



Universidad Nacional Experimental del Táchira

Vicerrectorado Académico

Decanato de Docencia

Departamento de Ingeniería Electrónica

Trabajo de Aplicación Profesional

Proyecto Especial de Grado

Laboratorio virtual de sistemas de control clásicos y difusos utilizando software libre

Autor: Kleiver J. Carrasco M.

C.I: V-24.743.884

kleiver.carrasco@unet.edu.ve

Tutor: MSc. Juan R. Vizcaya R.

jvizcaya@unet.edu.ve

San Cristóbal, septiembre de 2019



Universidad Nacional Experimental del Táchira

Vicerrectorado Académico

Decanato de Docencia

Departamento de Ingeniería Electrónica

Trabajo de Aplicación Profesional

Proyecto Especial de Grado

Laboratorio virtual de sistemas de control clásicos y difusos utilizando software libre

Proyecto Especial de Grado presentado como requisito parcial para optar
al título de Ingeniero en Electrónica

Autor: Kleiver J. Carrasco M.

C.I: V-24.743.884

kleiver.carrasco@unet.edu.ve

Tutor: MSc. Juan R. Vizcaya R.

jvizcaya@unet.edu.ve

San Cristóbal, septiembre de 2019



Universidad Nacional Experimental del Táchira

Vicerrectorado Académico

Decanato de Docencia

Departamento de Ingeniería Electrónica

Trabajo de Aplicación Profesional

Proyecto Especial de Grado

Aprobación del Tutor para presentación del Proyecto Especial de Grado

Yo, Juan Rafael Vizcaya Rojas, en mi carácter de Tutor del Proyecto Especial de Grado titulado “**Laboratorio virtual de sistemas de control clásicos y difusos utilizando software libre**”, presentado por el bachiller Kleiver Jesús Carrasco Márquez titular de la cédula de identidad No. V-24.743.884 por medio de la presente autorizo su presentación ante el Jurado que se designe, en virtud de considerar que reúne los requisitos y méritos necesarios para ser sometido a presentación pública.

Tutor
Juan Rafael Vizcaya Rojas
C.I. V-7.348.191

DEDICATORIA

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam lobortis facilisis sem. Nullam nec mi et neque pharetra sollicitudin. Praesent imperdiet mi nec ante. Donec ullamcorper, felis non sodales commodo, lectus velit ultrices augue, a dignissim nibh lectus placerat pede. Vivamus nunc nunc, molestie ut, ultricies vel, semper in, velit. Ut porttitor. Praesent in sapien. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Duis fringilla tristique neque. Sed interdum libero ut metus. Pellentesque placerat. Nam rutrum augue a leo. Morbi sed elit sit amet ante lobortis sollicitudin. Praesent blandit blandit mauris. Praesent lectus tellus, aliquet aliquam, luctus a, egestas a, turpis. Mauris lacinia lorem sit amet ipsum. Nunc quis urna dictum turpis accumsan semper.

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam lobortis facilisis sem. Nullam nec mi et neque pharetra sollicitudin. Praesent imperdiet mi nec ante. Donec ullamcorper, felis non sodales commodo, lectus velit ultrices augue, a dignissim nibh lectus placerat pede. Vivamus nunc nunc, molestie ut, ultricies vel, semper in, velit. Ut porttitor. Praesent in sapien. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Duis fringilla tristique neque. Sed interdum libero ut metus. Pellentesque placerat. Nam rutrum augue a leo. Morbi sed elit sit amet ante lobortis sollicitudin. Praesent blandit blandit mauris. Praesent lectus tellus, aliquet aliquam, luctus a, egestas a, turpis. Mauris lacinia lorem sit amet ipsum. Nunc quis urna dictum turpis accumsan semper.

AGRADECIMIENTO

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam lobortis facilisis sem. Nullam nec mi et neque pharetra sollicitudin. Praesent imperdiet mi nec ante. Donec ullamcorper, felis non sodales commodo, lectus velit ultrices augue, a dignissim nibh lectus placerat pede. Vivamus nunc nunc, molestie ut, ultricies vel, semper in, velit. Ut porttitor. Praesent in sapien. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Duis fringilla tristique neque. Sed interdum libero ut metus. Pellentesque placerat. Nam rutrum augue a leo. Morbi sed elit sit amet ante lobortis sollicitudin. Praesent blandit blandit mauris. Praesent lectus tellus, aliquet aliquam, luctus a, egestas a, turpis. Mauris lacinia lorem sit amet ipsum. Nunc quis urna dictum turpis accumsan semper.

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam lobortis facilisis sem. Nullam nec mi et neque pharetra sollicitudin. Praesent imperdiet mi nec ante. Donec ullamcorper, felis non sodales commodo, lectus velit ultrices augue, a dignissim nibh lectus placerat pede. Vivamus nunc nunc, molestie ut, ultricies vel, semper in, velit. Ut porttitor. Praesent in sapien. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Duis fringilla tristique neque. Sed interdum libero ut metus. Pellentesque placerat. Nam rutrum augue a leo. Morbi sed elit sit amet ante lobortis sollicitudin. Praesent blandit blandit mauris. Praesent lectus tellus, aliquet aliquam, luctus a, egestas a, turpis. Mauris lacinia lorem sit amet ipsum. Nunc quis urna dictum turpis accumsan semper.

UNIVERSIDAD NACIONAL EXPERIMENTAL DEL TÁCHIRA
VICERRECTORADO ACADÉMICO
DECANATO DE DOCENCIA
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

**Laboratorio virtual de sistemas de control clásicos y difusos
utilizando software libre**

Autor: Kleiver J. Carrasco M.
Tutor: Juan R. Vizcaya R.
Fecha: Noviembre, 2019

RESUMEN

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam lobortis facilisis sem. Nullam nec mi et neque pharetra sollicitudin. Praesent imperdiet mi nec ante. Donec ullamcorper, felis non sodales commodo, lectus velit ultrices augue, a dignissim nibh lectus placerat pede. Vivamus nunc nunc, molestie ut, ultricies vel, semper in, velit. Ut porttitor. Praesent in sapien. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Duis fringilla tristique neque. Sed interdum libero ut metus. Pellentesque placerat. Nam rutrum augue a leo. Morbi sed elit sit amet ante lobortis sollicitudin. Praesent blandit blandit mauris. Praesent lectus tellus, aliquet aliquam, luctus a, egestas a, turpis. Mauris lacinia lorem sit amet ipsum. Nunc quis urna dictum turpis accumsan semper. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam lobortis facilisis sem. Nullam nec mi et neque pharetra sollicitudin. Praesent imperdiet mi nec ante. Donec ullamcorper, felis non sodales commodo, lectus velit ultrices augue, a dignissim nibh lectus placerat pede. Vivamus nunc nunc, molestie ut, ultricies vel, semper in, velit. Ut porttitor. Praesent in sapien. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Duis fringilla tristique neque. Sed interdum libero ut metus. Pellentesque placerat. Nam rutrum augue a leo. Morbi sed elit sit amet ante lobortis sollicitudin. Praesent blandit blandit mauris. Praesent lectus tellus, aliquet aliquam, luctus a, egestas a, turpis. Mauris lacinia lorem sit amet ipsum. Nunc quis urna dictum turpis accumsan semper.

