



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN CONTROL Y REDES
INDUSTRIALES

“DISEÑO DE UN CONTROL AUTO SINTONIZADO USANDO
SOFTWARE DE CONTROL LABVIEW PARA LA PLANTA QNET
VERTICAL TAKE-OFF AND LANDING (VTOL).”

Trabajo de titulación presentado para optar al grado académico de:
INGENIERO EN ELECTRÓNICA, CONTROL Y REDES
INDUSTRIALES

AUTOR: JUAN JOSÉ VILLAGÓMEZ PESANTEZ
TUTOR: ING. JORGE LUIS PAUCAR SAMANIEGO

Riobamba – Ecuador

2017

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA

ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN CONTROL Y REDES INDUSTRIALES

El tribunal del trabajo de titulación certifica que: El trabajo de titulación: “DISEÑO DE UN CONTROL AUTO SINTONIZADO USANDO SOFTWARE DE CONTROL LABVIEW PARA LA PLANTA QNET VERTICAL TAKE-OFF AND LANDING (VTOL).”, de responsabilidad del Señor JUAN JOSÉ VILLAGÓMEZ PESANTEZ, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Titulación, quedando autorizada su presentación.

NOMBRE	FIRMA	FECHA
Dr. Whashington Luna E. DECANO DE LA FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA
Ing. Freddy Chavez V. DIRECTOR DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN CONTROL Y REDES INDUSTRIALES
Ing. Jorge Luis Paucar S. DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN
Ing. Fausto Cabrera A. MIEMBRO DEL TRIBUNAL

DERECHOS DE AUTOR

Yo, JUAN JOSÉ VILLAGÓMEZ PESANTEZ, soy responsable de las ideas, doctrinas y resultados, expuestos en este trabajo, y el patrimonio intelectual del Trabajo de Titulación pertenece a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO.

Juan José Villagómez Pesantez

060409866-5

DEDICATORIA

Este trabajo va dedicado a mi familia por ser el pilar fundamental de mi existencia, a mis padres por saber inculcar en mi los valores y principios que han hecho de mi la persona que soy en la actualidad, de manera muy especial dedico este trabajo a mi hermano Marcelo Javier, quien sin duda ha sido y será siempre mi mejor escuela de vida, y de manera especial a María Andrea por ser esa persona tan incondicional.

Juan José

AGRADECIMIENTO

A Dios por permitirme culminar una etapa tan importante en mi vida, por guiarme y bendecirme con todas las oportunidades que se me han presentado en esta faceta.

A la Facultad de Informática y Electrónica por la impartición los conocimientos técnicos y humanísticos que me permitirán desarrollarme al más alto nivel en el mundo laboral actual.

A mis padres por ser el mejor ejemplo de: trabajo, dedicación, constancia, esfuerzo. Cualidades que son mi mayor motivación personal y que me impulsan a ser una mejor persona cada día.

De manera muy especial quiero agradecer a mi amigo el Ing. Jorge Luis Paucar Samaniego, quien siempre ha demostrado incondicionalmente su gran calidad humana en cada uno de sus actos, quiero agradecerle por toda la ayuda siempre tan oportuna brindada durante el desarrollo de mi carrera y mi trabajo de titulación.

Juan José

TABLA DE CONTENIDOS

DERECHOS DE AUTOR	ii
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTO	iv
ÍNDICE DE TABLAS.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	x
INDICE DE ANEXOS	xi
ÍNDICE DE ECUACIONES	xii
ÍNDICE DE ABREVIATURAS	xiii
RESUMEN	xiv
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I.....	4
1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL	4
1.1 Aeronaves.....	4
1.1.1. <i>Despegue y Aterrizaje Vertical (VTOL)</i>	5
1.2. Planta QNET VTOL	6
1.2.1. <i>Esquema de funcionamiento de la planta QNET VTOL</i>	9
1.2.2. <i>Requerimientos de Hardware y Software</i>	11
1.3. Los software de control	12
1.4. Modelamiento matemático.....	14
1.4.1. <i>Modelamiento de la planta QNET VTOL</i>	15
1.5. Diseño de controladores	16
1.5.1. <i>Clasificación de los controladores</i>	16
1.5.2. <i>Métodos de sintonización de controladores</i>	18
1.6. Criterios integrales del error	20
CAPITULO II	22
2 MARCO METODOLÓGICO	22
2.1 Aspectos básicos de la planta QNET VTOL.....	22
2.1.1 <i>Análisis del funcionamiento básico de la planta QNET VTOL</i>	23
2.2 Modelamiento de la planta QNET VTOL	24
2.2.1 <i>Desarrollo del modelamiento analítico de la planta QNET VTOL</i>	27
2.3 Diseño del controlador	36
2.3.1 <i>Sintonización fina de los parámetros del controlador</i>	39
2.4 Diseño del instrumento virtual (VI)	40

CAPITULO III.....	47
3 MARCO DE RESULTADOS	47
3.1 Validación del modelo matemático.....	47
3.2 Validación del controlador obtenido con ziegler & nichols	51
3.3 Resultado comparativo entre controladores.....	52
3.4 Evaluación de los controladores con criterios integrales	54
3.5 Sistematización de resultados	56
3.5.1 <i>¿Es factible diseñar un control auto sintonizado para la planta QNET Vertical Take-off and Landing (VTOL) usando software de control LABVIEW en lazo cerrado?</i>	56
3.5.2 <i>¿Qué método será el más óptimo a ser utilizado para el modelamiento experimental?</i>	56
3.5.3 <i>¿Bajo qué criterio de sintonización se desarrollaría el controlador?</i>	56
3.5.4 <i>¿Qué ventaja obtendremos al determinar un algoritmo de auto sintonización? ..</i>	57
3.5.5 <i>¿El controlador realizado cumplirá con los criterios integrales del error en específico IAE e ITAE?</i>	57
CONCLUSIONES.....	58
RECOMENDACIONES.....	60
BIBLIOGRAFIA.....	
ANEXOS.....	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1	Partes constitutivas de la planta QNET VTOL.....	8
Tabla 2-1	Parámetros de la planta QNET VTOL.	9
Tabla 3-1	Analogías entre movimiento de traslación y sistema eléctrico.	15
Tabla 1-2	Posición angular frente a voltaje aplicado.	27
Tabla 2-2	Resultados obtenidos de la frecuencia natural.	31
Tabla 3-2	Valores obtenidos de modelamiento analítico.....	36
Tabla 1-3	Valores obtenidos de controlador con método del escalón.....	51
Tabla 2-3	Resultados de la validación de controlador Ziegler and Nichols.....	52
Tabla 3-3	Valores obtenidos de controlador con método experimental.....	52
Tabla 4-3	Valores obtenidos de la primera prueba comparativa.	53
Tabla 5-3	Valores obtenidos de la segunda prueba comparativa.....	53
Tabla 6-3	Valores obtenidos de la tercera prueba comparativa.....	54

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1	Aeronave de tipo militar.....	4
Figura 2-1	Aeronave de combate F-16.....	5
Figura 3-1	Globo aerostático.....	5
Figura 4-1	Aeronave VTOL.....	6
Figura 5-1	QNET VTOL conectada a NI ELVIS II.....	7
Figura 6-1	Vista frontal de la planta QNET VTOL.....	7
Figura 7-1	Vista lateral de la planta QNET VTOL.....	8
Figura 8-1	Motor DC San Ace 60.....	10
Figura 9-1	Panel frontal LabVIEW.....	13
Figura 10-1	Diagrama de bloques LabVIEW.....	13
Figura 11-1	Entorno del software Matlab.....	14
Figura 12-1	Lazo básico de control.....	16
Figura 13-1	Método de la respuesta al escalón.....	19
Figura 14-1	Caracterización de la respuesta en escalón.....	19
Figura 15-1	Parámetros del controlador para método del escalón.....	20
Figura 1-2	Conexión de la planta QNET VTOL al ELVIS II.....	22
Figura 2-2	Diagrama de conexión NI ELVIS II.....	23
Figura 3-2	Diagrama de fuerzas de la planta.....	24
Figura 4-2	Panel frontal de la prueba en lazo abierto.....	29
Figura 5-2	Diagrama de bloques de la prueba en lazo abierto.....	30
Figura 6-2	Datos obtenidos de la respuesta al escalón.....	39
Figura 7-2	Diagrama de bloques de acondicionamiento de la señal.....	41
Figura 8-2	Diagrama de bloques del controlador utilizado.....	42
Figura 9-2	Diagrama de limitación de variables manipuladas.....	43
Figura 10-2	Diagrama de bloques de IAE.....	44
Figura 11-2	Diagrama de bloques de ITAE.....	44
Figura 12-2	Panel frontal del instrumento virtual desarrollado.....	45
Figura 13-2	Salidas del instrumento virtual desarrollado.....	45
Figura 14-2	Entradas del instrumento virtual desarrollado.....	46
Figura 15-2	Entradas del instrumento virtual desarrollado.....	46
Figura 1-3	Validación del modelo encontrado con Ident.....	48
Figura 2-3	Entradas y salidas del modelo encontrado.....	48
Figura 3-3	Validación del modelo encontrado con n4sid.....	49
Figura 4-3	Validación del modelo analítico con Ident.....	50

Figura 5-3	Entradas y salidas del modelo analítico.....	50
Figura 6-3	Validación del modelo analítico con n4sid.....	51

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-1	Esquema de funcionamiento de la planta QNET VTOL.....	9
Gráfico 1-2	Diagrama de bloques del movimiento de la planta QNET VTOL	26
Gráfico 2-2	Diagrama de flujo calculo corriente de equilibrio.....	28
Gráfico 3-2	Determinación grafica de M_p y t_p	31
Gráfico 4-2	Respuesta del sistema frente a señal tipo escalón.....	37
Gráfico 1-3	Gráfico de valores obtenidos de IAE.....	55
Gráfico 2-3	Gráfico de valores obtenidos de ITAE.....	55

INDICE DE ANEXOS

Anexo A Datasheet Motor DC San Ace 60

Anexo B Guía de Laboratorio

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1-1	Sumatoria de torques.....	15
Ecuación 2-1	Movimiento de traslación	15
Ecuación 3-1	Movimiento de rotación.....	16
Ecuación 4-1	Criterio IAE.....	21
Ecuación 5-1	Criterio ITAE.....	21
Ecuación 1-2	Diagrama de fuerzas brazo VTOL.....	25
Ecuación 2-2	Movimientos angulares brazo VTOL.....	25
Ecuación 3-2	Función de transferencia brazo VTOL.....	26
Ecuación 4-2	Ecuación del Sobre impulso	30
Ecuación 5-2	Ecuación del coeficiente de amortiguación.....	30
Ecuación 6-2	Ecuación del tiempo pico.....	30

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

QNET	Entrenador Quanser NI ELVIS
VTOL	Despegue y aterrizaje vertical
VI	Instrumento Virtual
PID	Proporcional Integral Derivativo
IAE	Integral del error absoluto
ITAE	Integral por el tiempo del error absoluto
V	Voltaje (Voltios)
A	Corriente (Amperios)
DC	Corriente Directa
RPM	Revoluciones por minuto
PC	Computadora Personal

RESUMEN

El presente trabajo tuvo como objetivo el diseño de un control auto sintonizado usando software de control LabVIEW para la planta QNET VERTICAL TAKE-OFF AND LANDING (VTOL). Este sistema simula el despegue y aterrizaje vertical de una aeronave de 1 grado de libertad ,con el uso de este software se desarrolló un instrumento virtual que realiza el control del sistema de vuelo con la aplicación de un controlador de tipo proporcional integral derivativo (PID), para cumplir este objetivo se obtuvo de forma analítica un modelo matemático del sistema mecánico de la planta basado en la primera y segunda ley de Newton, para la obtención de los valores del controlador se utilizó el primer método de sintonización expuesto por Ziegler & Nichols en 1943, una vez obtenidos los parámetros del compensador se realizó la auto sintonización del sistema usando herramientas del software, esto con el fin de optimizar el rendimiento del sistema QNET cuando está en vuelo, los controladores obtenidos se los evaluaron utilizando dos criterios integrales del error, integral del error absoluto (IAE), integral del tiempo por el error absoluto (ITAE), dando como resultado un incremento en la eficiencia del compensador en un 45%, las pruebas se enfocaron en introducir diferentes perturbaciones que modifiquen la planta en tiempo real. Se concluyó que el sistema está en la capacidad de realizar una auto sintonización en tiempo real de los parámetros del PID con el fin de mejorar la respuesta del sistema. Se recomienda evaluar este algoritmo de control sobre dispositivos VTOL con más de un 1 grado de libertad.

PALABRAS CLAVE: <TECNOLOGÍA Y CIENCIAS DE LA INGENIERÍA>, <CONTROL AUTOMÁTICO>, <CONTROL AUTO SINTONIZADO>, <LABVIEW (SOFTWARE)>, <MODELAMIENTO>, <CRITERIO INTEGRAL ABSOLUTO DEL ERROR>, <ENTRENADOR QUANSER NI ELVIS (QNET)>, <DESPEGUE Y ATERRIZAJE VERTICAL (VTOL)>.

ABSTRACT

The current research had like objective the design of an auto-tuning control using a control software LabVIEW for the plant QNET VERTICAL TAKE-OFF AND LANDING (VTOL). This system simulates the vertical take-off and landing of a one freedom degree airship, with the use of this software a virtual instrument that realize the control of flight system was developed with the application of a proportional integral derivative controller (PID), in order to fulfil this objective was obtained of analytic way a math model of the plant's mechanical system, based on first and second Newton's Law, for getting the controller values, the first method of tuning presented by Ziegler and Nichols in 1943 was used, once obtained the compensator parameters the auto-tuning of system was carried out using software tools, with the purpose of organizing the system's performance QNET when it is flying, the controllers were evaluated using two integral criteria of error, integral of absolute error (IAE), integral of time by absolute error (ITAE), getting like result an increasing in the compensator efficiency in a 45%, the tests were focused on introduce different disturbances than modify the plant in real time. It was concluded that the system is able to do an auto-tuning in real time of the parameters of PID in order to improve the system response. It is recommended to evaluate this control algorithm over devices VTOL with more than one freedom degree.

KEY WORDS: <TECHNOLOGY AND SCIENCES OF ENGINEERING>, <AUTOMATIC CONTROL>, <AUTO-TUNING CONTROL>, <LABVIEW (SOFTWARE)>, <MODELING>, <INTEGRAL ABSOLUTE ERROR CRITERIA>, < QUANSER NI ELVIS TRAINER (QNET)>, <VERTICAL TAKE-OFF AND LANDING (VTOL)>.

INTRODUCCIÓN

ANTECEDENTES

En los últimos años el estudio del control automático ha crecido de una manera desmedida por la importancia que se ha dado a nuevos sistemas controlados, autónomos, programables, etc. Los cuales encierran un sin número de posibilidades de control, esta es la razón por lo cual la creciente demanda del desarrollo de sistemas basados en controladores robustos para obtener los resultados idóneos esperados.

El modelamiento de una planta o un proceso es muy importante para el diseño de su sistema de control, ya que permite idear su dinámica y comportamiento ante diferentes circunstancias, entradas, perturbaciones, ruido, cualquier fenómeno que pueda afectar de manera directa al normal funcionamiento de la planta.

La planta QNET VTOL, fue desarrollada por la compañía canadiense Quanser, quien en conjunto con National Instruments han construido una serie de sistemas denominados QNET, construidos específicamente con el fin de ser utilizados en un tarjeta NI ELVIS II, de esta manera con el desarrollo de instrumentos virtuales (VI), el usuario podrá interactuar con la planta a través de un PC para el control de la misma.

En el diseño de los parámetros de los controladores, es común prestar especial atención al comportamiento del error, el cual es la diferencia entre la respuesta de la planta y el valor deseado de la operación establecida, existen herramientas matemáticas basadas en los criterios integrales el error que son usados como indicadores de la eficiencia del compensador diseñado.

FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Es factible diseñar un control auto sintonizado para la planta QNET Vertical Take-off and Landing (VTOL) usando software de control LABVIEW en lazo cerrado?

¿Qué método será el más óptimo a ser utilizado para el modelamiento experimental?

¿Bajo qué criterio de sintonización se desarrollaría el controlador?

¿Qué ventaja obtendremos al determinar un algoritmo de auto sintonización?

¿El controlador realizado cumplirá con los criterios integrales del error en específico IAE e ITAE?

JUSTIFICACIÓN

El diseño de un control auto sintonizado para la planta QNET VTOL se sustenta en el desarrollo de instrumentos virtuales (VI), con el uso de las diferentes herramientas que nos proporcionan los software de control LabVIEW y Matlab, las mismas que permiten resolver el problema establecido.

Estos instrumentos virtuales se desarrollaron con el fin de crear aplicaciones amigables con los usuarios para esta planta en específico, de modo que permita a los estudiantes de la asignatura de control automático realizar estudios prácticos a manera de laboratorios sobre el modelamiento analítico basado en las leyes que rigen la dinámica del sistema, el diseño de controladores, y la evaluación de los compensadores obtenidos.

El presente trabajo busca dar como pauta el uso de las plantas QNET con el fin de realizar estudios sobre su funcionamiento, y sus aplicaciones en el área del control automático, puesto que en la actualidad no existen instrumentos virtuales desarrollados para ninguna de las plantas QNET con las que disponen la Facultad de Informática y Electrónica.

ALCANCE Y DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACION

El estudio realizado sobre el diseño del control auto sintonizado con el software LabVIEW, se aplica en la placa QNET VTOL, con el fin de entender su funcionamiento básico, obtener un modelo matemático que represente la dinámica de la planta, el diseño de un controlador clásico de tipo PID, la sintonización fina de los parámetros del controlador en tiempo real, y la evaluación de los controladores obtenidos bajo las herramientas matemáticas de los criterios integrales del error.

La planta QNET VTOL tiene sus características de fábrica establecidas, por lo cual el estudio se lo realiza en función a dichas características, puesto que no es posible cambiar de ninguna manera el hardware que constituye a la planta, así como su control se lo debe realizar con la programación de instrumentos virtuales en el software de control LabVIEW específicamente.

