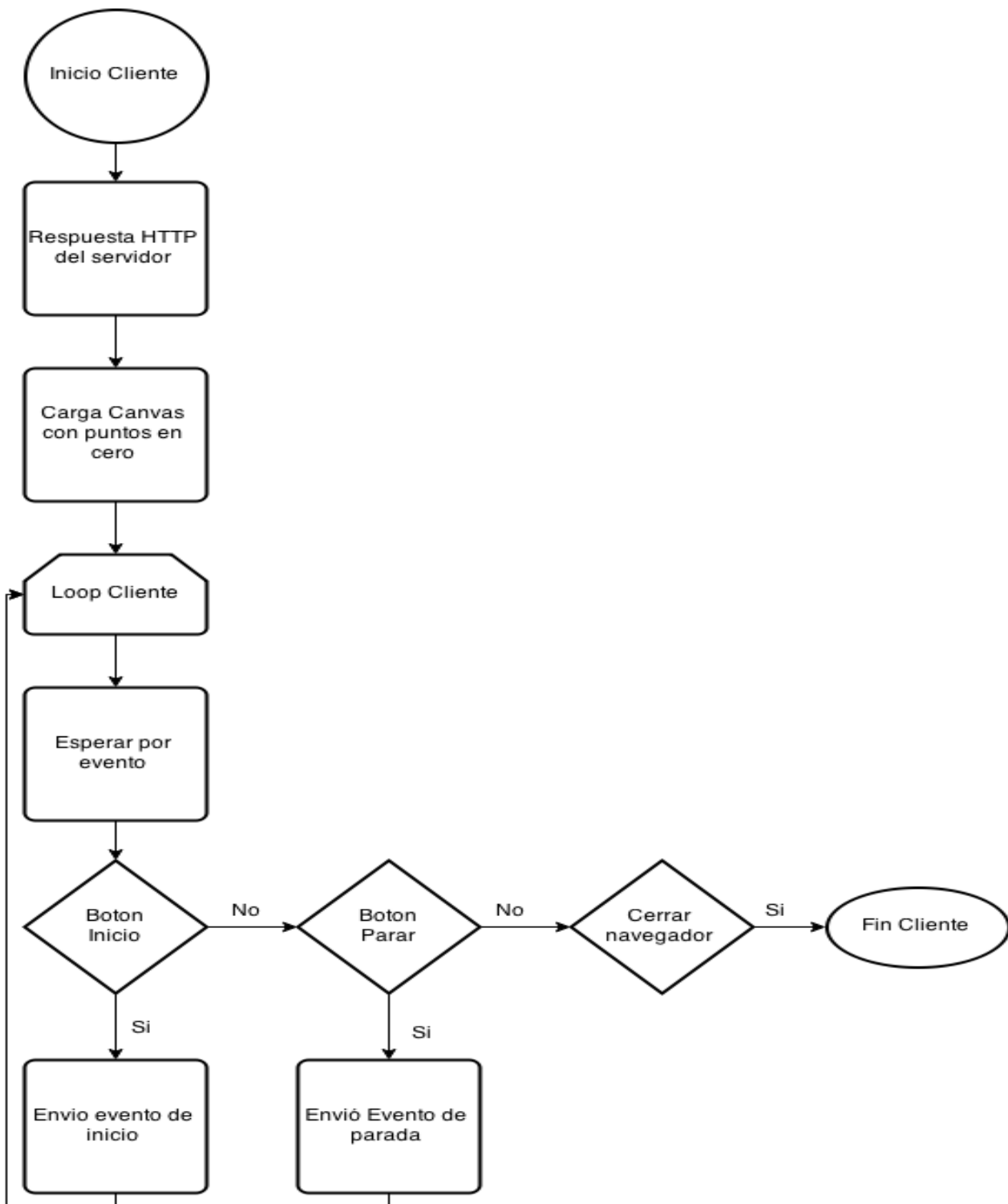


Figura C.1. Diagrama de flujo [Cliente].