Descriptores: Texto, sistemas de control, logica difusa

ÍNDICE

	Pág.
CARTA DE APROBACIÓN PARA PRESENTACIÓN.	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
RESUMEN.	vi
ÍNDICE.	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE TABLAS	x
ÍNDICE DE CÓDIGOS.	xi
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I EL PROBLEMA	3
Planteamiento del problema	3
Objetivos de la investigación.	5
Justificación e importancia.	5
Alcance y limitaciones	6
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO	7
Antecedentes.	7
Bases teóricas	8
CAPÍTULO III MARCO METODOLÓGICO	17
Tipo de investigación	17
Diseño de la investigación	17
Modalidad	18
Fases de la investigación	18
CAPÍTULO IV RESULTADOS	20
Resultados	20

CAPÍTULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	24
Conclusiones	24
Recomendaciones	25
REFERENCIAS	28
ANEXOS	30

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA

Pág.

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA

Pág.

ÍNDICE DE CÓDIGOS

CÓDIGO

Pág.

INTRODUCCIÓN

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam lobortis facilisis sem. Nullam nec mi et neque pharetra sollicitudin. Praesent imperdiet mi nec ante. Donec ullamcorper, felis non sodales commodo, lectus velit ultrices augue, a dignissim nibh lectus placerat pede. Vivamus nunc nunc, molestie ut, ultricies vel, semper in, velit. Ut porttitor. Praesent in sapien. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Duis fringilla tristique neque. Sed interdum libero ut metus. Pellentesque placerat. Nam rutrum augue a leo. Morbi sed elit sit amet ante lobortis sollicitudin. Praesent blandit blandit mauris. Praesent lectus tellus, aliquet aliquam, luctus a, egestas a, turpis. Mauris lacinia lorem sit amet ipsum. Nunc quis urna dictum turpis accumsan semper.

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam lobortis facilisis sem. Nullam nec mi et neque pharetra sollicitudin. Praesent imperdiet mi nec ante. Donec ullamcorper, felis non sodales commodo, lectus velit ultrices augue, a dignissim nibh lectus placerat pede. Vivamus nunc nunc, molestie ut, ultricies vel, semper in, velit. Ut porttitor. Praesent in sapien. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Duis fringilla tristique neque. Sed interdum libero ut metus. Pellentesque placerat. Nam rutrum augue a leo. Morbi sed elit sit amet ante lobortis sollicitudin. Praesent blandit blandit mauris. Praesent lectus tellus, aliquet aliquam, luctus a, egestas a, turpis. Mauris lacinia lorem sit amet ipsum. Nunc quis urna dictum turpis accumsan semper.

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam lobortis facilisis sem. Nullam nec mi et neque pharetra sollicitudin. Praesent imperdiet mi nec ante. Donec ullamcorper, felis non sodales commodo, lectus velit ultrices augue, a dignissim nibh lectus placerat pede. Vivamus nunc nunc, molestie ut, ultricies vel, semper in, velit. Ut porttitor. Praesent in sapien. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Duis fringilla tristique neque. Sed interdum libero ut metus. Pellentesque placerat. Nam rutrum augue a leo. Morbi sed elit sit amet ante lobortis sollicitudin. Praesent blandit

blandit mauris. Praesent lectus tellus, aliquet aliquam, luctus a, egestas a, turpis. Mauris lacinia lorem sit amet ipsum. Nunc quis urna dictum turpis accumsan semper.

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam lobortis facilisis sem. Nullam nec mi et neque pharetra sollicitudin. Praesent imperdiet mi nec ante. Donec ullamcorper, felis non sodales commodo, lectus velit ultrices augue, a dignissim nibh lectus placerat pede. Vivamus nunc nunc, molestie ut, ultricies vel, semper in, velit. Ut porttitor. Praesent in sapien. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Duis fringilla tristique neque. Sed interdum libero ut metus. Pellentesque placerat. Nam rutrum augue a leo. Morbi sed elit sit amet ante lobortis sollicitudin. Praesent blandit blandit mauris. Praesent lectus tellus, aliquet aliquam, luctus a, egestas a, turpis. Mauris lacinia lorem sit amet ipsum. Nunc quis urna dictum turpis accumsan semper.

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam lobortis facilisis sem. Nullam nec mi et neque pharetra sollicitudin. Praesent imperdiet mi nec ante. Donec ullamcorper, felis non sodales commodo, lectus velit ultrices augue, a dignissim nibh lectus placerat pede. Vivamus nunc nunc, molestie ut, ultricies vel, semper in, velit. Ut porttitor. Praesent in sapien. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Duis fringilla tristique neque. Sed interdum libero ut metus. Pellentesque placerat. Nam rutrum augue a leo. Morbi sed elit sit amet ante lobortis sollicitudin. Praesent blandit blandit mauris. Praesent lectus tellus, aliquet aliquam, luctus a, egestas a, turpis. Mauris lacinia lorem sit amet ipsum. Nunc quis urna dictum turpis accumsan semper.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

Planteamiento del problema

Desde hace muchos años que el hombre dedico parte de sus esfuerzos a ofrecer servicios y producir bienes para el consumo de las personas, antaño, los procesos de producción eran fáciles de implementar y de complejidad reducida, por tanto, se podían controlar de forma manual utilizando instrumentos y herramientas simples, pero Creus (2010) afirma que: “[...] la gradual complejidad con qué éstos se han ido desarrollando ha exigido su automatización progresiva por medio de los instrumentos de medición y control”(p. 1).

Así mismo, la calidad de vida de las personas ha mejorado gracias a que ahora la producción de bienes y servicios se realizan de forma más eficiente, parte de este incremento de eficiencia se debe a la incorporación de nuevas tecnologías que traen consigo ventajas como rapidez, precisión y mejoras en la automatización. La automatización por medio de controladores analógicos y electrónicos ha desempeñado un papel importante en esta mejora, tanto así, que se ha convertido en parte integra en los sistemas de vehículos espaciales, robóticos, procesos modernos de fabricación y en cualquier operación industrial (Ogata, 2003).

Siguiendo este orden de ideas, es necesario mencionar que analizar los sistemas de control puede llegar a ser, en ocasiones, una tarea difícil de realizar si no se tienen los conocimientos necesarios o si no se utilizan las herramientas adecuadas, uno de los motivos es que “[...] los antecedentes matemáticos requeridos incluyen temas tales como la teoría de la variable compleja, ecuaciones diferenciales y en diferencias, transformada de Laplace y transformada z [...]”(Kuo, 1996, p. 21).

Considerando esto, es natural pensar que un modo de abarcar el análisis, diseño y simulación de sistemas de control es por medio de las computadoras, Ogata (2003) sugiere que gran parte del tiempo dedicado será verificando el comportamiento del sistema mediante un análisis, es por esto que recomienda utilizar un programa de computadora como MATLAB para que realice gran parte del cálculo matemático necesario en los estudios de sistemas de control, no obstante, se debe aclarar que MATLAB es un software que, aunque potente, permanece cerrado y de pago.

En adición a lo anterior, se puede pensar en utilizar herramientas libres como Octave y Scilab, que proporcionan un número elevado de funciones matemáticas, pero se requiere de saber programar, además, no ofrecen un entorno gráfico para la entonación de controladores, lo cual puede llegar a ser problemático para algunos ingenieros, por otro lado, suelen ofrecer soluciones aisladas entre sí e integrarlas suele ser tedioso y problemático, Suárez (2014) afirma que: “Si lograr el dominio de la herramienta computacional es un reto en sí mismo deja de ser una herramienta práctica [...]”(p. 6).

Finalmente, se debe tener en cuenta que las herramientas libres y gratuitas no tienen la posibilidad de diseñar controladores a base de lógica difusa de forma intuitiva y sencilla, lo cual puede conllevar un desperdicio de tiempo considerable en comparación con el uso de una interfaz gráfica para el diseño del controlador, es por esto que la mayoría de las herramientas gratuitas están limitadas a usarse, de manera práctica, solo en teoría clásica de control.