OBJETIVOS

Objetivo General:

Diseñar un control auto sintonizado con el uso de software de control LabVIEW para la planta QNET Vertical Take-off and Landing (VTOL)

Objetivos Específicos:

- Estudiar y entender el funcionamiento de la planta QNET (VTOL) como pauta para el desarrollo del presente trabajo con el uso de LABVIEW
- Desarrollar un modelo experimental para la planta y comprobar su respuesta en lazo cerrado con el uso de LABVIEW
- Determinar el controlador clásico más adecuado para la planta QNET (VTOL), con el uso de software de control.
- Elegir un algoritmo apropiado de auto sintonización que se acople a las necesidades de la planta usando software de control.
- Validar el funcionamiento del control diseñado basado en el criterio integral del error IAE/ITAE, utilizando la planta bajo perturbaciones
- Desarrollar una guía de laboratorio didáctica para la elaboración posterior de laboratorios a fines a la investigación

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

1.1 Aeronaves

Las aeronaves son todos aquellos elementos, que tienen la capacidad de transportarse en el medio aéreo, es decir, necesitan del aire para poder desplazarse de un lugar a otro. De esta manera las aplicaciones que pueden tener estas son diversas desde vehículos de transporte de pasajero, elementos de carga, aplicaciones militares como se observa en la Figura 1-1.

Cuando hablamos de aeronave pensamos inmediatamente en aviones, helicópteros o avionetas, pero un factor elemental para caracterizarla es su aerodinámica para propulsarse y sostenerse en el aire, se las pueden clasificar de manera general en dos grupos, los Aerodinos y los Aerostatos.

Los aerodinos son las aeronaves que su peso es mayor al del aire y, por lo tanto, tienen que lograr sustentarse a través de algún mecanismo, un ejemplo de estas se representa en la Figura 2-1. Por su parte los aerostatos con un peso inferior al del aire, tienden a flotar con mayor facilidad, el ejemplo más común es el globo aerostático como el de la Figura 3-1.

Otra manera de clasificar las aeronaves es por su tipo de despegue y aterrizaje, los más comunes son: despegue y aterrizaje convencionales (CTOL), el ejemplo más claro son los aviones de las aerolíneas comerciales, generalmente usan aeropuertos. El despegue y aterrizaje corto (STOL) son aeronaves que por sus características están en la capacidad de despegar y aterrizar en pequeñas pistas, como las de un barco. Por otra parte, el despegue y aterrizaje vertical (VTOL), es una capacidad de aeronaves como los helicópteros que no requieren de una pista para aterrizar o despegar.



Figura 1-1 Aeronave de tipo militar

Fuente: https://www.aero.upm.es/a_militares/aviones_militares_clip_image011_0000.jpg



Figura 2-1 Aeronave de combate F-16

Fuente: https://www.aero.upm.es/a_militares/aviones_militares_clip_image013.jpg



Figura 3-1 Globo aerostático

Fuente [http://4.bp.blogspot.com/GLOBOS%2BAEROSTICOS%2B\(25\).png](http://4.bp.blogspot.com/GLOBOS%2BAEROSTICOS%2B(25).png):

1.1.1. Despegue y Aterrizaje Vertical (VTOL)

VTOL (Vertical Take off and Landing) de sus siglas en inglés, el despegue y aterrizaje vertical siempre ha sido de gran interés en la ingeniería aeronáutica, por el deseo de ser capaces de despegar sin necesidad de una larga pista y de igual manera aterrizar en condiciones similares, por otro lado, la historia del VTOL es casi tan antigua como la aviación misma, en la Figura 4-1 se muestra una de las primeras aeronaves VTOL

En 1928 a Nikola Tesla se le concedieron unas patentes para aparatos de transporte aéreo. Es uno de los primeros ejemplos de un avión de capacidades VTOL. A finales de los años 50 y principios de los 60 casi todos los diseños de cazas militares incluían ciertas capacidades VTOL. (Palazzesi, 2010)



Figura 4-1 Aeronave VTOL

Fuente: <http://www.neoteo.com/vtol-historia-del-vuelo-vertical>

En la actualidad podemos determinar que la evolución de las aeronaves de tipo VTOL, es muy significativa en cuestión del desarrollo de los sistemas de control mucho más robustos que se han desarrollado, por otro lado, sus altos costos de operación y mantenimiento, hacen que sean aeronaves utilizadas solo en casos especiales, cuando las naves convencionales no puedan aterrizar.

Los helicópteros y los drones son las aeronaves más reconocidas hoy en día que poseen estas características de despegue y aterrizaje vertical, las actividades más comunes de este tipo de aeronaves suelen ser el transporte de personas o equipos médicos que atienden emergencias, así como para uso policial, militar entre otros.

1.2. Planta QNET VTOL

La planta QNET VTOL es un sistema versátil que está diseñado para entender de mejor manera la teoría del control de vuelo, para que este sistema funcione dispone de dos elementos indispensables, el primero un motor DC que funciona como el propulsor del sistema dinámico de la planta, y segundo un Encoder que tiene como objetivo determinar la posición angular del sistema dinámico de la planta en tiempo real, en la Figura 5-1 podemos observar la planta QNET VTOL conectado al NI ELVIS II.

La planta está dividida en 14 partes, que son enlistadas en la Tabla 1-1, la misma que hace referencia a la Figura 6-1, y la Figura 7-1, respectivamente



Figura 5-1 QNET VTOL conectada a NI ELVIS II
 Fuente: Manual de usuario planta QNET VTOL 2.0

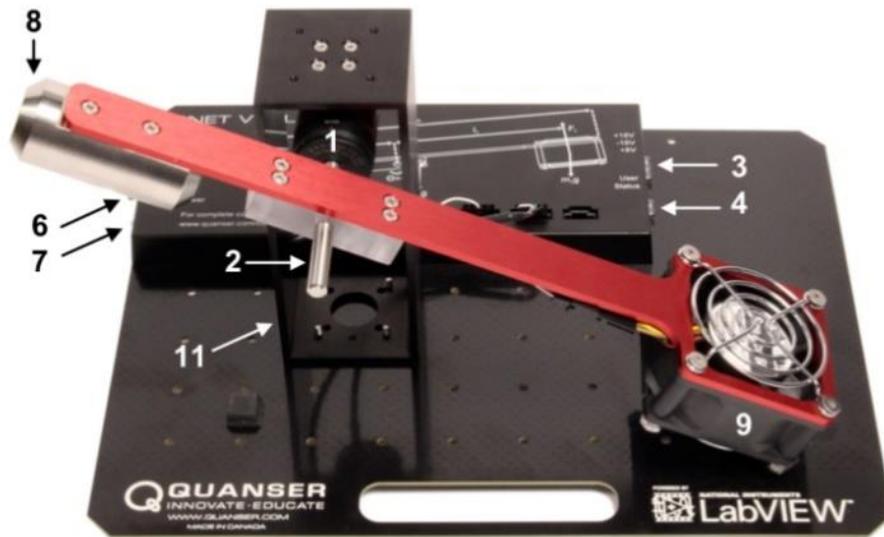


Figura 6-1 Vista frontal de la planta QNET VTOL
 Fuente: Manual de usuario planta QNET VTOL 2.0

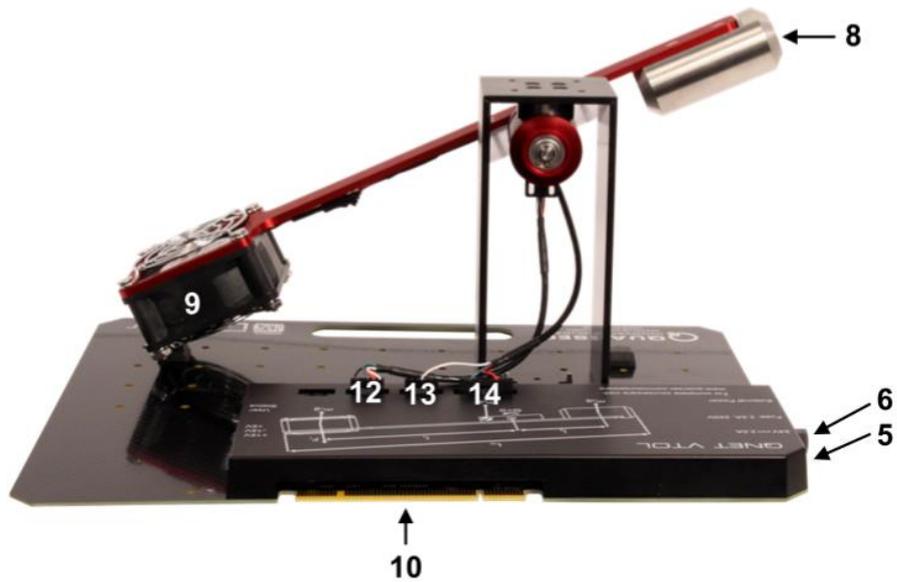


Figura 7-1 Vista lateral de la planta QNET VTOL

Fuente: Manual de usuario planta QNET VTOL 2.0

Tabla 1-1 Partes constitutivas de la planta QNET VTOL

NÚMERO	DESCRIPCIÓN
1	Encoder de alta resolución
2	Pivote del VTOL
3	Led's indicadores de voltaje
4	Led's de usuario y estado
5	Puerto de alimentación del VTOL 24v
6	Fusible
7	Led indicador de conexión a la fuente de poder
8	Contra peso
9	Motor DC ventilador
10	Conector PCI, conector con ELVIS II
11	Soporte metálico de la parte dinámica del VTOL
12	Conector de Encoder de 5 pines
13	Conector de Encoder de 5 pines
14	Conector de amplificador de 8 pines

Realizado por: Juan José Villagomez, 2017

Fuente: Manual de usuario planta QNET VTOL 2.0

En la tabla 2-1, se especifican los parámetros constantes de la planta QNET VTOL, los mismos que serán pauta para el cálculo matemático del modelamiento analítico.

Tabla 2-1 Parámetros de la planta QNET VTOL

SIMBOLO	DRESCRIPCION	VALOR
M1	Masa de contra peso	258 gr
M2	Masa del ventilador	127 gr
M3	Masa del cuerpo VTOL	60 gr
L1	Longitud entre pivote y el centro del contra peso	72.5 mm
L2	Longitud entre pivote y el centro del ventilador	155 mm
L3	Longitud entre pivote y el centro del cuerpo de enlace	7 mm
B	Amortiguamiento viscoso estimado del pivote	0.002 Nm/(rad/s)

Realizado por: Juan José Villagomez, 2017
Fuente: Manual de usuario planta QNET VTOL 2.0

1.2.1. Esquema de funcionamiento de la planta QNET VTOL

En el gráfico 1-1, se muestra a manera de bloques la interacción entre los diferentes componentes del sistema QNET VTOL, el NI ELVIS II se conecta a la PC mediante un cable USB AM-BM, comúnmente conocido como cable de impresora. El bloque NI ELVIS II es el encargado de la lectura de las entradas del codificador angular y ordena al amplificador de potencia que accione sobre el motor de DC en el ventilador.

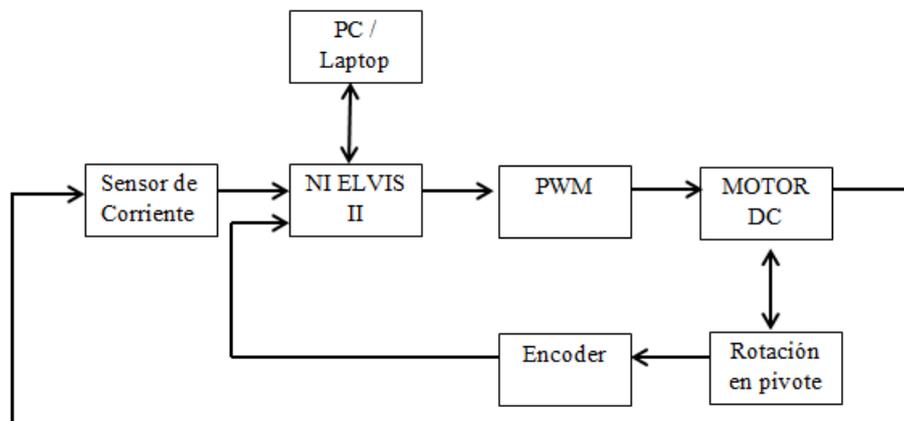


Gráfico 1-1 Esquema de funcionamiento de la planta QNET VTOL

Fuente: Villagómez 2017

A continuación, se realiza una breve descripción de cada uno de los bloques que se observa en el gráfico 1-1.

- **PC.** - La PC o computadora personal será el ordenador, en este se realiza la programación del instrumento virtual para comandar la planta, de igual manera será donde podemos visualizar los resultados obtenidos.
- **NI ELVIS II.** - NI ELVIS es el acrónimo de National Instruments Educational Laboratory Virtual Instrumentation Suite. Es un entorno de prototipaje basado en LabVIEW, que proporciona capacidades completas de adquisición de datos, el sistema es ideal para la realización de prácticas académicas adecuadas para un amplio rango de currículos.
- **PWM.** - La planta QNET VTOL incluye un amplificador de potencia controlado por voltaje PWM capaz de proporcionar una corriente de pico de 2 A y una corriente continua de 0,5 A (basada en la clasificación de corriente térmica del motor). El rango de voltaje de salida a la carga oscila entre 0 V y 10 V
- **MOTOR DC.** - El motor DC incorporado en la planta QNET VTOL es un motor Sanyo Denki SanAce 60 G como se observa en la Figura 8-1, el mismo dispone de las características nominales: voltaje soportado 24 V, y de revoluciones por minuto 11000 (RPM)
- **ENCODER.** - El encoder utilizado para medir la posición angular del sistema dinámico del VTOL, es un codificador de eje óptico de extremo único, entre sus características más relevantes se puede enumerar las siguientes:
 - Recuento de línea del codificador 512 líneas / revolución
 - Recuento de línea del codificador en cuadratura 2048 líneas / revolución
 - Resolución del codificador (en cuadratura) 0,176 grados / conteo



Figura 8-1 Motor DC San Ace 60

Fuente: Datasheet del motor DC San Ace 60

A continuación, se enlista las condiciones necesarias según las especificaciones técnicas del manual de usuario para el uso de la planta QNET VTOL.

- Solo para uso interior
- Una temperatura entre los 5 – 40 grados centígrados
- Altitud de hasta 2000 metros.
- Grado de contaminación 2
- Fluctuaciones de la tensión de alimentación hasta $\pm 10\%$ de la tensión nominal
- Sobretensión transitoria máxima 2500V

1.2.2. Requerimientos de Hardware y Software

- Requerimientos de Hardware

Los requerimientos necesarios de hardware para el desarrollo del presenta trabajo debemos enumerar a los siguientes:

- PC compatible con LABVIEW 2012 o posterior
- NI ELVIS II
- Planta QNET VTOL

- Requerimientos de Software

Los requerimientos necesarios de software para realizar el desarrollo del presenta trabajo debemos enumerar a los siguientes:

- LABVIEW 2012 o superior.
- NI DAQmx 9.5.5 o superior.
- NI ELVISmx 4.4 o superior.
- LABVIEW Control Design and Simulation Module 2012 o superior.
- LABVIEW System Identification Toolkit.
- LABVIEW PID and Fuzzy logic 2012 o superior.
- Matlab 2013 o superior.

1.3. Los software de control

El uso de software de control en aplicaciones de control automático cada vez es más común, por las ventajas que estos nos proporcionan, al realizar pruebas en tiempo real de la respuesta de sistemas, adquisición de datos, diseño de controladores, entre otras opciones que presentan los software en esta área del conocimiento.

Los software de control más conocidos y utilizados, para realizar todo tipo de pruebas, así como la simulación de las mismas, son LabVIEW y Matlab, cada uno de estos con sus características propias son opciones muy válidas al momento de realizar, aplicaciones de control automático

- **LabVIEW**

El software NI LabVIEW es un entorno de programación gráfica (G) que utiliza íconos, terminales y cables en lugar de texto para ayudarle a programar de la misma manera en que usted piensa. Los programas creados en LabVIEW se denominan VI o Instrumentos Virtuales los cuales constan de dos ventanas:

El Panel Frontal, donde se diseña el entorno gráfico con el cual se va a presentar la aplicación, esta ventana podrá contar una gran variedad de opciones, como lectura y escritura de datos, proyección de graficas interactivas de datos, como se ve en la Figura 9-1,

El Diagrama de Bloques en donde se encuentra el programa que se realiza con código G, en esta pantalla se realiza la interconexión, configuración y operaciones entre elementos, esta pantalla se observa en la Figura 10-1.

- **Matlab**

El nombre MATLAB proviene de “MATrix LABoratory” (Laboratorio de Matrices), es un entorno fácil de usar, donde los problemas y las soluciones son expresados como se escriben matemáticamente, sin la programación tradicional. MATLAB es un sistema interactivo cuyo elemento básico de datos es una matriz que no requiere dimensionamiento. Esto permite resolver muchos problemas numéricos en una fracción del tiempo que llevaría hacerlo en lenguajes como C, BASIC o FORTRAN. (Mathworks, 2012)

MATLAB se utiliza para resolver problemas prácticos de ingeniería y matemáticas, con un gran énfasis en aplicaciones de control, este software también proporciona una serie de soluciones específicas denominadas TOOLBOXES, para resolver problemas como:

Procesamiento de señales, diseño de sistemas de control, simulación de sistemas dinámicos, identificación de sistemas, entre otros. (Mathworks, 2012). El entorno gráfico de este software se observa de mejor manera en la Figura 11-1.