En base a la problemática expuesta, surgen las siguientes preguntas: ¿Es posible realizar un laboratorio para el análisis de sistemas de control con software libre?, ¿Cumpliría con los requisitos para analizar, diseñar y simular sistemas de control? y ¿Cómo se desempeñaría en comparación con otras herramientas?, preguntas que se responderán con el desarrollo de esta investigación y que se utilizarán para guiar el rumbo de la misma.

Objetivos de la investigación

Objetivo general

Desarrollar un laboratorio virtual de sistemas de control clásicos y difusos utilizando software libre.

Objetivos específicos

1. Estudiar los sistemas de control clásicos.
2. Estudiar el diseño de controladores difusos tipo Mamdani.
3. Codificar las rutinas de análisis, diseño y simulación de sistemas de control necesarias.
4. Realizar la interfaz gráfica de un laboratorio de sistemas de control virtual.
5. Comparar los resultados obtenidos con otras herramientas de corte similar.

Justificación e importancia

Actualmente hay una dependencia muy alta de MATLAB a la hora de trabajar con calculo numérico, así mismo, es el software más usado en la UNET para analizar, diseñar y simular sistemas de control, con el desarrollo de un laboratorio de control utilizando software libre se puede eliminar parcialmente dicha dependencia, logrando así que herramientas externas sean usadas solo cuando se den casos más particulares o complejos.

Con el desarrollo del laboratorio de control se quiere tener una herramienta que cumpla con los requisitos actuales para el análisis, diseño y simulación de sistemas de control de forma libre, gratuita, rápida y sencilla sin tener que invertir demasiado tiempo en aprender la herramienta, y si en lo que importa, diseñar un sistema de control preciso y confiable. Por otro lado, se espera desarrollar la herramienta de forma que su interfaz gráfica acepte otros módulos i.e., permitirá a aquel que lo desee expandir las funcionalidades

del laboratorio de sistemas de control sin que se tenga que rehacer todo, esto permitirá mantener actualizado y útil la herramienta, además, se estará generando una importancia metodológica al crear la posibilidad de realizar otras investigaciones alrededor de la misma para agregar nuevas funcionalidades y expandir el laboratorio virtual.

Alcance y limitaciones

Con esta investigación se realizará una interfaz gráfica que permita realizar cuatro funciones principales, la primera, análisis de procesos en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia como: respuesta al escalón, respuesta al impulso, bode, entre otras, la segunda, entonación de controladores PID de forma manual y con auto tuning, la tercera, será el diseño de controladores difusos tipo Mamdani generales y para esquemas específicos de sistemas de control, y finalmente, la simulación de sistemas de control utilizando controladores PID y controladores difusos para esquemas específicos.

Hay que aclarar que, para modelar los sistemas de control en cada una de las funcionalidades mencionadas se le dará la opción al usuario para representarlos como funciones de transferencia o ecuaciones de espacio de estado y se podrá especificar si el modelo está en tiempo continuo o en tiempo discreto. El análisis de sistemas de control es un tema muy amplio y requiere de una gran cantidad de funciones que se pueden realizar utilizando software libre, no obstante, se considera que con este alcance se estaría logrando cumplir con las necesidades fundamentales.

El software que se utilizará para realizar la interfaz gráfica y los cálculos correspondientes será el lenguaje de programación Python junto con su set de bibliotecas externas. Aunque la biblioteca de Python para análisis de sistemas de control es potente y brindan varias herramientas de forma directa, se debe dejar claro que no cumplen con todas las funciones requeridas, por tanto, algunas rutinas de simulación se deberán codificar de cero con ayuda de bibliotecas de cálculo numérico, y otras, harán uso de la biblioteca de control con código complementario.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

Antecedentes

Para esta investigación se buscaron antecedentes de alcance nacional e internacional que ayuden a guiar, sustentar y validar esta investigación.

Casallas, Chacón y Rivera (2005), escribieron para la revista Acción Pedagógica de la Universidad de los Andes un artículo titulado “Desarrollo básico de un Laboratorio Virtual de Control de Procesos basado en Internet”, fue desarrollado conjuntamente entre la UNET y la ULA para ser usado a través de Internet y cuyo objetivo fue desarrollar un laboratorio virtual de control de procesos para la enseñanza a distancia, permitiendo ser utilizado solo por usuarios registrados y en determinados horarios. Aunque la finalidad de la investigación acá propuesta difiere del objetivo de Casallas et al., esta servirá como ayuda para determinar las funciones más utilizadas en el área de control, así como las necesidades típicas de un laboratorio de control virtual.

Adicionalmente, Salazar (2019), realizó en la Universidad Técnica del Norte, Ecuador, una tesis titulada “Diseño de un sistema de riego inteligente para cultivos de hortalizas basado en Fuzzy Logic en la granja la pradera de la Universidad Técnica del Norte.” para la implementación del controlador basado en la lógica difusa utilizó, entre otros equipos, un Raspberry PI para la ejecución de Python, específicamente, hizo uso de la biblioteca Scikit-Fuzzy, la cual le permitió definir las funciones de membresía, establecer las reglas difusas, realizar los procesos de fuzzificación y defuzzificación, todo esto para una arquitectura de controlador difuso tipo Mamdani, esta tesis servirá como referencia para establecer el diseño de controladores difusos utilizando la biblioteca Scikit-Fuzzy.

Por otro lado, Congo (2018) realizó en la Universidad Tecnológica Israel, Ecuador, una tesis titulada “Aplicaciones del software libre Python para prácticas de laboratorio aplicado a la asignatura de tratamiento digital de señales de la Universidad Tecnológica Israel” cuyo objetivo fue desarrollar por medio del software Python y sus diferentes librerías científicas, la realización de 3 Prácticas de Laboratorio para la asignatura Procesamiento Digital de Señales de la Universidad Tecnológica Israel, al igual que la intención de este trabajo, se realizó una interfaz gráfica con el objetivo de facilitar su uso, en este caso como herramienta para el procesamiento digital de señales. Este trabajo sustenta la viabilidad de realizar una interfaz gráfica con enfoque similar en el campo de la electrónica y se utilizara como guía parcial para establecer su uso en sistemas de control.

Finalmente, Gómez (2009) redactó para la revista Educación en Ingeniería de Colombia, un artículo titulado “Toolbox didáctico para el diseño y análisis de sistemas de control lineal”, cuyo objetivo es describir un toolbox realizado en MATLAB para el análisis de sistemas de control lineales, este toolbox consiste de una interfaz gráfica que permite realizar pruebas a sistemas de control como respuesta escalón, respuesta en frecuencia, análisis de estabilidad, diseño de controladores, entre otras funciones. Este artículo será de utilidad para establecer la interfaz gráfica que se pretende realizar, además, sirvió como punto de partida para determinar las funciones que debería tener un laboratorio virtual de sistemas de control, como punto adicional se puede resaltar que reafirma la utilidad de esta investigación.

Bases teóricas

Para poder realizar el laboratorio virtual de sistemas de control clásicos y difusos será necesario abarcar conocimientos de análisis de sistemas de control, diseño de controladores PID y controladores difusos, a continuación, se presentan los conceptos necesarios para el desarrollo de esta investigación.

Procesos

Es importante partir de la base, es por ellos que empezaremos con los procesos, Sánchez (2003) define los procesos como “[...] un bloque que se identifica porque tiene una o más variables de salida de las cuales es importante conocer y mantener sus valores”(p. 153). Así, un proceso se caracteriza por tener una entrada y una salida (para procesos SISO), dicha salida deberá mantenerse alrededor de un punto de referencia dado, es decir, se debe controlar su salida.

Modelado de procesos en tiempo continuo

Un proceso puede ser representado por ecuaciones diferenciales que determinen su comportamiento dinámico en el dominio del tiempo, no obstante, trabajar con ecuaciones diferenciales es tedioso a nivel matemático, por tanto, se prefiere modelar los procesos utilizando la transformada de Laplace para llevar de una representación dinámica a una algebraica, esta ecuación algebraica se operara para llevar a una función de transferencia que represente al proceso en el dominio de la frecuencia compleja (Smith & Corripio, 1985).

Transformada de Laplace

La transformada de Laplace de una función dependiente del tiempo $f(t)$ viene dada por la ecuación:

$$F(s) = \mathcal{L}[f(t)] = \int_0^{\infty} f(t)e^{-st} dt \quad (1)$$

Si suponemos que $f(t)$ es un proceso cuya representación dinámica viene dada por una ecuación diferencial de la forma:

$$a_2 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = b_0 x(t) \quad (2)$$

Aplicando (1) a (2) y despejando la relación $Y(s)/X(s)$ para el proceso con condiciones iniciales igual a cero (debido a que el proceso debe ser lineal) se obtiene la correspondiente función de transferencia del proceso $H(S)$:

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_0}{a_2 s^2 + a_1 s + a_0} \quad (3)$$

La demostración completa (Smith & Corripio, 1985, pp. 21-22) no es de interés para este trabajo, pero si su resultado, la función de transferencia puede ser analizada para determinar las características del proceso, como su ganancia, constante de tiempo, tiempo muerto, entre otras.

Ecuaciones de espacio de estado

Las ecuaciones de espacio de estado son un método más moderno para modelar todo tipo de sistemas, no solo físicos, sino también biológicos, económicos, sociales y otros. Así como una ecuación diferencial puede ser representada como una función de transferencia también se puede representar como una ecuación de espacio de estados, por tanto, una función de transferencia también puede ser representada en el espacio de estados y viceversa. Las ecuaciones linealizadas alrededor de un estado de operación (Ogata, 2003, p. 31) son:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (4)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) \quad (5)$$

con:

A : como matriz de estado.

B : como matriz de entrada.

C : como matriz de salida.

D : como matriz de transmisión directa.

Normalmente la notación presentada en las ecuaciones (4) y (5) es preferida dado que son compactas y fáciles de entender, no obstante, es al expandir las ecuaciones

en su forma matricial que podemos ver claramente que la ecuación (4) es un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \vdots \\ \dot{x}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1m} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{n1} & b_{n2} & \cdots & b_{nm} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_m \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{r1} & c_{r2} & \cdots & c_{rn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdots & d_{1m} \\ d_{21} & d_{22} & \cdots & d_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{r1} & d_{r2} & \cdots & d_{rm} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_m \end{bmatrix} \quad (7)$$

con:

n : como el numero de variables de estado

m : como el numero de entradas

r : como el numero de salidas

Para resolver estos sistemas de ecuaciones diferenciales podemos utilizar metodos iterativos como los metodos de Runge-Kuuta.

Modelado de procesos en tiempo discreto

Así como para tiempo continuo se utilizan ecuaciones diferenciales, en el tiempo discreto se hace uso de ecuaciones en diferencias, las ecuaciones en diferencias se pueden utilizar para aproximar a las ecuaciones diferenciales, estas primeras se suelen utilizar porque son más fáciles de programar (Kuo, 1996), debido a esto los procesos pueden ser representados de la siguiente forma:

$$y(k + n) + a_{n-1}y(k + n - 1) + \cdots + a_1y(k + 1) + a_0y(k) = f(k) \quad (8)$$

Asi mismo debido a que la ecuacion (4) esta compuesta de ecuaciones diferenciales, esta puede ser llevada a una ecuacion en diferencias y la representacion del proceso en el espacio de estados queda como sigue:

$$x(k + 1) = A_d x(k) + B_d u(k) \quad (9)$$

$$y(k) = C_d x(k) + D_d u(k) \quad (10)$$

Transformada z

En tiempo discreto se puede modelar un proceso utilizando la transformada z sobre la ecuación en diferencias del proceso para obtener su representacion en el dominio Z, la transformada Z es a las ecuaciones en diferencia lo que la transformada de laplace es las ecuaciones en tiempo continuo, la ecuación general para la transformada z es:

$$F(z) = \sum_{k=0}^{\infty} f(k)z^{-k} \quad (11)$$

Discretizacion de una funcion de transferencia continua

Existen varios metodos para realizar la discretizacion de una funcion de transferencia continua, el metodo mas simple suele implicar el uso de un muestreador con un retensor de orden zero (ZOH), retensor de orden zero significa que la señal de entrada es retenida constantemente durante el intervalo de muestreo (Haugen, 2005), la formula para realizar la discretizacion con retensor de orden zero es la siguiente:

$$H(z) = (1 - z^{-1})\mathcal{Z} \left[\mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{G(s)}{s} \right\} \Big|_{t=kh} \right] \quad (12)$$

Existen otros modos de llevar una función de transferencia continua al dominio Z como las aproximaciones de Tustin y Euler, estas consisten en sustituir la variable s por una aproximación en el dominio Z y se sustentan en ser aproximaciones numéricas a integrales en el tiempo, Haugen (2005) afirma que la aproximacion de Tustin es la mas

precisa de las tres, no obstante, sugiere que no existe una diferencia notable entre este y Euler hacia atrás, además, la mayoría de los controladores comerciales vienen con Euler hacia atrás, por lo que puede considerarse una mejor opción a la hora de escoger un método. Las sustituciones correspondientes son:

$$\text{Euler hacia adelante:} \quad s \leftarrow \frac{z-1}{h} \quad (13)$$

$$\text{Euler hacia atrás:} \quad s \leftarrow \frac{z-1}{hz} \quad (14)$$

$$\text{Tustin:} \quad s \leftarrow \frac{2z-1}{h(z+1)} \quad (15)$$

Integración numérica de sistemas de ecuaciones diferenciales ordinarias

Para poder obtener la respuesta del sistema en el tiempo podemos utilizar varios métodos de resolución de ODE's o ecuaciones diferenciales ordinarias, solución exacta, separación de variables o integración numérica aproximada, este último es el mejor para realizar por medio de computadoras. Para realizar la integración numérica y obtener la respuesta del sistema se utilizarán los métodos de Runge-Kutta.

Los métodos de Runge-Kutta son unos métodos iterativos de resolución de ODE's, estos se basan en utilizar “indirectamente el algoritmo de Taylor. En general, estos métodos evalúan $f(x, y)$ en más de un punto en la proximidad (x_n, y_n) en lugar de evaluar derivadas de $f(x, y)$ ” (Martínez, 1997, p.31). La formulación general de los métodos de Runge-Kutta explícitos es:

$$\begin{aligned} k_1 &= f(x_0, y_0) \\ k_2 &= f(x_0 + c_2 h, y_0 + h a_{21} k_1) \\ k_3 &= f(x_0 + c_3 h, y_0 + h(a_{31} k_1 + a_{32} k_2)) \\ &\vdots \\ k_s &= f(x_0 + c_s h, y_0 + h(a_{s1} k_1 + \dots + a_{s,s-1} k_{s-1})) \\ y_1 &= y_0 + h(b_1 k_1 + \dots + b_s k_s) \end{aligned} \quad (16)$$