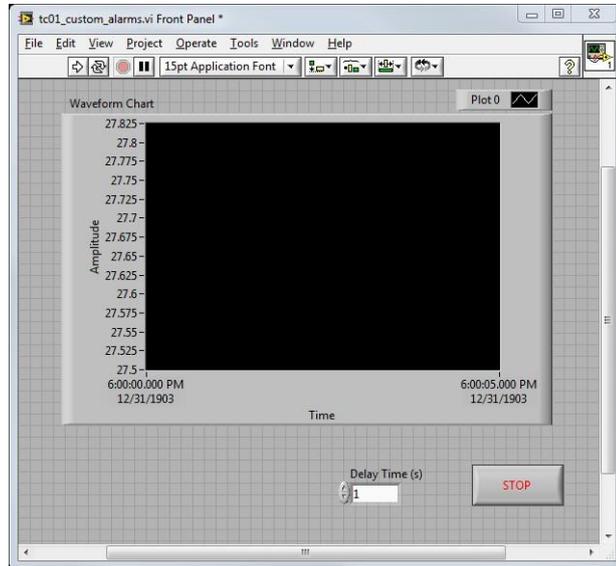


Figura 9-1 Panel frontal LabVIEW

Fuente: <http://www.ni.com/example/10726/es/>

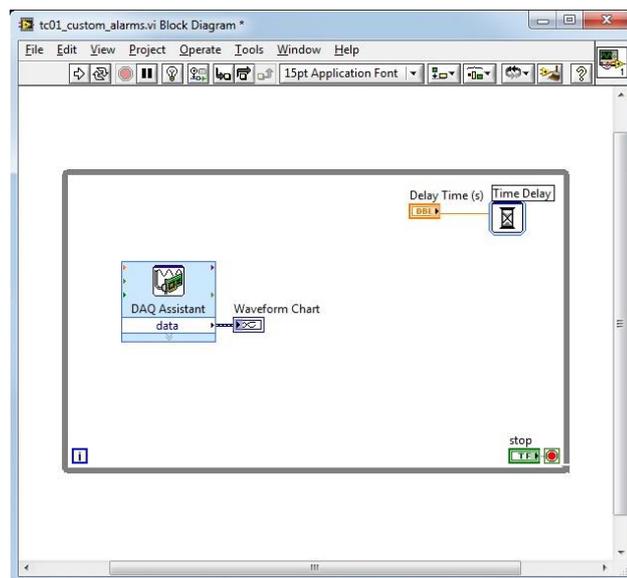


Figura 10-1 Diagrama de bloques LabVIEW

Fuente: <http://www.ni.com/example/10726/es/>

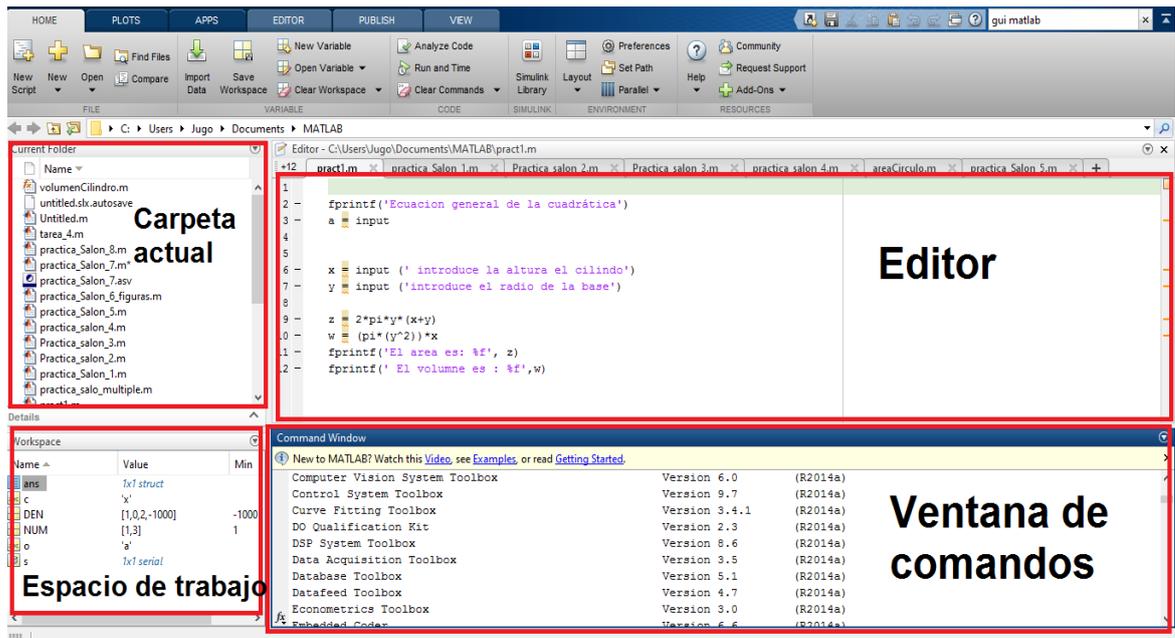


Figura 11-1 Entorno del software Matlab

Fuente: <http://ryutaku.com/mini-cursito-matlab-para-aprender-lo-basico-parte-1-introduccion/>

1.4. Modelamiento matemático

La dinámica de muchos sistemas, ya sean mecánicos, eléctricos, térmicos, económicos, biológicos, etc., se describe en términos de ecuaciones diferenciales. Dichas ecuaciones diferenciales se obtienen a partir de leyes físicas que gobiernan un sistema determinado como las leyes de Newton para sistemas mecánicos (Ogata, 2010,p63)

En la teoría de control, a menudo se usan las funciones de transferencia para caracterizar las relaciones de entrada-salida de componentes o de sistemas que se describen mediante ecuaciones diferenciales lineales invariantes en el tiempo. Por lo cual el objetivo del modelamiento es definir la función de transferencia de la planta sobre la que se trabaje.

Se denominan sistemas análogos aquellos que tienen igual modelo matemático, pero son diferentes físicamente. Las ventajas que tiene este proceder es la facilidad en el trabajo experimental. (Platero Dueñas, 2008)

Existen varias analogías entre los movimientos de traslación y los circuitos eléctricos, las dos más comunes se muestran en la tabla 3-1.

Tabla 3-1 Analogías entre movimiento de traslación y sistema eléctrico

Movimiento de traslación	Sistema eléctrico
Fuerza	Corriente
Desplazamiento	Potencial

Realizado por: Juan José Villagomez, 2017

Fuente: http://www.elai.upm.es/webantigua/spain/Asignaturas/Servos/Apuntes/4_Modelado.pdf

1.4.1. Modelamiento de la planta QNET VTOL

Para que a un cuerpo rígido se lo considere que está en equilibrio estático se deben cumplir dos requisitos conocidos como las condiciones de equilibrio. La primera condición de equilibrio es la Primera Ley de Newton, que garantiza el equilibrio de traslación. La segunda condición de equilibrio, corresponde al equilibrio de rotación, se enuncia de la siguiente forma: “la suma vectorial de todos los torques externos que actúan sobre un cuerpo rígido alrededor de cualquier origen es cero”, como se escribe en la ecuación (Eq.1-1) (Inzunza, 2007, p.176)

$$\sum \tau = 0 \quad (\text{Eq.1-1})$$

Cuando son cuerpos rígidos los que vas a ser analizados, es importante considerar la fuerza del peso del cuerpo, e incluir en los cálculos el torque producido. Para calcular el torque debido al peso, se puede considerar como si todo el peso estuviera concentrado en un solo punto, llamado centro de gravedad. (Inzunza, 2007, p.176)

Cuando hablamos del movimiento tenemos que especificar que existen dos tipos de movimientos que son:

Los movimientos de traslación, se caracterizan por el desplazamiento de un cuerpo a lo largo de una línea recta. La ley de Newton sobre cuerpos rígidos dice que la suma algebraica de fuerzas es igual a la masa del cuerpo por la aceleración. como se escribe en la ecuación (Eq.2-1). (Platero Dueñas, 2008, p.80)

$$\sum f = m * a \quad (\text{Eq.2-1})$$

Los movimientos de rotación se definen como una extensión de la ley de Newton: La suma algebraica de momentos o pares alrededor de un eje fijo es igual al producto de la inercia por la

aceleración angular alrededor de un eje. Los elementos bases constitutivos son: el momento de inercia, el resorte tensional y la fricción viscosa. (Platero Dueñas, 2008, p.81)

La Inercia, J , se considera a la propiedad de un elemento de almacenar energía cinética del movimiento de rotación se la calcula mediante la ecuación (Eq.3-1).

$$J = \sum_{i=1}^n m_i * r_i^2 \quad (\text{Eq.3-1})$$

1.5. Diseño de controladores

En un lazo de control realimentado, las acciones de control son efectuadas por el instrumento denominado controlador, el cual contiene los modos o acciones de control que actúan sobre la señal de error.

Usualmente son características deseables del comportamiento del sistema de control, que lleve la variable controlada a un nuevo valor deseado en el caso de que este cambie, o que la regrese a su valor deseado ante la presencia de una perturbación, en el menor tiempo posible y con errores y oscilaciones mínimas. La forma en que el controlador realiza esto depende de su estructura y del valor de sus parámetros. (Alfaro Ruiz)

1.5.1. Clasificación de los controladores

Para realizar la clasificación primero debemos referirnos a la Figura 12-1 del diagrama de bloques, nos referimos al lazo básico de control de una entrada simple y una salida simple.

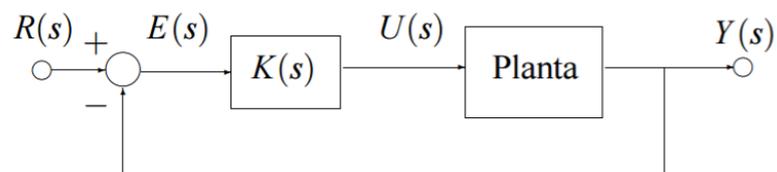


Figura 12-1 Lazo básico de control

Fuente: http://csd.newcastle.edu.au/SpanishPages/clase_slides_download/C07.pdf

Donde:

$R(s)$. Es la señal de entrada o señal consigna (SET POINT)

$E(s)$. Es la señal del error medido

$U(s)$. Es la señal de control que ingresa a la planta

$Y(s)$. Es la señal de salida del sistema

$K(s)$. Es el bloque del controlador

Planta. Es el bloque que representa la función de transferencia de la planta.

La clasificación más general que podemos encontrar de los controladores **$K(s)$** es:

- **Controlador tipo Proporcional (P)**. - La función de transferencia entre la salida del controlador $u(s)$ y la señal de error $e(s)$ es:

$$K_p(s) = K_p$$

Donde K_p se denomina como ganancia proporcional.

- **Controlador tipo Proporcional- Integral (PI)**. - El valor de salida del controlador proporcional varía en razón proporcional al tiempo en que ha permanecido el error y la magnitud del mismo. La función de transferencia es:

$$K_{PI}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_r s} \right)$$

Donde K_p es la ganancia proporcional y T_r se denomina tiempo de acción integral. Ambos valores son ajustables. El tiempo integral regula la velocidad de acción de control, mientras que una modificación en K_p afecta tanto a la parte integral como a la parte proporcional de la acción de control.

- **Controlador tipo Proporcional- Derivativo (PD).** - Por lo general, una gran pendiente en $e(t)$ en un sistema lineal correspondiente a una entrada escalón considerable produce un gran sobre impulso en la variable controlada. El control derivativo mide la pendiente instantánea de $e(t)$, prediciendo que tan grande será el sobre impulso aplicando las correcciones apropiadas antes de que se presente. La función de transferencia es:

$$K_{PD} = K_p \left(1 + \frac{T_d s}{\tau_d s + 1} \right)$$

Donde T_d se denomina duración predicha.

- **Controlador tipo Proporcional – Integral – Derivativo PID.** - Esta combinación tiene la ventaja de que cada una de las tres acciones de control individuales, es el controlador más utilizado en la actualidad. La función de transferencia de este controlador es:

$$K_{PID}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_r s} + \frac{T_d s}{\tau_d s + 1} \right)$$

Es importante denotar que no se pueden desarrollar controladores de tipo solo integral, o solo derivativo, puesto que es necesaria la ganancia proporcional para el desarrollo de los mismos.

1.5.2. *Métodos de sintonización de controladores*

Entre los métodos de sintonización de controladores más conocidos se puede encontrar:

- Ziegler-Nichols
- Cohen y Coon
- López, Miller, Smith y Murril
- Kaya y Sheib
- Sung, O, Lee, Lee Y YI

En este trabajo se utiliza el método de la respuesta al escalón o también conocido como el primer método expuesto por Ziegler and Nichols, el mismo que permite obtener los parámetros del controlador PID, de forma experimental.

Ziegler y Nichols propusieron reglas para determinar los valores de la ganancia proporcional K_p , del tiempo integral T_i y del tiempo derivativo T_d , basándose en las características de respuesta transitoria de una planta dada. Tal determinación de los parámetros de los controladores PID o sintonía de controladores PID la pueden realizar los ingenieros mediante experimentos sobre la planta. (Ogata, 2010, p.568)

“En el primer método, la respuesta de la planta a una entrada escalón unitario se obtiene de manera experimental, este método se puede aplicar si la respuesta muestra una curva con forma de S.”. como se observa en la Figura 13-1.(Ogata, 2010, p.568)

La respuesta a un escalón se caracteriza por solo dos parámetros a y L como se observa en la Figura 14-1. en primer lugar, se determina el punto donde la pendiente de la respuesta a un escalón tiene su máximo y se dibuja la tangente en este punto. Las intersecciones entre la tangente y los ejes de coordenadas dan los parámetros a y L . Esto corresponde a modelar un proceso por un integrador y un retardo de tiempo. (Astrom, y otros, 2009, p.168)

Una vez calculadas las variables a y L , Ziegler y Nichols sugirieron establecer los valores de K_p , T_i y T_d de acuerdo con las fórmulas que se muestran en la Figura 15-1, para los diferentes tipos de controladores.

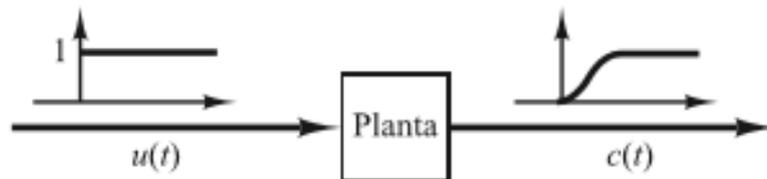


Figura 13-1 Método de la respuesta al escalón
Fuente: (Ogata, 2010)

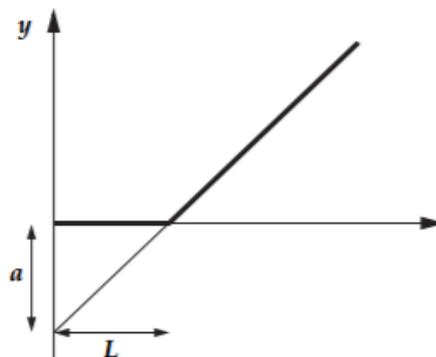


Figura 14-1 Caracterización de la respuesta en escalón
Fuente: <http://eva.sepyc.gob.mx:8383/greenstone3/sites/localsite/collect/ciencia1/index/assoc/HASH0190/8f390ad0.dir/12990071.pdf>

Controlador	aK	T_i/L	T_d/L	T_p/L
P	1			4
PI	0,9	3		5,7
PID	1,2	2	L/2	3,4

Figura 15-1 Parámetros del controlador para método del escalón

Fuente: <http://eva.sepyc.gob.mx:8383/greenstone3/sites/localsite/collect/ciencia1/index/assoc/HASH0190/8f390ad0.dir/12990071.pdf>

1.6. Criterios integrales del error

La meta a alcanzar en una buena sintonía es la obtención de la respuesta más rápida posible dentro de unos márgenes de robustez y estabilidad de la respuesta, la pregunta radica en que criterio se debe seguir para medir una respuesta y grado de optimización.

Cuando se diseña un controlador, es importante poder evaluarlo con alguna operación matemática que busque determinar con un valor numérico el desempeño de los mismos, es por esto que los criterios integrales del error son utilizados como un método de determinación del mejor controlador a ser utilizado en un proceso y planta específico.

Los principales criterios integrales del error para la optimización de los sistemas de control se pueden clasificar en:

- Integral del error absoluto (IAE).
- Integral del tiempo por el error absoluto (ITAE).
- Integral del error cuadrático (ISE).
- Integral del tiempo por el error cuadrático (ITSE).

- **Criterio IAE**

Este criterio viene dado por la siguiente integral:

$$\int_0^{\infty} [e(t)] dt \quad (\text{Eq.4-1})$$

Entre sus características más importantes encontramos que es de muy fácil aplicación, no es capaz de optimizar sistemas altamente sobre amortiguados o altamente sub amortiguados

- **Criterio ITAE**

Este criterio viene dado por la siguiente integral:

$$\int_0^{\infty} t \cdot [e(t)] dt \quad (\text{Eq.5-1})$$

Entre sus características más importantes encontramos que los errores tardíos son más castigados, tiene una buena selectividad, pero es difícil de evaluarlo analíticamente.

CAPITULO II

2 MARCO METODOLÓGICO

2.1 Aspectos básicos de la planta QNET VTOL

En este capítulo se detallará el proceso para el diseño del control auto sintonizado, partiendo por conocer la planta y como interactúa con el software de control LABVIEW, con el fin de obtener los parámetros básicos que serán la pauta para su modelamiento, así como para el diseño del controlador más adecuado en función de los criterios integrales absolutos del error IAE e ITAE.

La instalación de la planta se la realiza de la siguiente manera: Lo primero es introducir la planta del QNET VTOL en la ranura del ELVIS II, se debe aplicar una ligera presión hasta asegurarse que la tarjeta este bien sujeta en las vinchas y la conexión sea adecuada como se observa en la Figura 1-2.



Figura 1-2 Conexión de la planta QNET VTOL al ELVIS II

Fuente: Villagómez, 2017

Una vez instalada la planta QNET VTOL, se debe conectar la fuente de poder al ELVIS II, se recomienda que se utilice la fuente original de fábrica, o en su defecto una fuente homologada con el fin de proteger el equipo y garantizar su correcto funcionamiento. Posteriormente se debe alimentar la planta, con su respectiva fuente de poder, un indicador luminoso mostrara cuando la planta esta energizada.

Finalmente se debe conectar el cable USB entre la PC y el NI ELVIS II, al encender el NI ELVIS II, el computador debe detectar a la tarjeta NI ELVIS II como un dispositivo externo, y se lo encontrará en la lista de dispositivos en los puertos de comunicación COM, de esta manera se puede verificar que existe conexión entre la tarjeta y el ordenador. El diagrama de conexión se puede observar en la Figura 2-2.

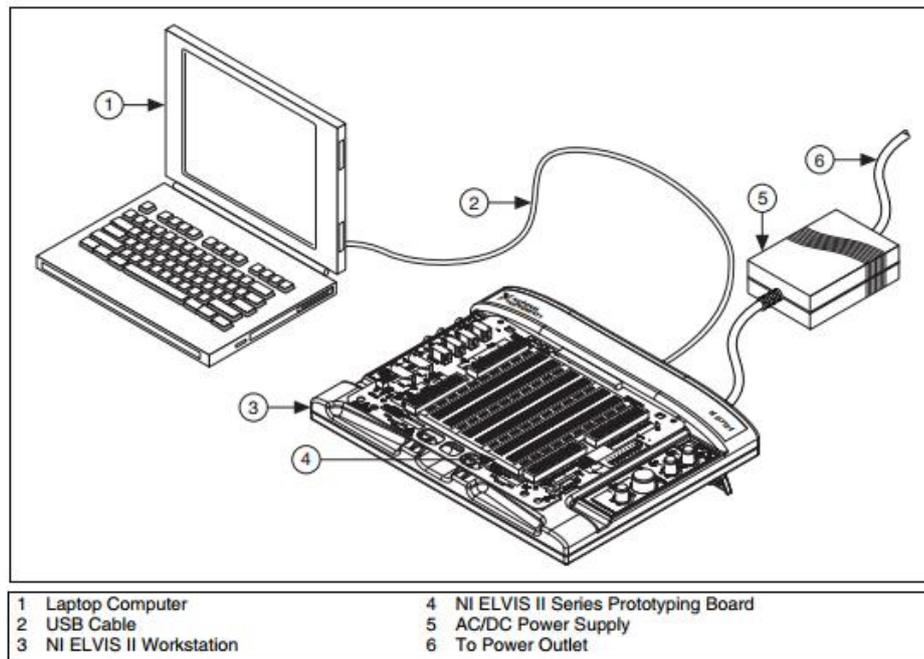


Figura 2-2 Diagrama de conexión NI ELVIS II

Fuente: <http://www.ni.com/pdf/manuals/374629c.pdf>

2.1.1 Análisis del funcionamiento básico de la planta QNET VTOL

Una vez comprobado que la planta está en óptimas condiciones para ser utilizada se procede a determinar los parámetros básicos de la misma y como esta funciona utilizando el VI de inicio rápido, en el cual vemos cómo se comporta la planta al inyectar una tensión gradualmente, lo mismo que permite observar el cambio del valor en el ángulo que mide el sensor digital colocado en el pivote.