Donde s denota el numero de escenarios a utilizar, es comun expresar (16) utilizando una tabla de butcher, en honor a John C. Butcher y su articulo de 1964b, por tanto, (16) puede representarse de la siguiente forma:

$$\begin{array}{c|cccc}
 0 & & & & \\
 c_2 & a_{21} & & & \\
 c_3 & a_{31} & a_{32} & & \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \\
 c_s & a_{s1} & a_{s2} & \cdots & a_{s,s-1} \\
 \hline
 & b_1 & b_2 & \cdots & b_{s-1} & b_s
 \end{array} \tag{17}$$

Adicionalmente existen los metodos de Runge-Kutta embebidos, los cuales consisten en calcular dos metodos de orden p y orden \hat{p} respectivamente, donde \hat{p} es normalmente $p - 1$ o $p + 1$ (Martinez, 1997). La tabla de butcher para representar los metodos embebidos es la siguiente:

$$\begin{array}{c|cccc}
 0 & & & & \\
 c_2 & a_{21} & & & \\
 c_3 & a_{31} & a_{32} & & \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \\
 c_s & a_{s1} & a_{s2} & \cdots & a_{s,s-1} \\
 \hline
 & b_1 & b_2 & \cdots & b_{s-1} & b_s \\
 \hline
 & \hat{b}_1 & \hat{b}_2 & \cdots & \hat{b}_{s-1} & \hat{b}_s
 \end{array} \tag{18}$$

$$y_1 = y_0 + h(b_1 k_1 + \cdots + b_s k_s) \quad \text{Orden } p \tag{19}$$

$$\hat{y}_1 = y_0 + h(\hat{b}_1 k_1 + \cdots + \hat{b}_s k_s) \quad \text{Orden } \hat{p} = p - 1 \text{ o } p + 1 \tag{20}$$

De modo que la integracion para el siguiente paso se continua con y_1 , el fin de calcular dos metodos en conjunto es para poder estimar el error y poder realizar un cambio en el tamaño de paso, de este modo, se puede incrementar el tamaño de paso si el error es muy bajo o disminuirlo si el error es inaceptable.

Tamaño de paso variable

Como ya se menciona antes, se puede realizar una adaptacion del tamaño de paso en funcion del error, esto es posible no solo para los metodos embebidos, sino tambien para los explicitos, Rogan y Muñoz (s.f.) afirma que:

Los programas adaptativos continuamente monitorean la solución y modifican el paso de tiempo para asegurar que se mantenga la precisión especificada por el usuario. Esos programas pueden hacer algunos cálculos extras para optimizar la elección de τ , en muchos casos este trabajo extra vale la pena. (p.251)

calculo del error con dos medios pasos. Este es un metodo simple pero eficaz de calcular el error, consiste en realizar un paso simple de tamaño h y comparar su respuesta con la respuesta dada por el mismo metodo al realizar dos pasos de tamaño $\frac{h}{2}$, de este modo el error Δe se puede calcular como la diferencia en valor absoluto de ambas respuestas, $|y_{1,h} - y_{2,\frac{h}{2}}|$ donde $y_{2,\frac{h}{2}}$ es la salida luego de dos medios pasos.

calculo del error para metodos embebidos. Los metodos embebidos estan hechos para poder realizar este calculo del error, por tanto, no hay que realizar ningun calculo extra y el error puede ser calculado de forma directa como $\Delta e = |y_1 - \hat{y}_1|$

Nuevo tamaño de paso. Combinando las formulas y algoritmos descritos por Rogan y Muñoz (s.f.), Hairer, Nørsett y Wanner (1991) y Ritschel (2013) se pueden obtener las formulas para el manejo del error con fines de calcular un nuevo tamaño de paso, lo primero es calcular una escala, este es el unico paso que se diferencia entre el

metodo de dos medios pasos y el los metodos embebidos, esto es debido a al modo en que se calculan los errores, para dos medios pasos la escala es:

$$escala = atol + rtol \cdot \frac{|y_{1,h}| + |y_{2,\frac{h}{2}}|}{2} \quad (21)$$

Para los metodos embebidos:

$$escala = atol + rtol \cdot \max(|y_1|, |y_0|) \quad (22)$$

A partir de aca las formulas son comunes para ambos metodos. Para continuar, se debe realizar el calculo de un error normalizado, para esto se calcula la norma RMS del error dividido por la escala calculada:

$$||\Delta e|| = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\Delta e_i}{escala_i} \right)^2} \quad (23)$$

Donde i denota el numero de elementos que componen la respuesta, finalmente, el nuevo tamaño de paso viene dado por:

$$\begin{cases} h_{t+1} = h_t \cdot max_step_increase & ||\Delta e|| = 0 \\ h_{t+1} = h_t \cdot sf_1 \cdot ||\Delta e||^{\frac{-1}{q+1}} & ||\Delta e|| \leq 1 \\ h_t = h_t \cdot sf_1 \cdot ||\Delta e||^{\frac{-1}{q+1}} & ||\Delta e|| > 1, \text{ Se descarta la salida} \end{cases} \quad (24)$$

Con sf_1 como un factor de seguridad y q como el orden del metodo utilizado, en el caso de los Runge-Kutta embebidos, q viene dado por el metodo de menor orden entre y_1 y \hat{y}_1 , notese que si el error se encuentra por arriba de uno, la salida es descartada y se repite el calculo con un nuevo tamaño de paso, el proceso se repite hasta que el error se encuentre por debajo de uno.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

En este capítulo se abarcará la metodología a emplear en el desarrollo de esta investigación, se definirá el tipo, diseño y modalidad de la investigación, así como las fases de la misma.

Tipo de investigación

Tomando en cuenta los objetivos de la investigación y las bases teóricas que la componen se considera que esta investigación es de tipo proyectiva, esto es debido a que se pretende realizar una propuesta concreta para solventar una problemática, Hurtado de Barrera (2010) afirma que:

La investigación proyectiva tiene como objetivo diseñar o crear propuestas dirigidas a resolver determinadas situaciones. Los proyectos de arquitectura e ingeniería, el diseño de maquinarias, la creación de programas de intervención social, el diseño de programas de estudio, los inventos, la elaboración de programas informáticos, entre otros, siempre que estén sustentados en un proceso de investigación, son ejemplos de investigación proyectiva. (p. 133)

Diseño de la investigación

El diseño de la investigación es no experimental y de tipo transeccional descriptivo, esto es debido a que se describirán los métodos de análisis y diseño de sistemas de control clásicos y difusos, Hernández, Fernández y Lucio (2010) definen la investigación no experimental como:

la investigación que se realiza sin manipular deliberadamente variables. Es decir, se trata de estudios donde no hacemos variar en forma

intencional las variables independientes para ver su efecto sobre otras variables. Lo que hacemos en la investigación no experimental es observar fenómenos tal como se dan en su contexto natural, para posteriormente analizarlos. (p.150)

Modalidad

Esta investigación se encuentra enmarcada en la modalidad de un proyecto factible, debido a que tiene objetivos para atender una necesidad por medio de unas acciones claramente definidas, Dubs de Moya (2002) afirma que:

un proyecto factible consiste en un conjunto de actividades vinculadas entre sí, cuya ejecución permitirá el logro de objetivos previamente definidos en atención a las necesidades que pueda tener una institución o un grupo social en un momento determinado. Es decir, la finalidad del proyecto factible radica en el diseño de una propuesta de acción dirigida a resolver un problema o necesidad previamente detectada en el medio. (pp. 6-7)

Fases de la investigación

Fase 1: Estudio de los sistemas de control clásicos y difusos. En esta fase se procederá a realizar los estudios necesarios en el área de los sistemas de control, esto con la idea de abarcarlos en profundidad y tener un entendimiento claro de su funcionamiento y de la matemática implicada, además, se realizará de forma similar un estudio de controladores difusos con estructura Mamdani y de los esquemas de control difuso.