Este simple experimento permite determinar las variables controladas y las variables manipuladas en la planta QNET VTOL, así como los límites superiores e inferiores de los ángulos que mide el sensor

En el caso del sistema QNET la variable a ser controlada es la posición angular del brazo VTOL, esta señal es medida por el encoder ubicado en el pivote, la variable que será manipulada en el sistema, es el voltaje que se aplicara al motor, para generar el empuje suficiente para mantener al brazo en vuelo.

2.2 Modelamiento de la planta QNET VTOL

Para realizar el modelamiento de la planta QNET VTOL debemos de partir por entender como está constituida físicamente la misma, lo cual se observa de mejor manera en la Figura 3-2 que representa el diagrama de fuerzas del brazo VTOL.

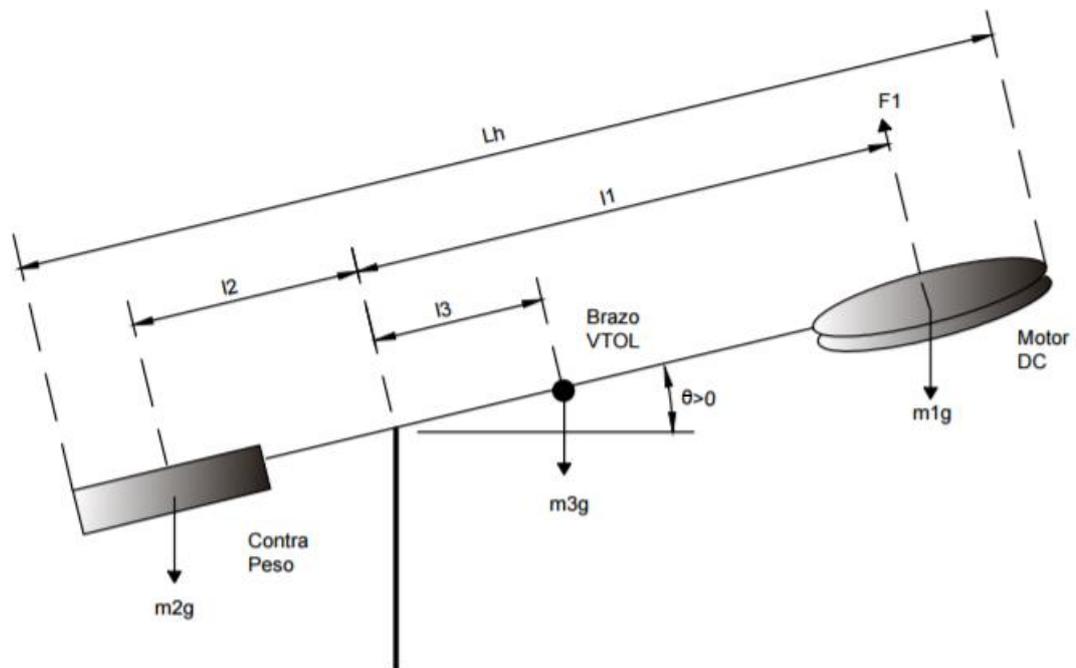


Figura 3-2 Diagrama de fuerzas de la planta

Fuente: Villagómez 2017

En la Figura 3-2, podemos observar la sumatoria de fuerzas que se aplican sobre el sistema, tomando como referencia el pivote, las fuerzas de torques que actúan sobre el sistema rígido se puede describir por la siguiente ecuación:

$$\tau + m_2 g l_2 \cos \theta (t) - m_1 g l_1 \cos \theta (t) - m_3 g l_3 \cos \theta (t) = 0$$

La fuerza Ft que es la que empuja el sistema hacia arriba, es generada por la hélice del motor DC y actúa perpendicular al conjunto del ventilador, el par de empuje o torque es dado por.

$$\tau t = Ft * l_1$$

Donde l_1 es la distancia que hay entre el pivote y el centro del propulsor. Para que el sistema este en equilibrio se debe inyectar una corriente necesaria al motor, este torque compensa los torques asociados a la dinámica del sistema QNET. El par de torque es igual a

$$\tau t = Kt * Im$$

Donde Kt es la constante de empuje constante de la corriente, la ecuación de sumatoria de torques se convierte en:

$$Kt Im + m_2 g l_2 \cos \theta (t) - m_1 g l_1 \cos \theta (t) - m_3 g l_3 \cos \theta (t) = 0$$

La fuerza que ejerce el propulsor y la acción de la gravedad en el contra peso en la dirección opuesta hace que la parte dinámica del sistema oscile. En el estado de equilibrio, las fuerzas o pares de torques que actúan sobre el sistema se pueden describir mediante la siguiente ecuación.

$$Kt I_{eq} + m_2 g l_2 - m_1 g l_1 - m_3 g l_3 = 0 \quad (\text{Eq.1-2})$$

Donde I_{eq} es la corriente de equilibrio necesaria.

Los movimientos angulares de la planta QNET VTOL son los que rigen el comportamiento de la dinámica de la misma, estos con respecto a un par de empuje τt pueden expresarse mediante la ecuación:

$$J\ddot{\theta} + B\dot{\theta} + K\theta = \tau t \quad (\text{Eq.2-2})$$

Donde:

θ es el ángulo,

J es el momento de inercia,

B es el amortiguamiento viscoso

K es la rigidez.

Si reemplazamos el par de empuje τt Con respecto a la corriente, obtendríamos la siguiente expresión:

$$J\ddot{\theta} + B\dot{\theta} + K\theta = Kt Im$$

La función de transferencia de la planta QNET VTOL, es obtenida a partir del diagrama de bloques que se observa en el Gráfico 1-2. y es la resultante de aplicar la transformada de Laplace de la ecuación (Eq.2-2) resolviendo para $\frac{\theta(s)}{Im(s)}$, Se obtiene la función de transferencia de la ecuación (Eq.3-2),

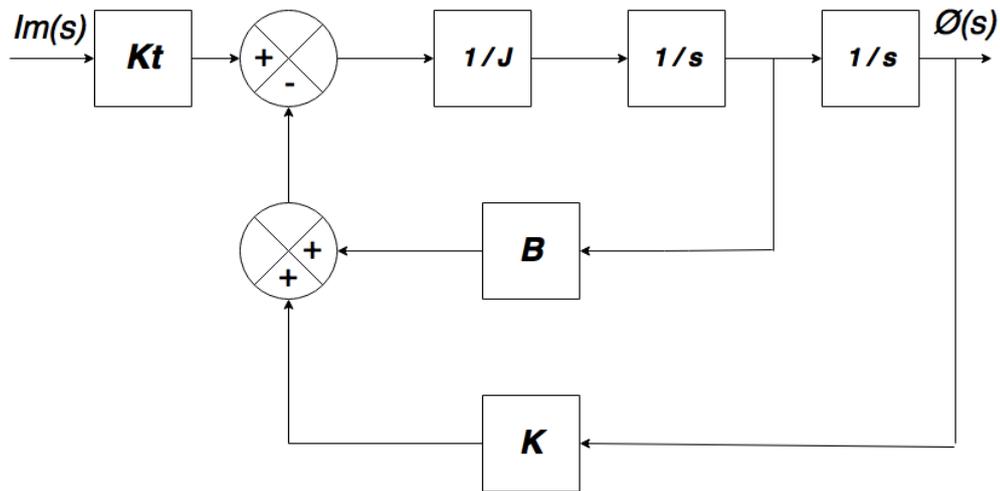


Gráfico 1-2 Diagrama de bloques del movimiento de la planta QNET VTOL

Fuente: Villagómez 2017

$$F(t) = \frac{Kt}{J(s^2 + \frac{B}{J}s + \frac{K}{J})} \quad (\text{Eq.3-2})$$

Para encontrar el momento de inercia de un cuerpo compuesto con n masas puntuales, es decir que no cambiaran su posición con respecto al pivote en ningún momento, se debe utilizar la siguiente fórmula.

$$J = \sum_{i=1}^n m_i * r_i^2$$

La rigidez del sistema se obtendrá al aplicar la siguiente fórmula:

$$K = \omega n^2 * J$$

Donde ωn es la frecuencia natural.

Finalmente se calcula la constante de empuje de la corriente Kt , despejando de la ecuación de fuerzas o pares de torques que ejercen sobre el sistema en equilibrio, dándonos como resultante la siguiente ecuación:

$$Kt = \frac{m_1 g l_1 - m_2 g l_2 + m_3 g l_3}{l_{eq}}$$

2.2.1 Desarrollo del modelamiento analítico de la planta QNET VTOL

En la Tabla 1-2 se muestra los resultados obtenidos al incrementar el voltaje que ingresa al motor, y su respuesta en posición angular (grados), la prueba se la realizo en condiciones normales, y agregando una masa de 3.66 gr al sistema, sin la implementación de ningún tipo de controlador, con el fin de analizar la respuesta del sistema frente al cambio en las condiciones iniciales del brazo VTOL.

Tabla 1-2 Posición angular frente a voltaje aplicado

VOLTAJE APLICADO	POSICION ANGULAR EN CONDICIONES NORMALES	POSICION ANGULAR CON MASA
4 V	0 grados	0 grados
5 V	0 grados	2.81 grados
6 V	2.81grados	10.21 grados
7 V	9.13 grados	16.91 grados
8 V	15.29 grados	24.61 grados
9 V	24.08 grados	30.58 grados
10 V	22.66grados	32.68 grados

Realizado por: Juan José Villagomez, 2017

De la Tabla 1-2 se puede analizar el cambio significativo en la posición angular que se presenta al agregar una masa en el contra peso, por lo cual se decidió que el modelamiento se realizara bajo las siguientes condiciones:

1. Modelamiento en condiciones normales sin añadir ningún peso.
2. Modelamiento añadiendo una masa de 2.88 gr a la masa m_1 del contra peso.
3. Modelamiento añadiendo una masa de 3.66 gr a la masa m_1 del contra peso.

Como se determinó en la formulación del modelamiento es necesario el cálculo de la corriente de equilibrio I_{eq} , se debe determinar la corriente necesaria que se debe aplicar en el motor para poner al sistema en equilibrio, esta corriente encontrada será diferente en cada uno de los casos del modelamiento de la planta. En el Gráfico 2-2 se puede observar la metodología utilizada.

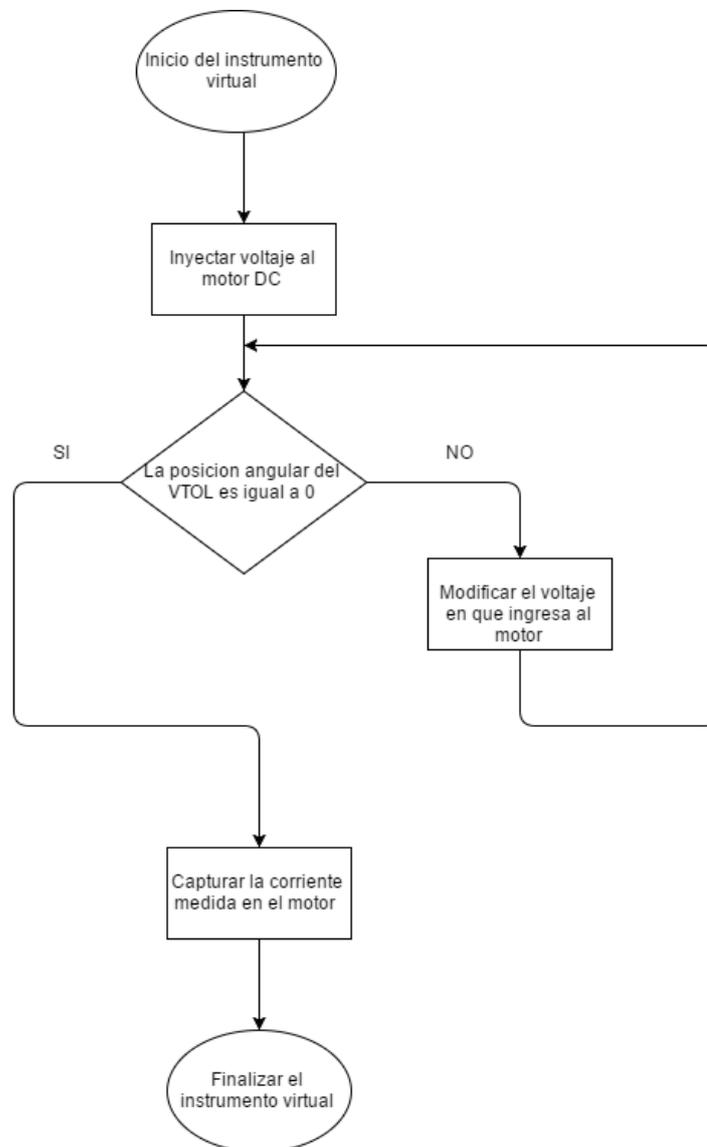


Gráfico 2-2 Diagrama de flujo del cálculo de la corriente de equilibrio
Fuente: Villagómez, 2017

Para calcular la corriente necesaria que pone al brazo VTOL en equilibrio se desarrolló, un instrumento virtual que permite realizar una prueba en lazo abierto, la programación de este (VI) se observa en la Figura 5-2, en donde se realiza una lectura de la corriente y el posicionamiento del brazo VTOL a partir del ingreso de un nivel de voltaje al motor DC.

Por otra parte como se observa en la Figura 4-2, en el panel frontal se debe escoger el puerto de comunicación en el que el NI ELVIS II fue detectado, seguido se debe escribir el voltaje que se desea aplicar al motor teniendo en cuenta que debe ser un valor menor a 10 V.

Este voltaje debe ser variado hasta que el ángulo del brazo VTOL sea 0, una vez que haya alcanzado esta posición se debe tomar el valor de la corriente que está siendo inyectada al motor para alcanzar dicho posicionamiento.

El experimento se realiza para cada uno de los escenarios de la planta y se obtienen los siguientes resultados:

- La corriente de equilibrio para el primer caso sin peso $I_{eq1}=0.3258$
- La corriente de equilibrio con un peso de 2.88 gr $I_{eq2}=0.279$
- La corriente de equilibrio con un peso de 3,66 gr $I_{eq3}= 0.279$

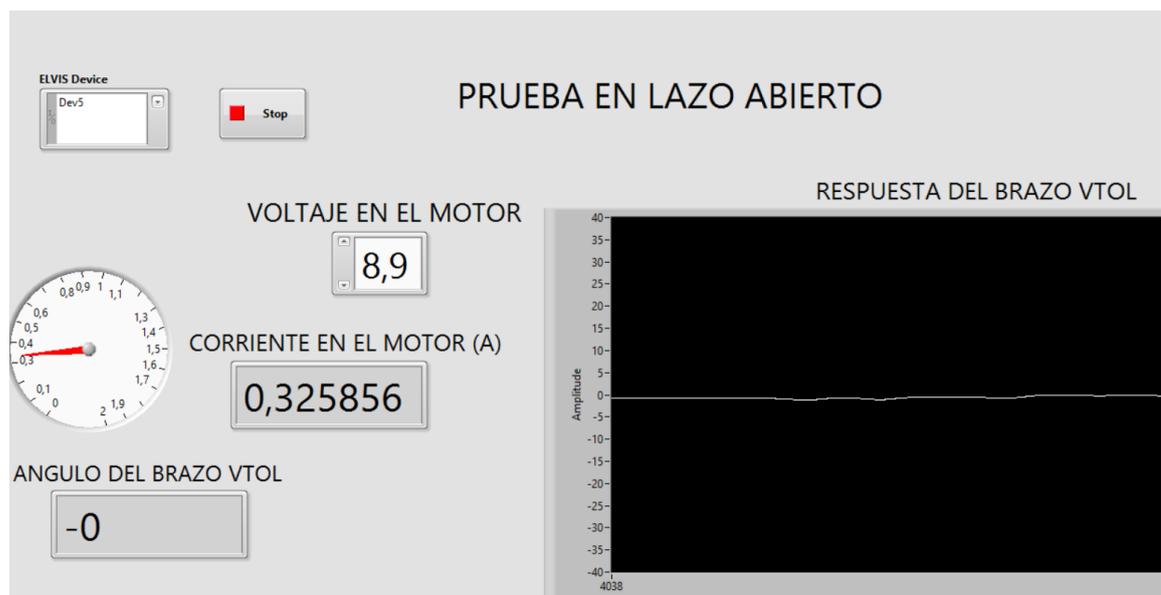


Figura 4-2 Panel frontal de la prueba en lazo abierto

Fuente: Villagómez, 2017

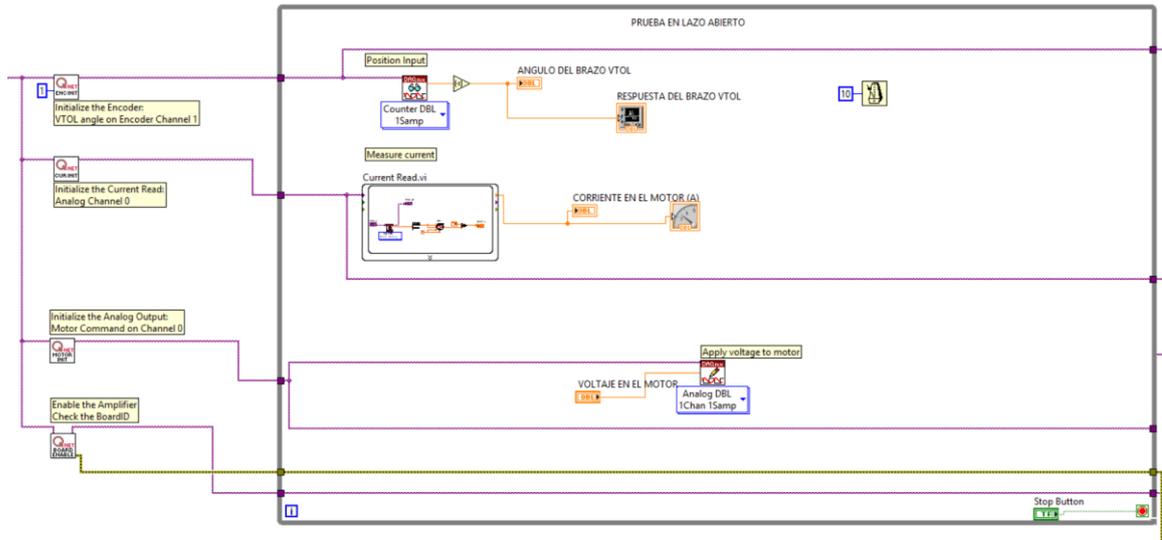


Figura 5-2 Diagrama de bloques de la prueba en lazo abierto
Fuente: Villagómez, 2017

Una vez calculada la corriente necesaria para alcanzar el equilibrio, se calcula la frecuencia natural para cada condición, para esto se analiza la respuesta del sistema frente a una señal de tipo escalón bajo el criterio del sobre impulso, y el coeficiente de amortiguamiento, en el cual se determina el valor porcentual del sobre impulso (Mp), y el tiempo pico (tp), con estos valores se podrá determinar la frecuencia natural (ωn), con el uso de las siguientes ecuaciones:

$$Mp = 100e\left(\frac{-\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}\right) \quad (\text{Eq.4-2})$$

$$\xi = \frac{-\ln Mp}{\sqrt{\ln^2 Mp + \pi^2}} \quad (\text{Eq.5-2})$$

$$tp = \frac{\pi}{\omega n \sqrt{1-\xi^2}} \quad (\text{Eq.6-2})$$

Lo primero que se debe hacer es capturar la respuesta del sistema frente a una señal de tipo escalón, gráficamente determinamos los valores del sobre impulso máximo (Mp %), y el tiempo pico (tp). Como se observa en el Gráfico 3-2.

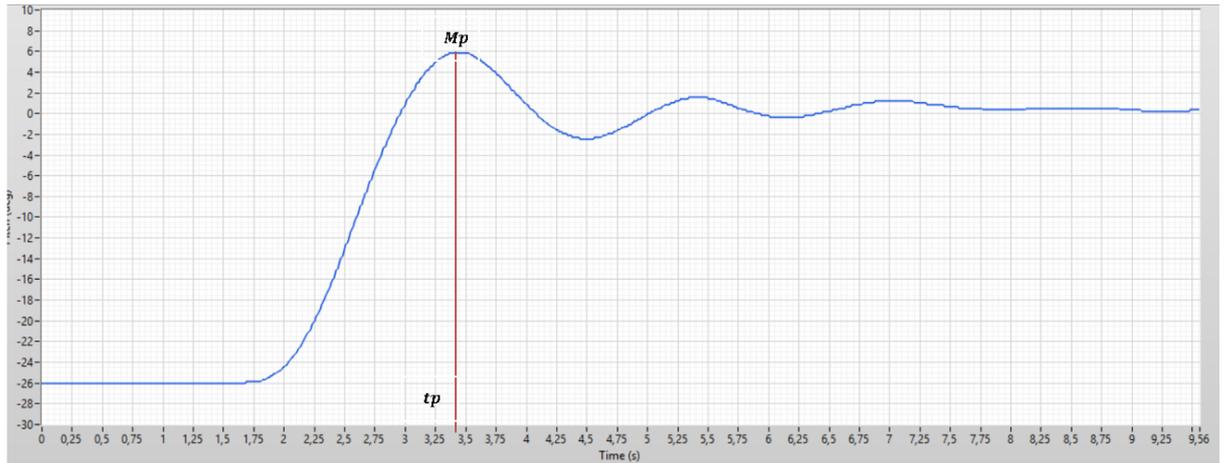


Gráfico 3-2 Determinación grafica de Mp y tp

Fuente: Villagómez, 2017

Esta prueba se calcula para los tres casos de modelamiento analítico, de este procedimiento se obtienen los siguientes resultados, mostrados a continuación en la Tabla 2-2.

Tabla 2-2 Resultados obtenidos de la frecuencia natural

CASO	Mp %	ξ	tp (s)	ω_n (rad/s)
Cond. Normales	23.07 %	0.42	3.27	1.01
+ 2.88 gr	19.23 %	0.46	3.37	1.04
+ 3.66 gr	11.53 %	0.56	3.40	1.11

Realizado por: Juan José Villagomez, 2017

Una vez obtenidos los valores de la corriente de equilibrio, y de la frecuencia natural para cada modelamiento, se calcula los valores de J , K , Kt , para los tres casos.

Modelamiento en condiciones normales sin añadir ningún peso

DATOS:

$M_1 = 258$ gr (sin añadir peso)

$M_2 = 127$ gr

$M_3 = 60$ gr

$$L1 = 72.5 \text{ mm}$$

$$L2 = 155 \text{ mm}$$

$$L3 = 7 \text{ mm}$$

$$B = 0.002 \text{ Nm/(rad/s)}$$

Cálculo de J_1

$$J_1 = \sum_{i=1}^n m_i * r_i^2$$

$$J_1 = m_1 l_1^2 + m_2 l_2^2 + m_3 l_3^2$$

$$J_1 = (0.258 \text{ kg})(0.0725 \text{ m})^2 + (0.127 \text{ kg})(0.155 \text{ m})^2 + (0.060 \text{ kg})(0.007 \text{ m})^2$$

$$J_1 = 0.004410 \text{ Kg}_m$$

Cálculo de K_1

$$K_1 = \omega n^2 * J_1$$

$$K_1 = (1.018)^2 * J_1$$

$$K_1 = 0.00457$$

Cálculo de Kt_1

$$Kt_1 l_{eq} + m_2 g l_2 - m_1 g l_1 - m_3 g l_3 = 0$$

$$Kt_1 = \frac{m_1 g l_1 - m_2 g l_2 + m_3 g l_3}{l_{eq}}$$

$$Kt_1 = \frac{g(m_1 l_1 - m_2 l_2 + m_3 l_3)}{l_{eq}}$$

$$Kt_1 = \frac{-9.8 * ((0.258 \text{ kg})(0.0725) - (0.127 \text{ kg})(0.155 \text{ m}) + (0.060 \text{ kg})(0.007 \text{ m}))}{0.3258}$$

$$Kt_1 = 0.016844$$

Modelamiento añadiendo una masa de 2.88 gr a la masa m1 del contra peso

DATOS:

M1 = 258 gr

M2 = 127 gr

M3 = 60 gr

L1 = 72.5 mm

L2 = 155 mm

L3 = 7 mm

B = 0.002 Nm/(rad/s)

Calculo de J_2

$$J_2 = \sum_{i=1}^n m_i * r_i^2$$

$$J_2 = m_1 l_1^2 + m_2 l_2^2 + m_3 l_3^2$$

$$J_2 = (0.26088 \text{ kg})(0.0725 \text{ m})^2 + (0.127 \text{ kg})(0.155 \text{ m})^2 + (0.060 \text{ kg})(0.007 \text{ m})^2$$

$$J_2 = 0.004425$$

Cálculo de K_2

$$K_2 = \omega n^2 * J_2$$

$$K_2 = (1.04)^2 * 0.004425$$

$$K_2 = 0.00478608$$

Cálculo de Kt_2

$$Kt_2 I_{eq} + m_2 g l_2 - m_1 g l_1 - m_3 g l_3 = 0$$

$$Kt_2 = \frac{m_1 g l_1 - m_2 g l_2 + m_3 g l_3}{I_{eq}}$$

$$Kt_2 = \frac{g(m_1 l_1 - m_2 l_2 + m_3 l_3)}{I_{eq}}$$

$$Kt_2 = \frac{-9.8 * ((0.26088 \text{ kg})(0.0725) - (0.127 \text{ kg})(0.155 \text{ m}) + (0.060 \text{ kg})(0.007 \text{ m}))}{0.279}$$

$$Kt_2 = 0.01233$$

Modelamiento añadiendo una masa de 3.66 gr a la masa m_1 del contra peso

DATOS:

$M_1 = 258 \text{ gr}$

$M_2 = 127 \text{ gr}$

$M_3 = 60 \text{ gr}$

$L_1 = 72.5 \text{ mm}$

$L_2 = 155 \text{ mm}$

$L_3 = 7 \text{ mm}$

$B = 0.002 \text{ Nm/(rad/s)}$

Cálculo de J_3

$$J_3 = \sum_{i=1}^n m_i * r_i^2$$

$$J_3 = m_1 l_1^2 + m_2 l_2^2 + m_3 l_3^2$$

$$J_3 = (0.26166 \text{ kg})(0.0725 \text{ m})^2 + (0.127 \text{ kg})(0.155 \text{ m})^2 + (0.060 \text{ kg})(0.007 \text{ m})^2$$

$$J_3 = 0.004429$$

Cálculo de K_3

$$K_3 = \omega n^2 * J_3$$

$$K_3 = (1.11)^2 * J_3$$

$$K_3 = 0.00545697$$

Calculo de Kt_3

$$Kt_3 l_{eq} + m_2 g l_2 - m_1 g l_1 - m_3 g l_3 = 0$$

$$Kt_3 = \frac{m_1 g l_1 - m_2 g l_2 + m_3 g l_3}{l_{eq}}$$

$$Kt_3 = \frac{g(m_1 l_1 - m_2 l_2 + m_3 l_3)}{l_{eq}}$$

$$Kt_3 = \frac{-9.8 * ((0.26166 \text{ kg})(0.0725) - (0.127 \text{ kg})(0.155 \text{ m}) + (0.060 \text{ kg})(0.007 \text{ m}))}{0.279}$$

$$Kt_3 = 0.01034$$

Tabla 3-2 Valores obtenidos de modelamiento analítico

CASO	<i>J</i>	<i>K</i>	<i>KT</i>
Cond. Normales	0.004410	0.00457	0.01684
+ 2.88 gr	0.004425	0.00479	0.01233
+ 3.66 gr	0.004429	0.00545	0.01034

Realizado por: Juan José Villagomez, 2017

Con los valores de la tabla 3-2, se determina las funciones de transferencia de los tres modelamientos haciendo uso de la ecuacion (Eq.3-2)

$$Fa(t) = \frac{3.81}{s^2 + 0.4535s + 1.036}$$

$$Fb(t) = \frac{2.78}{s^2 + 0.4519s + 1.0824}$$

$$Fc(t) = \frac{2.33}{s^2 + 0.4516 + 1.2305}$$

2.3 Diseño del controlador

En este caso se utilizó un controlador de tipo Proporcional Integral Derivativo (PID), de tipo paralelo también conocido como PID ideal. El método aplicado para definir los parámetros del controlador PID, fue el de la respuesta al escalón, o más conocido como el primer método de Zieglers & Nichols expuesto en el año de 1943, como se observa en la Figura 13-1.

La prueba se realizó en lazo abierto aplicando una señal de tipo escalón, en este caso un nivel de voltaje a la planta, con el fin de determinar su respuesta medida en el posicionamiento angular del brazo VTOL a la salida

Esta prueba se realizó mediante la utilización del instrumento virtual desarrollado, que permite obtener datos de la respuesta del sistema, estos servirán de pauta para realizar los cálculos necesarios, expuestos en el método de la respuesta al escalón. A continuación, se muestra en el Gráfico 4-2, la respuesta del sistema frente a una señal de tipo escalón de 10 V.



Gráfico 4-2 Respuesta del sistema frente a señal tipo escalón

Fuente: Villagómez, 2017

Del uso del instrumento virtual obtenemos un reporte de la respuesta del posicionamiento angular del brazo VTOL, en función del tiempo que transcurre la prueba, con este reporte se utilizó el software Matlab, para realizar el proceso matemático de la obtención de los parámetros necesarios para el diseño del controlador.

Una vez en el software Matlab, lo primero es cargar los datos obtenidos de la prueba realizada en lazo abierto que se observan en la Figura 6-2. Posteriormente se desarrolla la metodología expuesta por Ziegler and Nichols, para la determinación de los parámetros del controlador PID, mediante un código en el software que permita calcular todos los parámetros necesarios. A continuación, se muestran los resultados obtenidos de Matlab.

$$t_{\text{inflexion}} = 1.1301$$

$$y_{\text{inflexion}} = 19.8627$$

$$dy_{\text{inflexion}} = 45.1829$$

$$\text{DELTA}_Y = 51.0613$$

$$a = 31.1986$$

$$L = 0.6905$$

$$K = 39.3744$$

$$T = 0.8714$$

La regla empírica del método establece que el valor de $\frac{L}{T}$ sea, $0.1 < \frac{L}{T} < 1$, para que se puedan aplicar el uso de los valores de la tabla.

$$\text{REGLA_EMPIRICA} = 0.7924$$

Una vez obtenidos los valores de L, K, T nos referimos a la Figura 15-1, en la cual se muestra las ecuaciones de sintonización del primer método de Ziegler and Nichols, para obtener los valores de los parámetros del controlador, se realiza el despeje necesario para la obtención de la ganancia proporcional Kp , el tiempo integral Ti , y el tiempo derivativo Td .

$$Kp = \frac{1.2}{a}$$

$$Kp = 0.0385$$

$$Ti = 2 L$$

$$Ti = 1.3810$$

$$Td = 0.5 L$$

$$Td = 0.345$$

Time - Plot 0	Amplitude - Plot 0	Time - Plot 1
3569784172,25	6,15234	0,00
3569784172,26	6,15234	0,01
3569784172,28	6,15234	0,03
3569784172,29	6,15234	0,04
3569784172,31	6,15234	0,06
3569784172,32	6,15234	0,07
3569784172,34	6,15234	0,09
3569784172,35	6,15234	0,10
3569784172,37	6,15234	0,12
3569784172,38	6,32812	0,13
3569784172,40	6,32812	0,15
3569784172,41	6,32812	0,16
3569784172,42	6,32812	0,17
3569784172,44	6,32812	0,19
3569784172,45	6,32812	0,20
3569784172,46	6,32812	0,21
3569784172,47	6,32812	0,22
3569784172,49	6,32812	0,24
3569784172,50	6,32812	0,25
3569784172,51	6,32812	0,26
3569784172,52	6,32812	0,27
3569784172,54	6,32812	0,29
3569784172,55	6,32812	0,30
3569784172,56	6,32812	0,31
3569784172,57	6,32812	0,32
3569784172,59	6,32812	0,34
3569784172,60	6,32812	0,35
3569784172,61	6,32812	0,36
3569784172,62	6,32812	0,37
3569784172,64	6,32812	0,39
3569784172,65	6,32812	0,40
3569784172,66	6,32812	0,41
3569784172,67	6,32812	0,42
3569784172,69	6,32812	0,44
3569784172,70	6,32812	0,45
3569784172,71	6,32812	0,46

Figura 6-2 Datos obtenidos de la respuesta al escalón

Fuente: Villagómez, 2017

2.3.1 Sintonización fina de los parámetros del controlador

Para la realización de la sintonización fina del controlador se hizo uso de la herramienta del software LabView auto tune PID, lo que realiza dicha herramienta, es buscar nuevos valores del controlador PID, en base a los valores originales de sintonización, estima el comportamiento del sistema al aplicarle una ligera perturbación. Para poder utilizar el VI de autoajuste de PID, primero se deberá proporcionar los parámetros de autoajuste que utilizará el VI para ajustar el sistema. (National Instruments, 2015)

Tipo de controlador: Aquí debemos seleccionar el tipo de controlador que está intentando sintonizar. En nuestro caso se escoge un controlador de tipo PID. (National Instruments, 2015)

Ciclos de relé - Esto indica al relé de consigna cuántos ciclos utilizar. Sus resultados serán más precisos con más ciclos, pero requerirá más tiempo para ejecutar. Esto será más pronunciado en sistemas más lentos. (National Instruments, 2015)

Amplitud de relé - Especifica el cambio de paso del punto de ajuste actual hacia arriba o hacia abajo. (National Instruments, 2015)

Especificación de control: Especifica cómo responderán los sistemas. Tenga en cuenta que una respuesta más rápida resultará en un sobre impulso superior que puede no ser deseable, es preferible que se escoja un tipo lento o normal. (National Instruments, 2015)

Nivel de ruido PV- Estima el nivel de ruido que habrá en la variable de proceso. (National Instruments, 2015)

A continuación, deberá proporcionar las variables PID normales, los límites de salida, un punto de ajuste y una variable de proceso. Cuando se ejecuta el VI de autotuning PID, excitará su controlador y lo obligará a adaptarse a los cambios en su variable de proceso. (National Instruments, 2015)

Una vez completado el autotuning, la función emitirá mejores valores PID si el algoritmo fue capaz de encontrar cualquiera. Si el autotuning no estableció ningún cambio en las ganancias de PID, los valores de ganancias de PID serán los mismos que los de entrada de ganancias PID (National Instruments, 2015)

Con esta prueba el sistema está en la capacidad de evaluar el comportamiento en tiempo real de la planta y proponer unos nuevos valores de sintonización del controlador, es importante mencionar que la sintonización fina se la realiza una vez que el sistema esté en vuelo y haya alcanzado la estabilidad.

2.4 Diseño del instrumento virtual (VI)

En la actualidad el uso de herramientas de software de simulación para modelar controladores análogos y digitales es ampliamente utilizado en la mayoría de los laboratorios de educación superior y en organizaciones dedicadas al control automático. En general, dado un fenómeno físico que se desea controlar disponemos de un modelo matemático que representa dicho

fenómeno, o bien se tiene una curva de respuesta del proceso, que mediante técnicas de identificación de procesos podemos obtener los parámetros de un modelo aproximado del fenómeno real, y de esta forma diseñar y obtener el controlador del proceso. (Simulación de controladores digitales, 2009)

Para el desarrollo del instrumento virtual, lo primero se debe resolver es la programación del diagrama de bloques, que permita el control de la planta QNET VTOL, la misma se detalla a continuación

Adquisición de datos de las variables controladas. - Para realizar la adquisición de datos de la posición angular del brazo VTOL es necesario el uso del Encoder que tiene la planta QNET incluida, este es quien proporciona un valor angular en grados, que representa la posición real del sistema en ese momento, la posición angular será la encargada de dar la referencia al sistema para que el controlador actúe y así lograr que la planta QNET VTOL se estabilice.