Fase 2: Codificación de rutinas. Para esta fase con los conocimientos adquiridos de la fase 1, se determinarán que rutinas pueden ser ejecutadas solo con las bibliotecas de python y cuales se deberán codificar de cero, además, se codificarán todas las rutinas necesarias para el funcionamiento del laboratorio virtual, para esto, se hará

uso de las bibliotecas externas de cálculo numérico, control, diseño de controladores difusos y salidas gráficas junto con las que se consideren necesarias.

Fase 3: Interfaz gráfica y enlace con rutinas. En esta fase se realizará la interfaz gráfica para el usuario final, esta interfaz gráfica deberá conectarse y adaptarse a las rutinas previamente codificadas en la fase 2 para su funcionamiento adecuado, en orden de tener diseño acorde se tomarán en cuenta los antecedentes presentados en esta propuesta.

Fase 4: Comparación de resultados. En esta última fase y con el laboratorio de sistemas de control ya en funcionamiento se procederá a analizar los resultados obtenidos y a compararlos con otras herramientas, la evaluación se realizará en función del resultado esperado, facilidad de implementación, velocidad de ejecución, las ventajas y desventajas de cada una de las herramientas.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

Resultados

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam lobortis facilisis sem. Nullam nec mi et neque pharetra sollicitudin. Praesent imperdiet mi nec ante. Donec ullamcorper, felis non sodales commodo, lectus velit ultrices augue, a dignissim nibh lectus placerat pede. Vivamus nunc nunc, molestie ut, ultricies vel, semper in, velit. Ut porttitor. Praesent in sapien. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Duis fringilla tristique neque. Sed interdum libero ut metus. Pellentesque placerat. Nam rutrum augue a leo. Morbi sed elit sit amet ante lobortis sollicitudin. Praesent blandit blandit mauris. Praesent lectus tellus, aliquet aliquam, luctus a, egestas a, turpis. Mauris lacinia lorem sit amet ipsum. Nunc quis urna dictum turpis accumsan semper.

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam lobortis facilisis sem. Nullam nec mi et neque pharetra sollicitudin. Praesent imperdiet mi nec ante. Donec ullamcorper, felis non sodales commodo, lectus velit ultrices augue, a dignissim nibh lectus placerat pede. Vivamus nunc nunc, molestie ut, ultricies vel, semper in, velit. Ut porttitor. Praesent in sapien. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Duis fringilla tristique neque. Sed interdum libero ut metus. Pellentesque placerat. Nam rutrum augue a leo. Morbi sed elit sit amet ante lobortis sollicitudin. Praesent blandit blandit mauris. Praesent lectus tellus, aliquet aliquam, luctus a, egestas a, turpis. Mauris lacinia lorem sit amet ipsum. Nunc quis urna dictum turpis accumsan semper.

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam lobortis facilisis sem. Nullam nec mi et neque pharetra sollicitudin. Praesent imperdiet mi nec ante. Donec ullamcorper, felis non sodales commodo, lectus velit ultrices augue, a dignissim nibh lectus placerat pede. Vivamus nunc nunc, molestie ut, ultricies vel, semper in, velit. Ut

porttitor. Praesent in sapien. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Duis fringilla tristique neque. Sed interdum libero ut metus. Pellentesque placerat. Nam rutrum augue a leo. Morbi sed elit sit amet ante lobortis sollicitudin. Praesent blandit blandit mauris. Praesent lectus tellus, aliquet aliquam, luctus a, egestas a, turpis. Mauris lacinia lorem sit amet ipsum. Nunc quis urna dictum turpis accumsan semper.

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam lobortis facilisis sem. Nullam nec mi et neque pharetra sollicitudin. Praesent imperdiet mi nec ante. Donec ullamcorper, felis non sodales commodo, lectus velit ultrices augue, a dignissim nibh lectus placerat pede. Vivamus nunc nunc, molestie ut, ultricies vel, semper in, velit. Ut porttitor. Praesent in sapien. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Duis fringilla tristique neque. Sed interdum libero ut metus. Pellentesque placerat. Nam rutrum augue a leo. Morbi sed elit sit amet ante lobortis sollicitudin. Praesent blandit blandit mauris. Praesent lectus tellus, aliquet aliquam, luctus a, egestas a, turpis. Mauris lacinia lorem sit amet ipsum. Nunc quis urna dictum turpis accumsan semper.

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam lobortis facilisis sem. Nullam nec mi et neque pharetra sollicitudin. Praesent imperdiet mi nec ante. Donec ullamcorper, felis non sodales commodo, lectus velit ultrices augue, a dignissim nibh lectus placerat pede. Vivamus nunc nunc, molestie ut, ultricies vel, semper in, velit. Ut porttitor. Praesent in sapien. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Duis fringilla tristique neque. Sed interdum libero ut metus. Pellentesque placerat. Nam rutrum augue a leo. Morbi sed elit sit amet ante lobortis sollicitudin. Praesent blandit blandit mauris. Praesent lectus tellus, aliquet aliquam, luctus a, egestas a, turpis. Mauris lacinia lorem sit amet ipsum. Nunc quis urna dictum turpis accumsan semper.

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam lobortis facilisis sem. Nullam nec mi et neque pharetra sollicitudin. Praesent imperdiet mi nec ante. Donec ullamcorper, felis non sodales commodo, lectus velit ultrices augue, a dignissim nibh lectus placerat pede. Vivamus nunc nunc, molestie ut, ultricies vel, semper in, velit. Ut porttitor. Praesent in sapien. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit.

Duis fringilla tristique neque. Sed interdum libero ut metus. Pellentesque placerat. Nam rutrum augue a leo. Morbi sed elit sit amet ante lobortis sollicitudin. Praesent blandit blandit mauris. Praesent lectus tellus, aliquet aliquam, luctus a, egestas a, turpis. Mauris lacinia lorem sit amet ipsum. Nunc quis urna dictum turpis accumsan semper.

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam lobortis facilisis sem. Nullam nec mi et neque pharetra sollicitudin. Praesent imperdiet mi nec ante. Donec ullamcorper, felis non sodales commodo, lectus velit ultrices augue, a dignissim nibh lectus placerat pede. Vivamus nunc nunc, molestie ut, ultricies vel, semper in, velit. Ut porttitor. Praesent in sapien. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Duis fringilla tristique neque. Sed interdum libero ut metus. Pellentesque placerat. Nam rutrum augue a leo. Morbi sed elit sit amet ante lobortis sollicitudin. Praesent blandit blandit mauris. Praesent lectus tellus, aliquet aliquam, luctus a, egestas a, turpis. Mauris lacinia lorem sit amet ipsum. Nunc quis urna dictum turpis accumsan semper.

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam lobortis facilisis sem. Nullam nec mi et neque pharetra sollicitudin. Praesent imperdiet mi nec ante. Donec ullamcorper, felis non sodales commodo, lectus velit ultrices augue, a dignissim nibh lectus placerat pede. Vivamus nunc nunc, molestie ut, ultricies vel, semper in, velit. Ut porttitor. Praesent in sapien. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Duis fringilla tristique neque. Sed interdum libero ut metus. Pellentesque placerat. Nam rutrum augue a leo. Morbi sed elit sit amet ante lobortis sollicitudin. Praesent blandit blandit mauris. Praesent lectus tellus, aliquet aliquam, luctus a, egestas a, turpis. Mauris lacinia lorem sit amet ipsum. Nunc quis urna dictum turpis accumsan semper.