Diseño del acondicionamiento de la señal. - Con el objetivo de tener una visualización más clara de la posición angular del brazo VTOL, lo que se hizo fue ingresar el contador de posición inicial proporcionado por el Encoder, a esta señal se cambia de signo, y se le suma un valor referencial de (26.0156) para poner la posición inicial del brazo sin despegar como cero grados, esta programación se detalla en la Figura 7-2

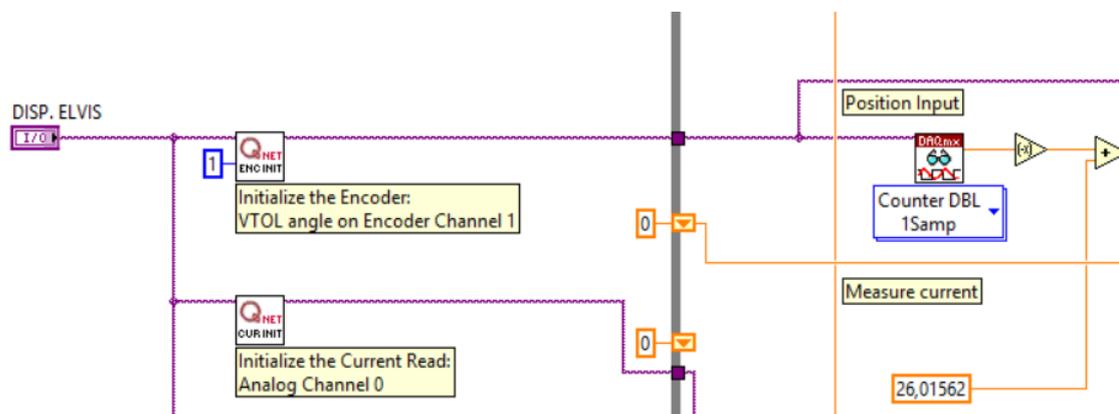


Figura 7-2 Diagrama de bloques de acondicionamiento de la señal

Fuente: Villagómez, 2017

Diseño del controlador. - Una vez obtenidos los valores del controlador gracias al método de la respuesta al escalón, se utiliza una herramienta que permita resolver el problema del control auto sintonizado, para esto se utilizó la herramienta PID autotunnig.vi, como se observa en la Figura 8-2, el mismo que en su interior tiene una estructura de tipo PID paralelo o ideal.

Las características que requiere este bloque para ser implementado dentro del instrumento virtual desarrollado, se las analizan a continuación:

El rango de salida especifica el intervalo al que se debe coaccionar la salida de control. El rango predeterminado es de -100 a 100, que corresponde a los valores especificados en términos de porcentaje de escala completa. Este VI implementa el anti-arrastre del integrador cuando la salida del controlador está saturada en los valores mínimo o máximo especificados.

Set Point. - También conocido como punto de consigna especifica el valor de consigna, o valor deseado, de la variable de proceso que se controla.

Variable de proceso. - Especifica el valor medido de la variable de proceso que se controla. Este valor es igual al valor de realimentación del bucle de control de realimentación.

La ganancia proporcional (Kp). -Especifica la ganancia proporcional del controlador.

Tiempo integral (Ti, min). - Especifica el tiempo integral en minutos.

El tiempo derivado (Td, min). - Especifica el tiempo derivativo en minutos.

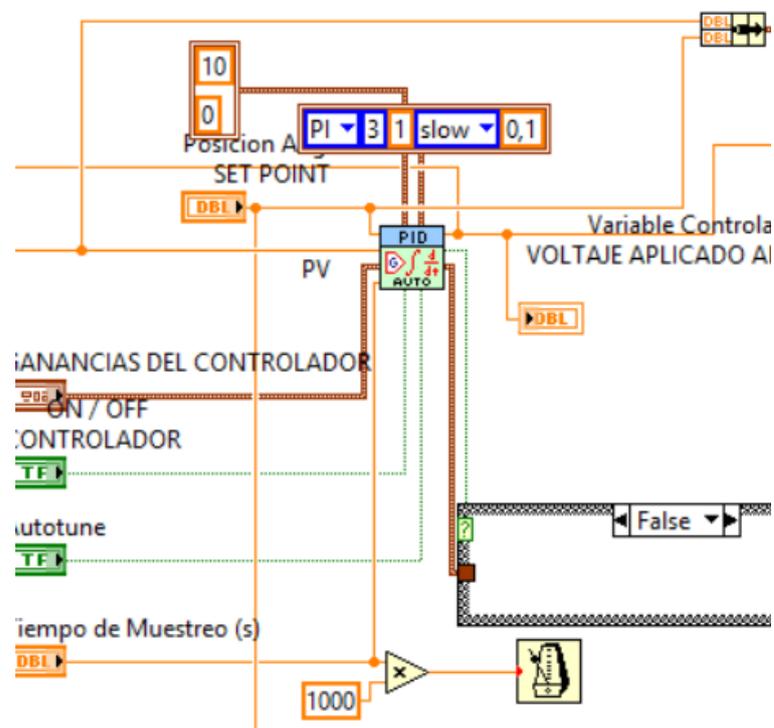


Figura 8-2 Diagrama de bloques del controlador utilizado

Fuente: Villagómez, 2017

Limitación de variables manipuladas. - Esto se realizó gracias al uso de un script de Matlab dentro del instrumento virtual, el cual hace una comparación simple del valor de la variable manipulada.

Con las relaciones que se observan en la Figura 9-2, se consigue delimitar la salida de voltaje que se entrega al motor en un rango de 0 a 10 v, con el objetivo que el sistema no sobrepase sus límites y no se nos muestre un error en pantalla por aplicar más de los 10 v permitidos.

De ahí podemos determinar que los límites máximos en tensión y corriente que soportara el sistema son 10 V y 0.5 A respectivamente.

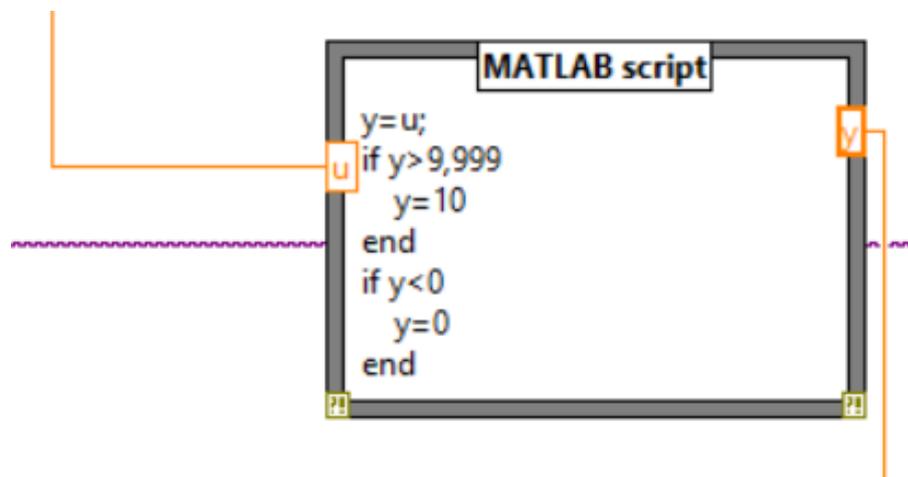


Figura 9-2 Diagrama de limitación de variables manipuladas

Fuente: Villagómez, 2017

Diseño de los criterios integrales de evaluación. - Para el diseño del criterio integral del error absoluto (IAE), se toma la señal del error medido en valor absoluto, y lo incrementa con una variable numérica. Dándonos al final un resultado de la suma del error presente en cada ciclo de muestreo. Como se muestra en la Figura 10-2.

Por su parte para el criterio integral del tiempo por el error absoluto (ITAE), se toma la señal del error medido en valor absoluto, se calcula el tiempo transcurrido, se multiplican estos dos valores y los incrementan con una variable numérica, dándonos como resultante de la suma del error presente en cada ciclo de muestreo multiplicado por el tiempo transcurrido en cada muestra. La programación de este criterio se observa en la Figura 11-2.

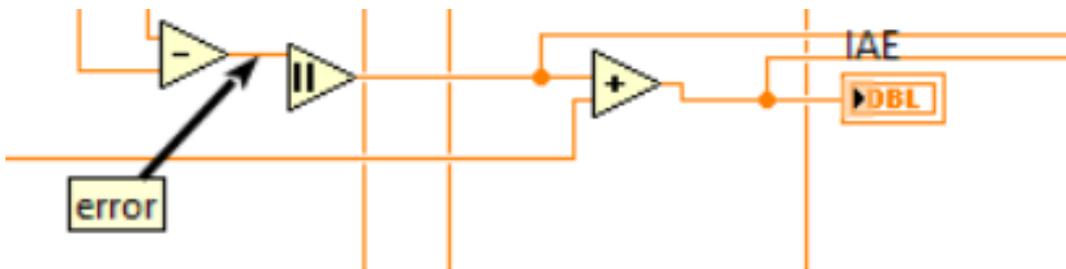


Figura 10-2 Diagrama de bloques de IAE
 Fuente: Villagómez, 2017

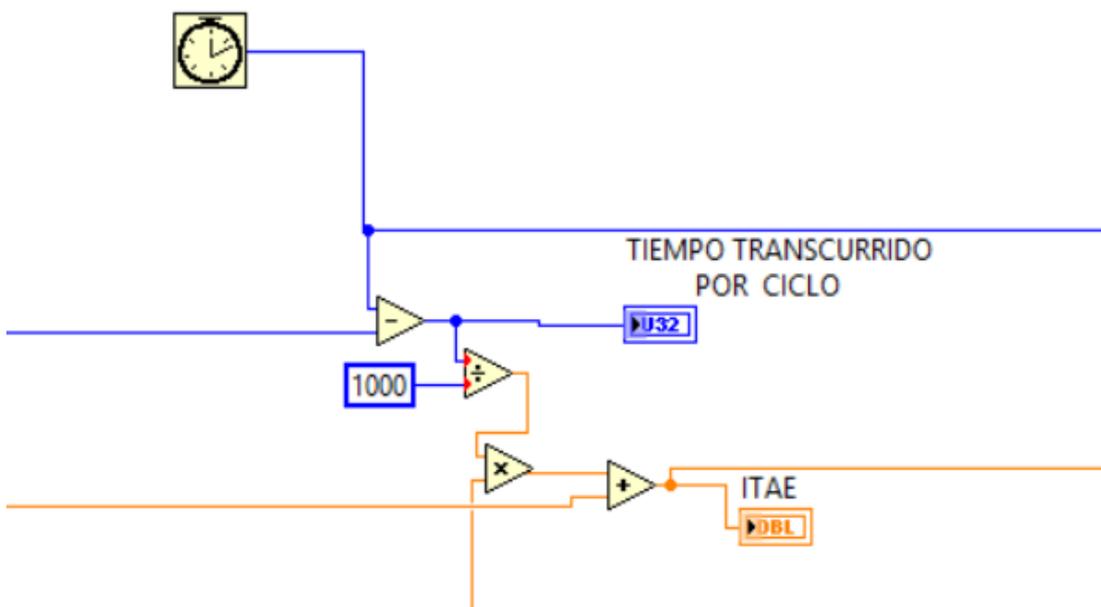


Figura 11-2 Diagrama de bloques de ITAE
 Fuente: Villagómez, 2017

Una vez concluida la programación en el diagrama de bloques, se debe prestar atención al diseño de la interfaz con el usuario. El trabajo busca realizar una interfaz con el usuario amigable, En la Figura 12-2 se puede observar la interfaz gráfica del instrumento virtual desarrollado.

Por una parte, consta con entradas de datos en donde se puede ingresar el valor de SET POINT deseado, las ganancias del controlador, realizar la auto sintonización, como se observa en la Figura 14-2.

Por otro lado, como salidas se puede observar el nivel de voltaje que se aplica al motor, la posición angular del brazo VTOL, los resultados de los criterios integrales IAE, ITAE, así como las gráficas que demuestran el comportamiento del sistema de la variable medida con respecto a la variable de consigna SET POINT, esto se muestra de mejor manera en la Figura 13-2.

El instrumento virtual cuenta con un temporizador el cual será el encargado de tomar los tiempos que nos interesen para realizar las diferentes pruebas sobre los controladores, este cuenta con un botón de reseteo que nos permite poner al temporizador en cero nuevamente, y pueda contar el tiempo deseado. Como se observa en la Figura 15-2.

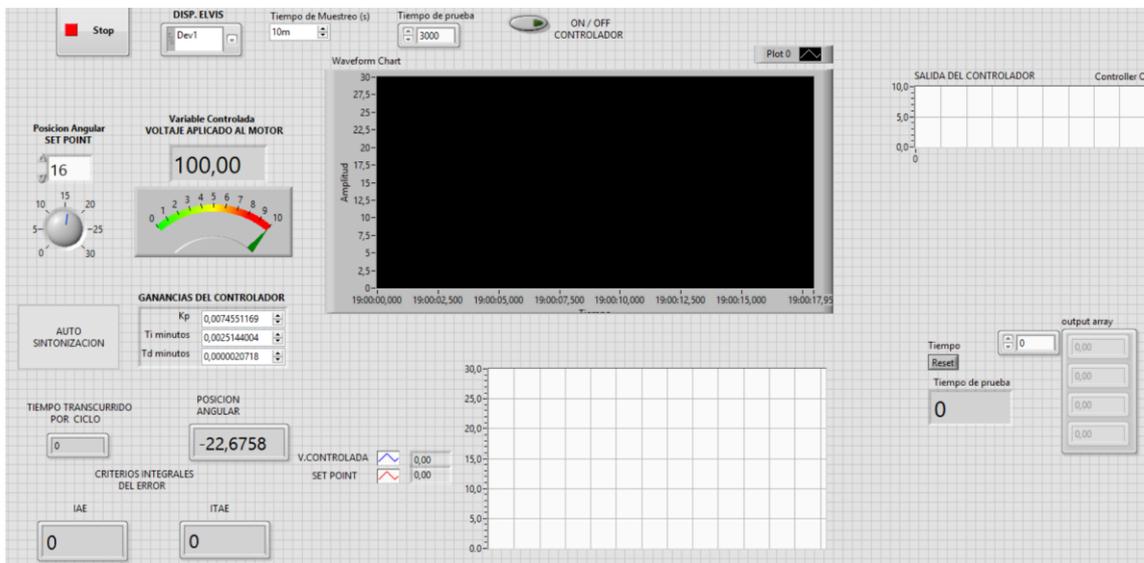


Figura 12-2 Panel frontal del instrumento virtual desarrollado

Fuente: Villagómez, 2017

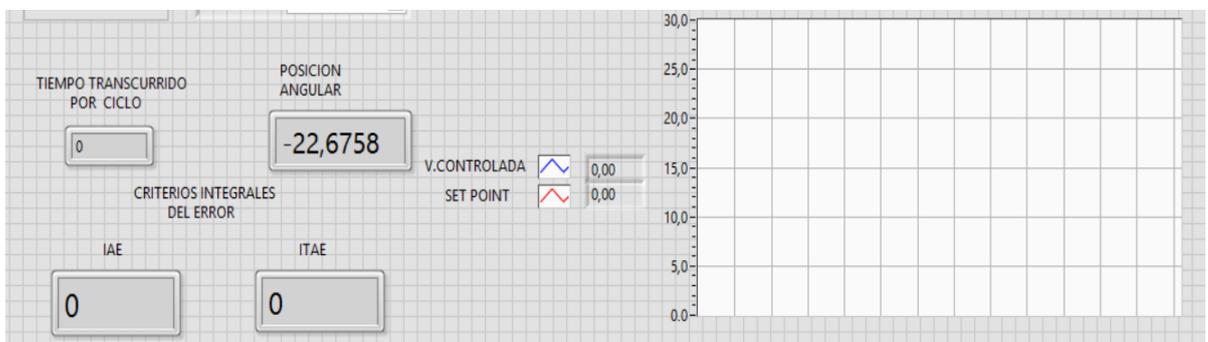


Figura 13-2 Salidas del instrumento virtual desarrollado

Fuente: Villagómez, 2017

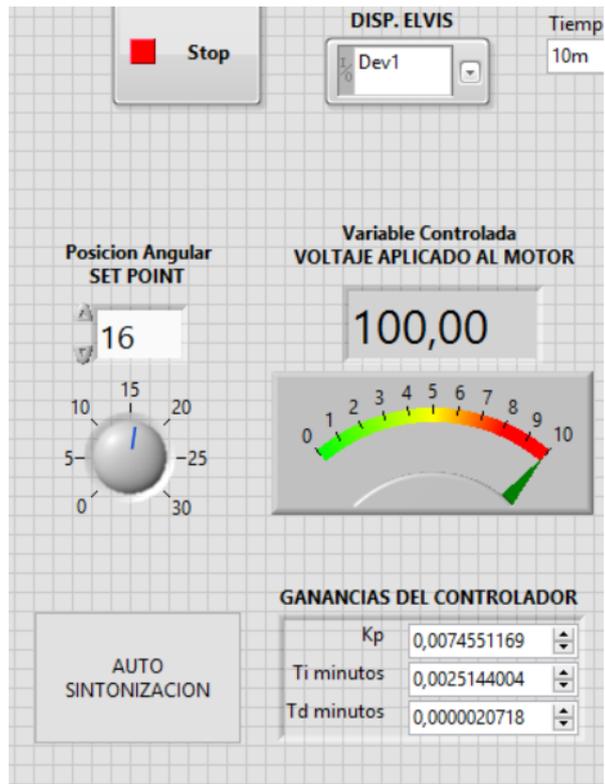


Figura 14-2 Entradas del instrumento virtual desarrollado
 Fuente: Villagómez, 2017

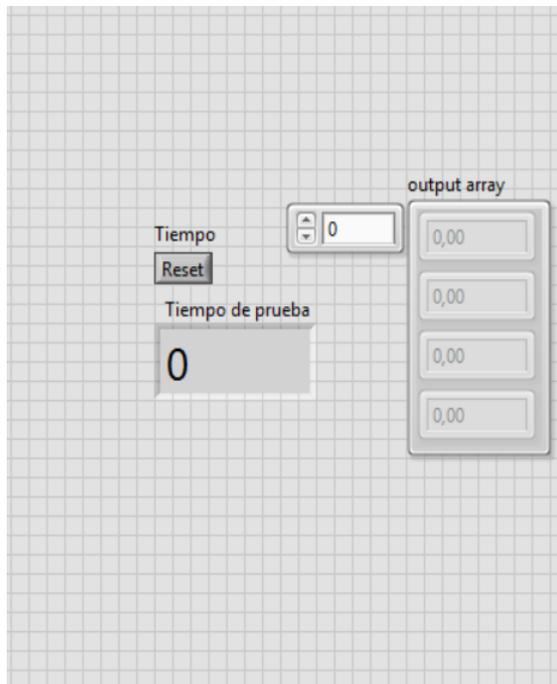


Figura 15-2 Temporizador incorporado
 Fuente: Villagómez, 2017

CAPITULO III

3 MARCO DE RESULTADOS

3.1 Validación del modelo matemático

La validación del modelo matemático se la hizo con el uso de una herramienta del software Labview llamada System Identification Toolkit, de esta manera sometemos a la planta a una prueba para obtener de forma automática la función de transferencia de la misma. Esta se muestra a continuación.

$$F(t) = \frac{1.3881}{0.17189s^2 + 0.605782s + 1}$$

Una vez obtenida dicha función de transferencia y su gráfica se exportan los datos a una hoja de Excel, con el fin de ser ingresados en Matlab como vectores, el vector de entrada será el valor de la señal simulada y el vector de salida serán las señales medidas, estas señales se observan en la Figura 2-3.

Para validar el modelo con el uso de la herramienta Ident de Matlab lo primero es escribir Ident en la ventana de comandos. A continuación, se debe cargar los vectores antes mencionados, en la pestaña de importar datos, se escoge datos en dominio del tiempo, en la entrada ingresamos el vector de la señal simulada y en la salida el vector de la señal medida, así como el tiempo en el que comienza la prueba como el tiempo de muestreo entre cada muestra.

En la sección de operación en las pestañas se escoge la opción de inicio rápido para que la herramienta Ident realice las operaciones necesarias, esto se observa de mejor manera en la Figura 1-3, la herramienta realiza la validación del modelo bajo el criterio de n4sid, el resultado de la validación del modelo se observa en la Figura 3-3.

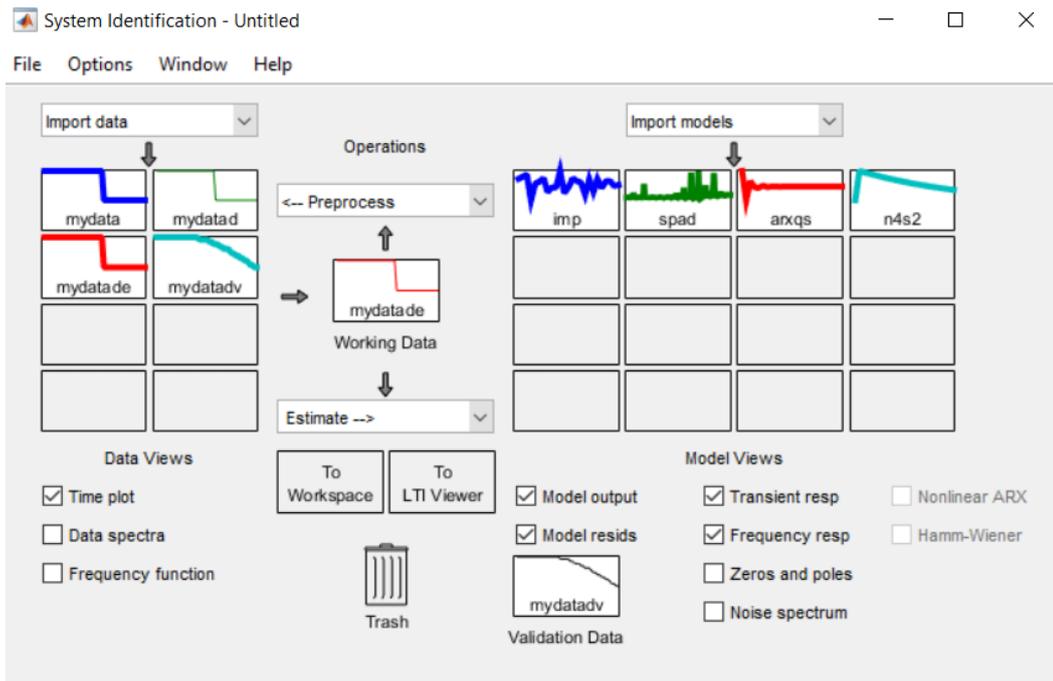


Figura 1-3 Validación del modelo encontrado con Ident
Fuente: Villagómez, 2017

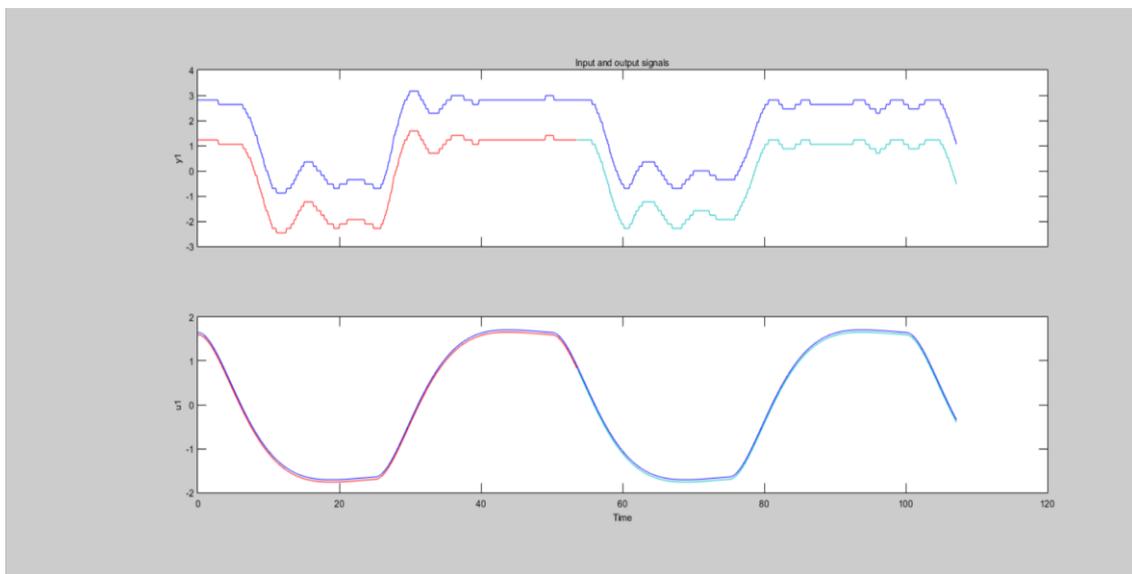


Figura 2-3 Entradas y salidas del modelo encontrado
Fuente: Villagómez, 2017

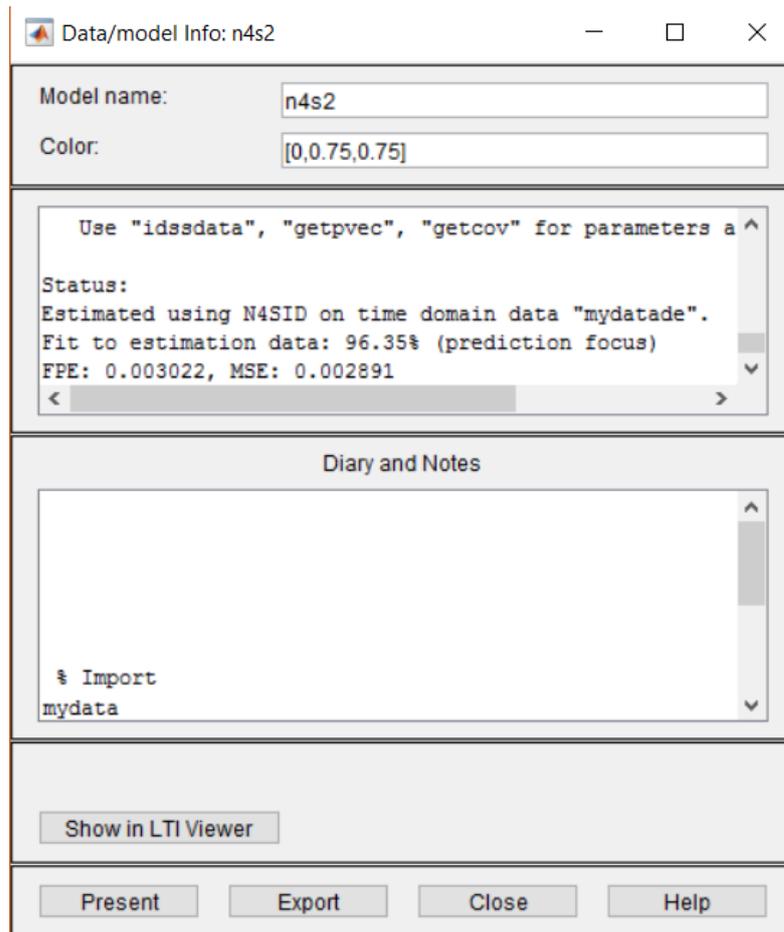


Figura 3-3 Validación del modelo encontrado con n4sid
 Fuente: Villagómez, 2017

La herramienta da un resultado estimado de validación del 96.35%, este resultado hace referencia al modelo encontrado automáticamente gracias a la herramienta del software Labview System Identification Toolkit . Ahora se repite el procedimiento descrito anteriormente con la función de transferencia que resulta del modelamiento analítico en condiciones normales es decir sin agregar ninguna masa adicional en el contra peso del brazo VTOL. La función de transferencia resultante se muestra a continuación.

$$F_a(t) = \frac{3.81}{s^2 + 0.4535s + 1.036}$$

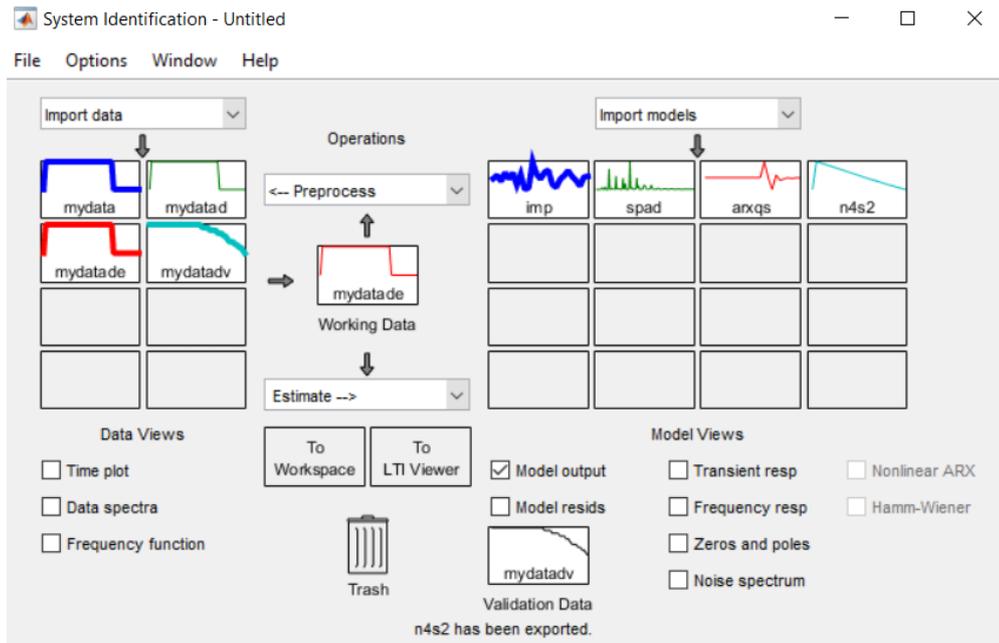


Figura 4-3 Validación del modelo analítico con Ident
 Fuente: Villagómez, 2017

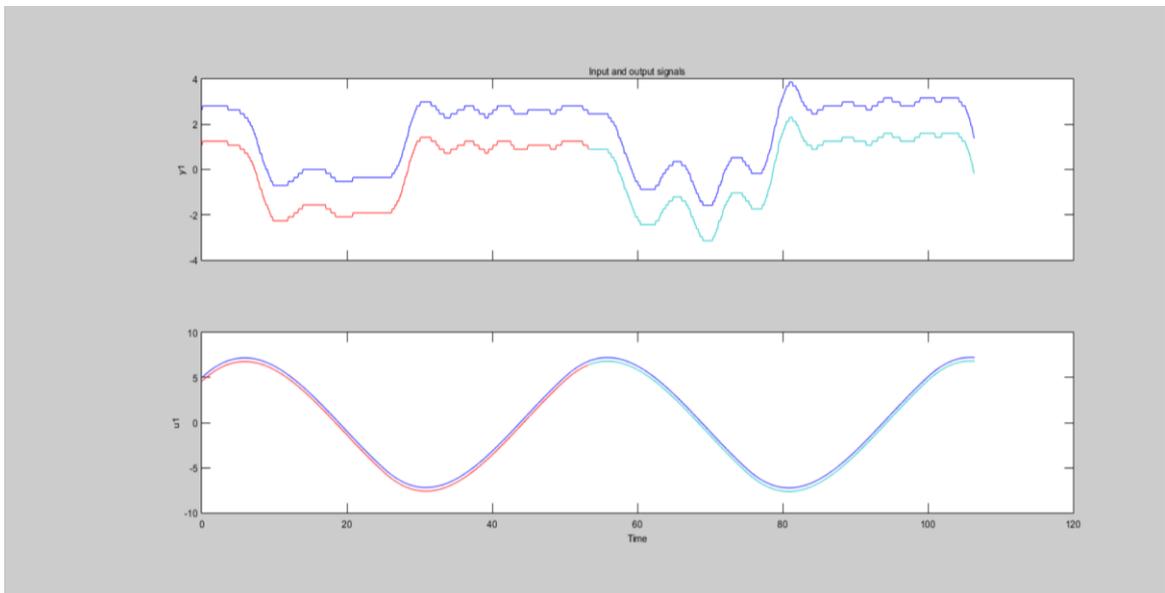


Figura 5-3 Entradas y salidas del modelo analítico
 Fuente: Villagómez, 2017

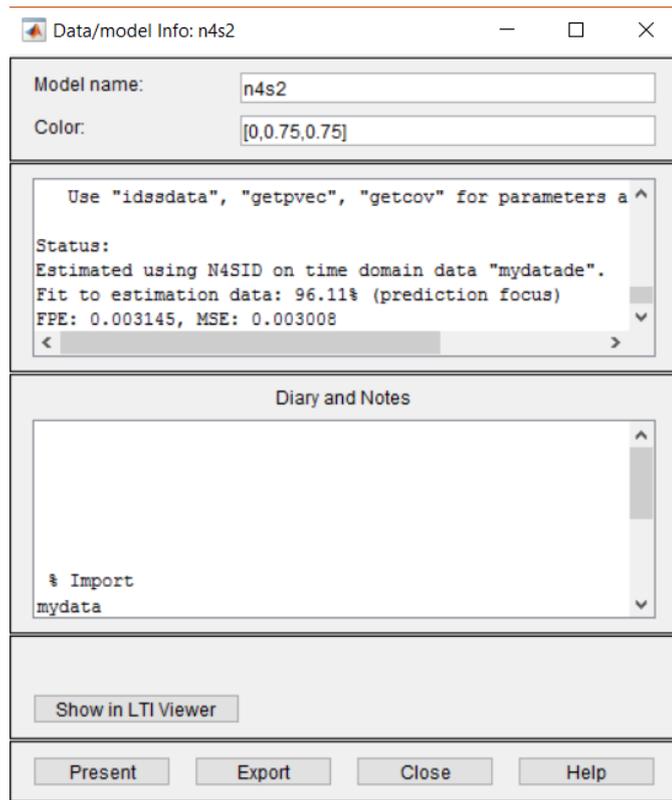


Figura 6-3 Validación del modelo analítico con n4sid
Fuente: Villagómez, 2017

La herramienta para el modelo analítico da un resultado de validación aproximado del 96.11%. como se observa en la Figura 6-3.

3.2 Validación del controlador obtenido con ziegler & nichols

Una vez en el instrumento virtual desarrollado, se ingresan los valores del compensador obtenidos mediante este método de la respuesta al escalón, como se ve en la Tabla 1-3, se procede a realizar pruebas para verificar su funcionamiento, y la respuesta ante perturbaciones y cambios en la señal de consigna.

Tabla 1-3 Valores obtenidos de controlador con método del escalón

Valores del controlador	
Kp	0,0386244208
Ti (minutos)	0,0228290534
Td (minutos)	0,0057072634

Realizado por: Juan José Villagomez, 2017

Se realiza una prueba en un tiempo de 60 segundos para analizar el comportamiento del sistema para esos valores del controlador, se aplica una perturbación a los 30 segundos, la señal de consigna o SET POINT se establece en 16 grados, el sistema arrojó los siguientes resultados que se observan en la Tabla 2-3.

Tabla 2-3 Resultados de la validación de controlador Ziegler and Nichols

Controlador método Ziegler & Nichols	
Tiempo de retardo	09.95
Tiempo de estabilización	23.12
Tiempo de estabilización frente a perturbación	25.50

Realizado por: Juan José Villagomez, 2017

El sistema está en la capacidad de estabilizarse frente a una perturbación de 6.54gr en la masa del contra peso, en un tiempo de 25.50 segundos, la respuesta del sistema es un poco lenta, pero logra la compensación deseada, estabilizando al brazo VTOL en la señal de consigna y eliminando el error no deseado.

3.3 Resultado comparativo entre controladores

Una vez realizadas las pruebas con el controlador de Ziegler and Nichols, se determina unos nuevos valores para el controlador PID de forma experimental, es decir variando los valores de K_p , T_i , T_d , y analizando su respuesta ante perturbaciones, de este procedimiento se determinan los siguientes valores del controlador como se muestra en la Tabla 3-3,

Tabla 3-3 Valores obtenidos de controlador con método experimental

Valores del controlador Experimental	
K_p	0,0074551169
T_i (minutos)	0,0025144004
T_d (minutos)	0,0000020718

Realizado por: Juan José Villagomez, 2017

De la experimentación se determina que todos los parámetros del compensador tienen un menor valor numérico que los que se encontraron con el método de la respuesta al escalón.

Una vez obtenidos los valores se realiza diferentes pruebas sobre el sistema para comprobar la respuesta del sistema frente a perturbaciones, todas estas pruebas se realizan en un tiempo de 60 segundos, con una señal de consigna de 16 grados.

Primero se realiza una prueba en la que el sistema despega en condiciones normales y se aplica una masa de 6.54 gr en el contra peso, a los 30 segundos, los resultados que arrojó esta prueba se muestran en la Tabla 4-3.

Tabla 4-3 Valores obtenidos de la primera prueba comparativa

Controlador método Ziegler & Nichols		Controlador método Experimental	
Kp	0,0386244208	Kp	0,0074551169
Ti (minutos)	0,0228290534	Ti (minutos)	0,0025144004
Td (minutos)	0,0057072634	Td (minutos)	0,0000020718
Tiempo de retardo	09.95	Tiempo de retardo	06.52
Tiempo de estabilización	23.12	Tiempo de estabilización	17.81
Tiempo de estabilización frente a perturbación	25.50	Tiempo de estabilización frente a perturbación	16.42

Realizado por: Juan José Villagomez, 2017

La siguiente prueba se realiza aplicando una masa de 3.66 gr en el contra peso antes de iniciar la prueba, se inicializa el instrumento virtual y se aplica una masa adicional al contra peso de 2.88 gr a los 35 segundos de comenzada la prueba, los resultados que arrojó esta prueba se observa en la Tabla 5-3.