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam lobortis facilisis sem. Nullam nec mi et neque pharetra sollicitudin. Praesent imperdiet mi nec ante. Donec ullamcorper, felis non sodales commodo, lectus velit ultrices augue, a dignissim nibh lectus placerat pede. Vivamus nunc nunc, molestie ut, ultricies vel, semper in, velit. Ut porttitor. Praesent in sapien. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Duis fringilla tristique neque. Sed interdum libero ut metus. Pellentesque placerat. Nam

rutrum augue a leo. Morbi sed elit sit amet ante lobortis sollicitudin. Praesent blandit blandit mauris. Praesent lectus tellus, aliquet aliquam, luctus a, egestas a, turpis. Mauris lacinia lorem sit amet ipsum. Nunc quis urna dictum turpis accumsan semper.

 Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam lobortis facilisis sem. Nullam nec mi et neque pharetra sollicitudin. Praesent imperdiet mi nec ante. Donec ullamcorper, felis non sodales commodo, lectus velit ultrices augue, a dignissim nibh lectus placerat pede. Vivamus nunc nunc, molestie ut, ultricies vel, semper in, velit. Ut porttitor. Praesent in sapien. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Duis fringilla tristique neque. Sed interdum libero ut metus. Pellentesque placerat. Nam rutrum augue a leo. Morbi sed elit sit amet ante lobortis sollicitudin. Praesent blandit blandit mauris. Praesent lectus tellus, aliquet aliquam, luctus a, egestas a, turpis. Mauris lacinia lorem sit amet ipsum. Nunc quis urna dictum turpis accumsan semper.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam lobortis facilisis sem. Nullam nec mi et neque pharetra sollicitudin. Praesent imperdiet mi nec ante. Donec ullamcorper, felis non sodales commodo, lectus velit ultrices augue, a dignissim nibh lectus placerat pede. Vivamus nunc nunc, molestie ut, ultricies vel, semper in, velit. Ut porttitor. Praesent in sapien. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Duis fringilla tristique neque. Sed interdum libero ut metus. Pellentesque placerat. Nam rutrum augue a leo. Morbi sed elit sit amet ante lobortis sollicitudin. Praesent blandit blandit mauris. Praesent lectus tellus, aliquet aliquam, luctus a, egestas a, turpis. Mauris lacinia lorem sit amet ipsum. Nunc quis urna dictum turpis accumsan semper.

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam lobortis facilisis sem. Nullam nec mi et neque pharetra sollicitudin. Praesent imperdiet mi nec ante. Donec ullamcorper, felis non sodales commodo, lectus velit ultrices augue, a dignissim nibh lectus placerat pede. Vivamus nunc nunc, molestie ut, ultricies vel, semper in, velit. Ut porttitor. Praesent in sapien. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Duis fringilla tristique neque. Sed interdum libero ut metus. Pellentesque placerat. Nam rutrum augue a leo. Morbi sed elit sit amet ante lobortis sollicitudin. Praesent blandit blandit mauris. Praesent lectus tellus, aliquet aliquam, luctus a, egestas a, turpis. Mauris lacinia lorem sit amet ipsum. Nunc quis urna dictum turpis accumsan semper.

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam lobortis facilisis sem. Nullam nec mi et neque pharetra sollicitudin. Praesent imperdiet mi nec ante. Donec ullamcorper, felis non sodales commodo, lectus velit ultrices augue, a dignissim nibh lectus placerat pede. Vivamus nunc nunc, molestie ut, ultricies vel, semper in, velit. Ut

porttitor. Praesent in sapien. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Duis fringilla tristique neque. Sed interdum libero ut metus. Pellentesque placerat. Nam rutrum augue a leo. Morbi sed elit sit amet ante lobortis sollicitudin. Praesent blandit blandit mauris. Praesent lectus tellus, aliquet aliquam, luctus a, egestas a, turpis. Mauris lacinia lorem sit amet ipsum. Nunc quis urna dictum turpis accumsan semper.

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam lobortis facilisis sem. Nullam nec mi et neque pharetra sollicitudin. Praesent imperdiet mi nec ante. Donec ullamcorper, felis non sodales commodo, lectus velit ultrices augue, a dignissim nibh lectus placerat pede. Vivamus nunc nunc, molestie ut, ultricies vel, semper in, velit. Ut porttitor. Praesent in sapien. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Duis fringilla tristique neque. Sed interdum libero ut metus. Pellentesque placerat. Nam rutrum augue a leo. Morbi sed elit sit amet ante lobortis sollicitudin. Praesent blandit blandit mauris. Praesent lectus tellus, aliquet aliquam, luctus a, egestas a, turpis. Mauris lacinia lorem sit amet ipsum. Nunc quis urna dictum turpis accumsan semper.

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam lobortis facilisis sem. Nullam nec mi et neque pharetra sollicitudin. Praesent imperdiet mi nec ante. Donec ullamcorper, felis non sodales commodo, lectus velit ultrices augue, a dignissim nibh lectus placerat pede. Vivamus nunc nunc, molestie ut, ultricies vel, semper in, velit. Ut porttitor. Praesent in sapien. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Duis fringilla tristique neque. Sed interdum libero ut metus. Pellentesque placerat. Nam rutrum augue a leo. Morbi sed elit sit amet ante lobortis sollicitudin. Praesent blandit blandit mauris. Praesent lectus tellus, aliquet aliquam, luctus a, egestas a, turpis. Mauris lacinia lorem sit amet ipsum. Nunc quis urna dictum turpis accumsan semper.

Recomendaciones

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam lobortis facilisis sem. Nullam nec mi et neque pharetra sollicitudin. Praesent imperdiet mi nec ante. Donec

ullamcorper, felis non sodales commodo, lectus velit ultrices augue, a dignissim nibh lectus placerat pede. Vivamus nunc nunc, molestie ut, ultricies vel, semper in, velit. Ut porttitor. Praesent in sapien. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Duis fringilla tristique neque. Sed interdum libero ut metus. Pellentesque placerat. Nam rutrum augue a leo. Morbi sed elit sit amet ante lobortis sollicitudin. Praesent blandit blandit mauris. Praesent lectus tellus, aliquet aliquam, luctus a, egestas a, turpis. Mauris lacinia lorem sit amet ipsum. Nunc quis urna dictum turpis accumsan semper.

 Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam lobortis facilisis sem. Nullam nec mi et neque pharetra sollicitudin. Praesent imperdiet mi nec ante. Donec ullamcorper, felis non sodales commodo, lectus velit ultrices augue, a dignissim nibh lectus placerat pede. Vivamus nunc nunc, molestie ut, ultricies vel, semper in, velit. Ut porttitor. Praesent in sapien. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Duis fringilla tristique neque. Sed interdum libero ut metus. Pellentesque placerat. Nam rutrum augue a leo. Morbi sed elit sit amet ante lobortis sollicitudin. Praesent blandit blandit mauris. Praesent lectus tellus, aliquet aliquam, luctus a, egestas a, turpis. Mauris lacinia lorem sit amet ipsum. Nunc quis urna dictum turpis accumsan semper.

 Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam lobortis facilisis sem. Nullam nec mi et neque pharetra sollicitudin. Praesent imperdiet mi nec ante. Donec ullamcorper, felis non sodales commodo, lectus velit ultrices augue, a dignissim nibh lectus placerat pede. Vivamus nunc nunc, molestie ut, ultricies vel, semper in, velit. Ut porttitor. Praesent in sapien. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Duis fringilla tristique neque. Sed interdum libero ut metus. Pellentesque placerat. Nam rutrum augue a leo. Morbi sed elit sit amet ante lobortis sollicitudin. Praesent blandit blandit mauris. Praesent lectus tellus, aliquet aliquam, luctus a, egestas a, turpis. Mauris lacinia lorem sit amet ipsum. Nunc quis urna dictum turpis accumsan semper.

 Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam lobortis facilisis sem. Nullam nec mi et neque pharetra sollicitudin. Praesent imperdiet mi nec ante. Donec ullamcorper, felis non sodales commodo, lectus velit ultrices augue, a dignissim nibh

lectus placerat pede. Vivamus nunc nunc, molestie ut, ultricies vel, semper in, velit. Ut porttitor. Praesent in sapien. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Duis fringilla tristique neque. Sed interdum libero ut metus. Pellentesque placerat. Nam rutrum augue a leo. Morbi sed elit sit amet ante lobortis sollicitudin. Praesent blandit blandit mauris. Praesent lectus tellus, aliquet aliquam, luctus a, egestas a, turpis. Mauris lacinia lorem sit amet ipsum. Nunc quis urna dictum turpis accumsan semper.

 Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam lobortis facilisis sem. Nullam nec mi et neque pharetra sollicitudin. Praesent imperdiet mi nec ante. Donec ullamcorper, felis non sodales commodo, lectus velit ultrices augue, a dignissim nibh lectus placerat pede. Vivamus nunc nunc, molestie ut, ultricies vel, semper in, velit. Ut porttitor. Praesent in sapien. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Duis fringilla tristique neque. Sed interdum libero ut metus. Pellentesque placerat. Nam rutrum augue a leo. Morbi sed elit sit amet ante lobortis sollicitudin. Praesent blandit blandit mauris. Praesent lectus tellus, aliquet aliquam, luctus a, egestas a, turpis. Mauris lacinia lorem sit amet ipsum. Nunc quis urna dictum turpis accumsan semper.

REFERENCIAS

- Casallas, R., Chacón, R., y Rivera, F. P. (2005). Desarrollo básico de un Laboratorio Virtual de Control de Procesos basado en Internet. *Acción pedagógica*, 14(1), 58-65. Recuperado el 16 de junio de 2019, desde <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/2969002.pdf>
- Congo, J. W. (2018). *Aplicaciones del software libre Python para prácticas de laboratorio aplicado a la asignatura de tratamiento digital de señales de la Universidad Tecnológica Israel* (Tesis de pregrado, Universidad Tecnológica Israel, Ecuador). Recuperado el 9 de junio de 2019, desde <http://157.100.241.244/bitstream/47000/1626/1/UISRAEL-EC-ELDT-378.242-2018-042.pdf>
- Creus, A. (2010). *Instrumentación Industrial* (8.^a ed.). Barcelona, España: Alfaomega.
- Dubs de Moya, R. (2002). El Proyecto Factible: una modalidad de investigación. *Sapiens. Revista Universitaria de Investigación*, 3(2). Recuperado el 15 de junio de 2019, desde <http://www.redalyc.org/pdf/410/41030203.pdf>
- Gómez, J. C. (2009). Toolbox didáctico para el diseño y análisis de sistemas de control lineal. *Revista Educación en Ingeniería*, 4(8), 155-169. Recuperado el 13 de junio de 2019, desde <http://www.educacioneningenieria.org/index.php/edi/article/download/96/86>
- Hairer, E., Nørsett, S. P., y Wanner, G. (1991). *Solving ordinary differential equations I, Nonstiff problems*. Alemania: Springer-Vlg.
- Haugen, F. (2005). Discrete-time signals and systems. Recuperado el 18 de septiembre de 2019, desde http://techteach.no/publications/discretetime_signals_systems/discrete.pdf
- Hernández, R., Fernández, C., y Lucio, M. d. P., Baptista. (2010). *Metodología de la investigación* (5.^a ed.). México: McGraw-hill.
- Hurtado de Barrera, J. (Ed.). (2010). *Guía para la comprensión holística de la ciencia*. Caracas, Venezuela: Fundación Sygal.

- Kuo, B. C. (1996). *Sistemas de control automático* (7.^a ed.). México: Prentice Hall Hispanoamericana.
- Martinez, H. (1997). *Métodos Numéricos*. México: Tecnológico de Monterrey. Recuperado el 18 de septiembre de 2019, desde <http://www.mty.itesm.mx/dtie/deptos/cb/cb00854-1/Apuntes/HMA/MN06fED.pdf>
- Ogata, K. (2003). *Ingeniería de control moderna* (5.^a ed.). Madrid, España: Pearson Educación.
- Ritschel, T. (2013). *Numerical Methods For Solution of Differential Equations* (Tesis de bachillerato, Technical University of Denmark, Dinamarca). Recuperado el 5 de septiembre de 2019, desde http://www2.imm.dtu.dk/pubdb/views/edoc_download.php/6607/pdf/imm6607.pdf
- Rogan, J., y Muñoz, V. (s.f.). PROGRAMACION Y METODOS NUMERICOS. *Departamento de Física, Universidad de Chile*. Recuperado el 18 de septiembre de 2019, desde https://macul.ciencias.uchile.cl/~vmunoz/homepage/cursos/programacion_avanzada/2012/mfm0-09.pdf
- Salazar, L. J. (2019). *Diseño de un sistema de riego inteligente para cultivos de hortalizas basado en Fuzzy Logic en la granja la pradera de la Universidad Técnica del Norte* (Tesis de pregrado, Universidad Técnica del Norte, Ecuador). Recuperado el 8 de junio de 2019, desde <http://repositorio.utn.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/9137/1/04%5C%20RED%5C%20219%5C%20TRABAJO%5C%20DE%5C%20GRADO.pdf>
- Sánchez, J. A. (2003). *Control avanzado de procesos:(teoría y práctica)*. Madrid, España: Ediciones Díaz de Santos.
- Smith, C. A., y Corripio, A. B. (1985). *Principles and practice of automatic process control* (2.^a ed.). New York, United States: Wiley New York.
- Suárez, M. Á. (2014). *Ciencias e Ingeniería para estudiantes de Python*. Recuperado el 7 de junio de 2019, desde https://www.researchgate.net/publication/313664762_Ciencias_e_Ingenieria_para_estudiantes_de_Python

[Anexo A]

[Titulo del anexo]

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam lobortis facilisis sem. Nullam nec mi et neque pharetra sollicitudin. Praesent imperdiet mi nec ante. Donec ullamcorper, felis non sodales commodo, lectus velit ultrices augue, a dignissim nibh lectus placerat pede. Vivamus nunc nunc, molestie ut, ultricies vel, semper in, velit. Ut porttitor. Praesent in sapien. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Duis fringilla tristique neque. Sed interdum libero ut metus. Pellentesque placerat. Nam rutrum augue a leo. Morbi sed elit sit amet ante lobortis sollicitudin. Praesent blandit blandit mauris. Praesent lectus tellus, aliquet aliquam, luctus a, egestas a, turpis. Mauris lacinia lorem sit amet ipsum. Nunc quis urna dictum turpis accumsan semper.

[Anexo B]

[Titulo de otro anexo]

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam lobortis facilisis sem. Nullam nec mi et neque pharetra sollicitudin. Praesent imperdiet mi nec ante. Donec ullamcorper, felis non sodales commodo, lectus velit ultrices augue, a dignissim nibh lectus placerat pede. Vivamus nunc nunc, molestie ut, ultricies vel, semper in, velit. Ut porttitor. Praesent in sapien. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Duis fringilla tristique neque. Sed interdum libero ut metus. Pellentesque placerat. Nam rutrum augue a leo. Morbi sed elit sit amet ante lobortis sollicitudin. Praesent blandit blandit mauris. Praesent lectus tellus, aliquet aliquam, luctus a, egestas a, turpis. Mauris lacinia lorem sit amet ipsum. Nunc quis urna dictum turpis accumsan semper.