Tabla 5-3 Valores obtenidos de la segunda prueba comparativa

Controlador método Ziegler & Nichols		Controlador método Experimental	
Kp	0,0386244208	Kp	0,0074551169
Ti (minutos)	0,0228290534	Ti (minutos)	0,0025144004
Td (minutos)	0,0057072634	Td (minutos)	0,0000020718
Tiempo de retardo	09.86	Tiempo de retardo	05.64
Tiempo de estabilización	20.56	Tiempo de estabilización	11.32
Tiempo de estabilización frente a perturbación	22.43	Tiempo de estabilización frente a perturbación	14.62

Realizado por: Juan José Villagomez, 2017

La última prueba que se realiza sobre el sistema consiste en aplicar una masa de 6.54 gr en el contra peso antes de iniciar la prueba, se inicializa el instrumento virtual y se retira dicha masa a los 35 segundos de comenzada la prueba, los resultados que arrojó esta prueba se muestran en la Tabla 6-3.

Tabla 6-3 Valores obtenidos de la tercera prueba comparativa

Controlador método Ziegler & Nichols		Controlador método Experimental	
Kp	0,0386244208	Kp	0,0074551169
Ti (minutos)	0,0228290534	Ti (minutos)	0,0025144004
Td (minutos)	0,0057072634	Td (minutos)	0,0000020718
Tiempo de retardo	08.35	Tiempo de retardo	04.96
Tiempo de estabilización	18.20	Tiempo de estabilización	10.02
Tiempo de estabilización frente a perturbación	17.43	Tiempo de estabilización frente a perturbación	13.15

Realizado por: Juan José Villagomez, 2017

3.4 Evaluación de los controladores con criterios integrales

De las tres pruebas realizadas anteriormente, el instrumento virtual calcula los criterios integrales del error IAE, ITAE con los dos diferentes diseños de controladores, los resultados de IAE de las tres pruebas con sus respectivos valores se muestra en el Gráfico 1-3, por otra parte, los resultados de ITAE, se observan en el Gráfico 2-3

Dando como resultado del mejor desempeño al controlador que se obtuvo de manera experimental, el criterio que ponderará en este trabajo por su validez numérica será el criterio de la integral del error absoluto IAE, el que muestra una mejora en el desempeño del controlador en las diferentes pruebas de alrededor del 45%.

Para encontrar esta mejora se tomó al valor mayor como el 100 %, con la aplicación de una regla de tres simple, se determina el valor porcentual del menor valor, y la diferencia entre estos se considera como la mejora en el desempeño entre los compensadores.

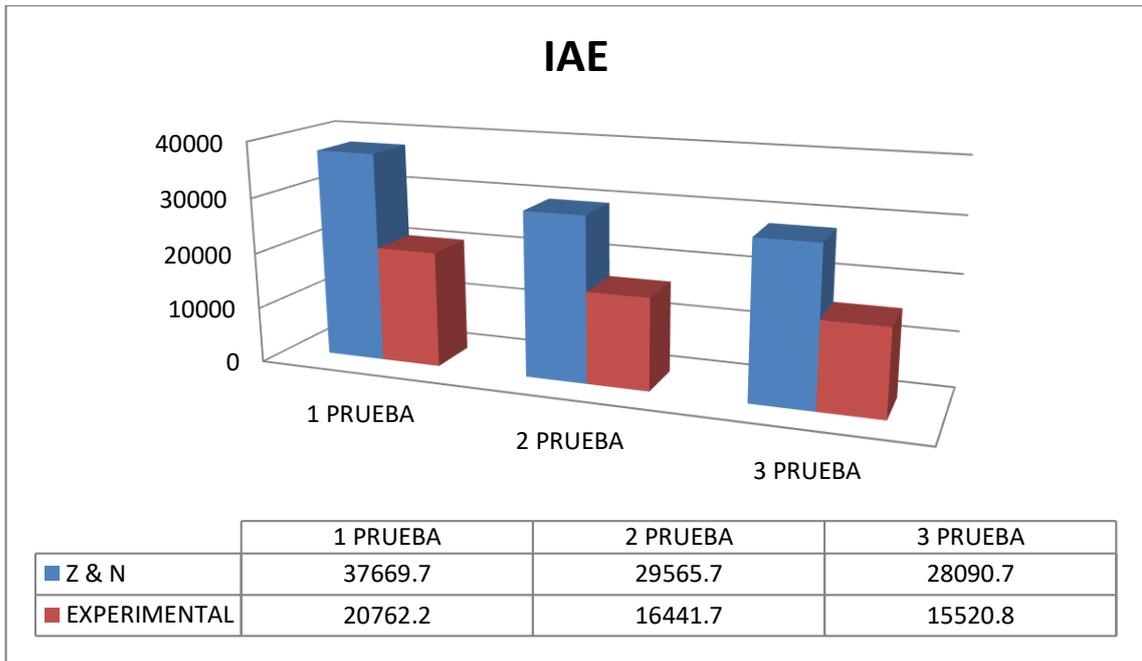


Gráfico 1-3 Gráfico de valores obtenidos de IAE

Fuente: Villagómez, 2017

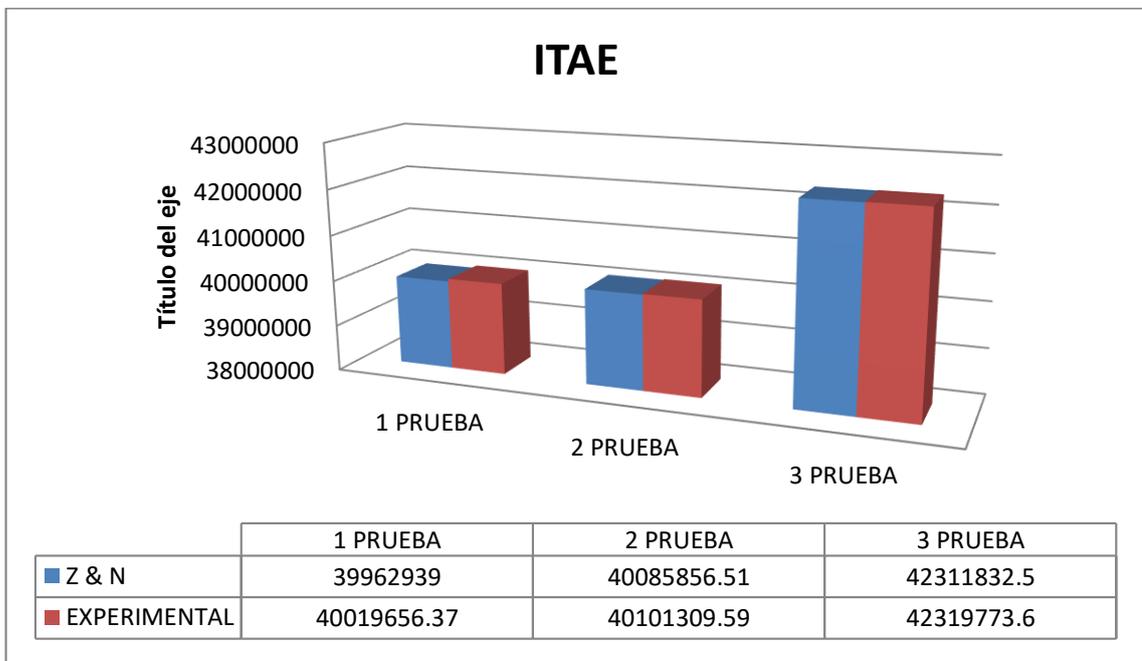


Gráfico 2-3 Gráfico de valores obtenidos de ITAE

Fuente: Villagómez, 2017

3.5 Sistematización de resultados

3.5.1 *¿Es factible diseñar un control auto sintonizado para la planta QNET Vertical Take-off and Landing (VTOL) usando software de control LABVIEW en lazo cerrado?*

El diseño del control auto sintonizado en Labview es posible gracias a la herramienta PID & fuzzy logic, la cual fue utilizada en el instrumento virtual desarrollado en el presente trabajo, el mismo comanda la planta gracias a la implementación de un controlador PID, una vez en vuelo se puede realizar una auto sintonización en tiempo real que busca valores que optimicen el funcionamiento del sistema y su respuesta frente a perturbaciones.

3.5.2 *¿Qué método será el más óptimo a ser utilizado para el modelamiento experimental?*

El modelo matemático analítico se lo realiza de manera ideal, con fines de ejercicios académicos, es decir el sistema mecánico se lo determino a partir del uso de la primera y segunda ley de Newton, las mismas que demostraron ser las leyes físicas que condicionan el funcionamiento real de la planta.

De forma paralela la herramienta que presenta el software de identificación de sistemas es una alternativa muy viable, cuando el sistema es muy complejo de analizarlo, y se busca una respuesta de manera automática, sin necesidad de realizar el modelamiento analítico.

3.5.3 *¿Bajo qué criterio de sintonización se desarrollaría el controlador?*

Cuando se diseñan controladores es muy común, encontrar más de un método que permita obtener los parámetros del compensador, estos métodos se han venido desarrollando con el fin de dar una solución práctica a los sistemas de control.

En este trabajo se utilizó el criterio de Ziegler and Nichols expuesto en el año de 1943, más conocido como el primer método de sintonización, este método fue escogido por ser uno de los métodos más comunes de sintonización, y, tiene la ventaja de ser un método experimental que nos permite realizar pruebas en tiempo real sobre la planta.

Una vez desarrollado el instrumento virtual que comanda el sistema, se pudo realizar pruebas experimentales para obtener los parámetros del PID de una forma experimental, y estudiar su respuesta frente a las diferentes perturbaciones que se aplican a la planta

3.5.4 *¿Qué ventaja obtendremos al determinar un algoritmo de auto sintonización?*

La auto sintonización implementada en el instrumento virtual, usa la herramienta del PID wizard auto tune para encontrar, nuevos valores del controlador a partir de una sintonización más fina, este proceso se lo realiza siguiendo una secuencia de pasos que muestra la herramienta, el proceso permite obtener estos valores mientras el sistema está en vuelo, realizando la auto sintonización en tiempo real.

Este proceso se lo puede realizar en condiciones normales de la planta, o cuando la misma esta con el incremento de masa en el contra peso, lo que busca el sistema es acoplar los parámetros del PID a las necesidades que presenta el sistema en ese momento.

3.5.5 *¿El controlador realizado cumplirá con los criterios integrales del error en específico IAE e ITAE?*

Los criterios integrales del error tienen como objetivo la evaluación del desempeño de los controladores, es decir presentan un valor numérico, de la sumatoria del error que se presenta durante cada muestra en su valor absoluto, para lo cual es indispensable que las pruebas para comparar el desempeño de los compensadores, se deben realizar bajo las mismas condiciones, es decir en el mismo tiempo de prueba, ingresar las mismas perturbaciones, etc.

Al final de la prueba el instrumento virtual proporciona el valor total de dicha sumatoria, el menor valor numérico obtenido, será la pauta para determinar cuál fue el controlador que presento el mejor desempeño en las pruebas, obtenido el menor valor de error.

CONCLUSIONES

- El estudio del funcionamiento de la planta fue de vital importancia para el desarrollo metodológico, del presente trabajo de titulación, ya que permitió determinar la variable q controlada que es el posicionamiento angular y la variable manipulada que será el voltaje que aplique al motor. El diseño del control auto sintonizado se lo pudo realizar gracias al uso de la herramienta PID and Fuzzy Logic, del software LabView.
- El modelo matemático analítico realizado, es una buena aproximación al real comportamiento del sistema electro mecánico de la planta, este modelo fue validado gracias al uso de la herramienta System Identification del software Labview, quien en tiempo real nos puede determinar el modelo del sistema de forma automática, sin necesidad de determinar las leyes fundamentales que rigen su comportamiento, y la herramienta ident de Matlab que proporciona un valor estimado del modelo.
- El método de la respuesta al escalón expuesto por Ziegler and Nichols en 1943, permite obtener los parámetros del controlador a partir de una tabla de valores establecidos por los desarrolladores del método, estos valores encontrados cumplen con los requerimientos de estabilización del sistema, y son la pauta inicial para la obtención de nuevos valores del compensador de una manera experimental.
- Las perturbaciones ingresadas en el sistema son constantes con el objetivo de poder realizar pruebas comparativas entre los diferentes compensadores encontrados, si ingresamos perturbaciones muy pronunciadas y variables el sistema perderá la capacidad de estabilizarse en el tiempo esperado, se puede concluir que el presente diseño responde a unas características específicas tanto en la posición angular de 0 a 30 grados, así como en el motor de 10 V y 0.5 A.
- Los criterios integrales del error absoluto IAE, e ITAE son herramientas matemáticas que nos permiten evaluar la eficiencia de los controladores, en un tiempo específico de prueba, el controlador que al final de la experimentación obtuvo un valor numérico menor en el error total, fue el experimental siendo determinado como el controlador más eficaz para el sistema mostrando una mejora en su eficiencia de alrededor del 45%.

- El criterio con mayor ponderación en este trabajo será el IAE, puesto que toma solo el valor absoluto del error medido en cada muestra, al contrario de ITAE quien multiplica este valor por el tiempo de cada muestra, lo que conlleva a que su magnitud numérica sea muy alta, complicando el análisis de los resultados, debido a que el sistema presenta un tiempo muerto.
- De la experimentación realizada se puede concluir que el proceso de auto sintonización solo se lo podrá realizar una vez que el sistema esté en vuelo y alcance la estabilidad deseada, los valores que se obtengan de esta auto sintonización servirán únicamente para ese momento del vuelo, estos valores no deberán ser utilizados como los valores iniciales del controlador en el instrumento virtual.

RECOMENDACIONES

- Con el uso del software LabView se recomienda realizar instrumentos virtuales con el uso de la gran gama de herramientas en el área del control automático que podemos encontrar en el programa, es importante entender el funcionamiento de cada sub Vi que proporciona el software, puesto que han sido desarrollados para aplicaciones específicas.
- La masa que se agregue al contra peso no debe ser mayor de la que se ha utilizado en este trabajo para realizar las pruebas, si se ingresa una masa muy alta se puede ver directamente afectado el funcionamiento del sistema, puesto que el esfuerzo que este haría en niveles de corriente podría quemar el motor.
- Con el fin de evaluar los controladores, se los debe valorar bajo las mismas condiciones, eso implica minimizar al máximo perturbaciones no controladas, por lo que se recomienda que las pruebas que se realicen se las haga en ambientes cerrados sin flujos de corrientes de aire muy grandes, puesto que las respuestas obtenidas no serán las más favorables.
- Cuando se realiza el proceso de auto sintonización se recomienda recalcular el valor del ruido estimado, no ingresar una señal de relé con una amplitud muy elevada, y no se debe determinar un controlador de respuesta rápida, puesto que en los controles de vuelo este tipo generalmente ante una respuesta muy rápida presenta inestabilidad continua
- El instrumento virtual desarrollado en este trabajo de titulación, debe ser utilizado como una aplicación didáctica por los docentes en el laboratorio de la asignatura de control automático, en la escuela de Ingeniería Electrónica en Control y Redes Industriales de la Facultad de Informática y Electrónica, con el uso de esta los estudiantes puedan determinar valores del controlador de forma experimental y analizar sus respuestas frente a diferentes perturbaciones.
- Debe realizarse trabajos afines al presente con carácter investigativo sobre las demás plantas QNET con las que la Facultad de Informática y Electrónica cuenta, puesto que son dispositivos muy interactivos que buscan corroborar los fundamentos teóricos sobre sistemas de control, y no existen aplicaciones desarrolladas para estas en la actualidad.
- Se recomienda evaluar el algoritmo de control expuesto en este trabajo sobre sistemas QNET de vuelo existentes en el mercado que cuentan con más de un grado de libertad.

BIBLIOGRAFIA

1. **ALFARO RUIZ, Victor M.** *Ecuaciones para controladores PID universales*. [En línea] San Jose : Universidad de Costa Rica. [Citado el: 10 de Enero de 2017.] Disponible en: http://eie.ucr.ac.cr/uploads/file/documentos/pub_inv/articulos/valfaro02A.pdf
2. **ALVAREZ G, Carlos, SOTO P, Andrés y WATKINS O, Francisco.** "Simulación de controladores digitales", *Ingeniare*, Santiago Chile , 2009, Vol. 17. Disponible en: http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-33052009000300004
3. **ASTROM, Karl J y HAGGLUND, Tore.** *Método de Ziegler-Nichols y procedimientos relacionados*. [En línea] Madrid-España : Pearson Educación, 2009. [Citado el: 2 de Marzo de 2017.] Disponible en: <http://eva.sepyc.gob.mx:8383/greenstone3/sites/localsite/collect/ciencia1/index/assoc/HASH0190/8f390ad0.dir/12990071.pdf>
4. **INZUNZA, Juan.** *Torque y Equilibrio de un cuerpo rígido*. [En línea] Santiago-Chile : Universidad de Concepción, 2007. Disponible en: <http://www2.udec.cl/~jinzunza/fisica/cap6.pdf>
5. **MATHWORKS.** Descripción general de MATLAB. [En línea] 10 de Febrero de 2012. [Citado el: 3 de Marzo de 2017.] <http://nereida.deioc.ull.es/~pcgull/ihiu01/cdrom/matlab/contenido/node2.html>.
6. **NATIONAL INSTRUMENTS.** Descripción general de LABVIEW [En línea] 4 de Junio de 2015. [Citado el: 5 de Febrero de 2017.] Disponible en: <http://digital.ni.com/public.nsf/allkb/D2E364AAF4D74EE6862575840049BC6E>.
7. **OGATA, Katsuhiko.** *Ingeniería de control moderna*. 5 ed. Madrid-España : Pearson Educación, 2010. pp 63-568
8. **PALAZZESI, Ariel.** *VTOL: Historia del vuelo vertical*. [En línea] 3 de Mayo de 2010. [Citado el: 10 de Enero de 2017.] Disponible en: <http://www.neoteo.com/vtol-historia-del-vuelo-vertical>.
9. **PLATERO DUEÑAS, Carlos.** *Modelo matemático de los sistemas dinámicos*. [En línea] Julio de 2008. [Citado el: 22 de Enero de 2017.]. Disponible en:

http://www.elai.upm.es/webantigua/spain/Asignaturas/Servos/Apuntes/4_Modelado.pdf

.

10. **SKHOL**. *Clasificacion de Aeronaves VTOL*. [Blog]. [Citado el: 14 de Enero de 2017.].
Disponible en: <http://aeronauticaunefista.blogspot.com/>.