

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE



FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

TRABAJO DE GRADO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA EN MECATRÓNICA

TEMA:

“CONSTRUCCIÓN DE UN MÓDULO DE PALETA HÁPTICA PARA
DESARROLLAR PRÁCTICAS DE LABORATORIO DE SISTEMAS
DINÁMICOS EN LA CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA.”

AUTORA: Gavilima Velastegui Jessica Gabriela

DIRECTOR: PhD. Ramón Cala Aiello

Ibarra - Ecuador

2017



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN

A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

La Universidad Técnica del Norte dentro del proyecto Repositorio Digital Institucional, determinó la necesidad de disponer de textos completos en formato digital con la finalidad de apoyar los procesos de investigación, docencia y extensión de la Universidad. Por medio del presente documento dejo sentada mi voluntad de participar en este proyecto, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1003374293		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Gavilima Velastegui Jessica Gabriela		
DIRECCIÓN:	Yahuarcocha, Calle la Portada N 1-98		
EMAIL:	jggavilimav@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:	062-577243	TELÉFONO MÓVIL:	0986781296

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	CONSTRUCCIÓN DE UN MÓDULO DE PALETA HÁPTICA PARA DESARROLLAR PRÁCTICAS DE LABORATORIO DE SISTEMAS DINÁMICOS EN LA CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA
AUTOR:	Gavilima Velastegui Jessica Gabriela
FECHA:	17 febrero de 2017
PROGRAMA:	PREGRADO
TITULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero en Mecatrónica
DIRECTOR:	PhD. Ramón Cala Aiello

2. AUTORIZACIÓN DE USO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD

Yo, Jessica Gabriela Gavilima Velastegui con cédula de identidad Nro. 1003374293, en calidad de autor y titular de los derechos patrimoniales de la obra o trabajo de grado descrito anteriormente, hago entrega del ejemplar respectivo en formato digital y autorizo a la Universidad Técnica del Norte, la publicación de la obra en el Repositorio Digital Institucional y uso del archivo digital en la Biblioteca de la Universidad con fines académicos, para ampliar la disponibilidad del material y como apoyo a la educación, investigación y extensión; en concordancia con la Ley de Educación Superior Artículo 144.

3. CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrollo sin violar derechos de autores de terceros, por lo tanto, la obra es original, y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 17 días del mes de febrero de 2017



Firma

Nombre: Jessica Gabriela Gavilima Velastegui

Cédula: 103374293



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE GRADO A FAVOR
DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Yo, Jessica Gabriela Gavilima Velastegui, con cédula de identidad Nro. 1003374293, manifiesto mi voluntad de ceder a la Universidad Técnica del Norte los derechos patrimoniales consagrados en la Ley de Propiedad Intelectual del Ecuador, artículos 4, 5 y 6, en calidad de autor (es) de la obra o trabajo de grado denominado: **CONSTRUCCIÓN DE UN MÓDULO DE PALETA HÁPTICA PARA DESARROLLAR PRÁCTICAS DE LABORATORIO DE SISTEMAS DINÁMICOS EN LA CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA**, que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero en Mecatrónica, en la Universidad Técnica del Norte, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente. En mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Técnica del Norte.

Ibarra, a los 17 días del mes de febrero de 2017

A handwritten signature in blue ink, which appears to read 'Jessica Gavilima', is written over a horizontal line.

Firma

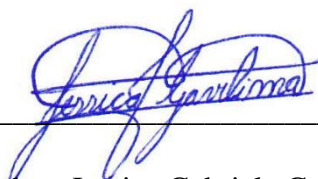
Nombre: Jessica Gabriela Gavilima Velastegui

Cédula: 1003374293

DECLARACIÓN

Yo, **Jessica Gabriela Gavilima Velastegui**, declaro bajo juramento que el trabajo aquí escrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Universidad Técnica del Norte - Ibarra, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.




Nombre: Jessica Gabriela Gavilima Velastegui

Cédula: 1003374293

CERTIFICACIÓN

En calidad de tutor del trabajo de grado titulado: “CONSTRUCCIÓN DE UN MÓDULO DE PALETA HÁPTICA PARA DESARROLLAR PRÁCTICAS DE LABORATORIO DE SISTEMAS DINÁMICOS EN LA CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA”, certifico que el presente trabajo fue desarrollado por la señorita Jessica Gabriela Gavilima Velastegui, bajo mi supervisión.



PhD. Ramón Cala Aiello

DIRECTOR DEL PROYECTO



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

DEDICATORIA

Este trabajo va dedicado a mis padres queridos Jorge y Mery, personas correctas, sinceras, honestas, responsables, cariñosas con sus hijas y demasiado trabajadoras, a mi ñaña querida Anita una chica responsable, educada y muy emprendedora, a mi ángel de la guarda mi pequeño hermanito y a mi gran familia de abuelitas, tías, tíos, primos y primas.

Gabriela Gavilima.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por permitirme compartir este gran logro con las personas que más quiero mi madre, mi padre, mi hermana y con todos mis seres queridos.

Agradezco a mis padres por su apoyo total en mi formación profesional como también en mi formación personal, lograron de mí, una personal con los mejores valores que pudieron inculcar.

De la misma manera agradecer a los docentes y amigos de la carrera de Ingeniería Mecatrónica, en especial al PhD. Ramón Cala, Director del Proyecto, por brindar su confianza y apoyo incondicional para culminar este proyecto de tesis.

Gabriela Gavilima.

RESUMEN

En el presente proyecto se detalla el desarrollo del módulo de paleta háptica, una investigación realizada con el objetivo de construir un dispositivo capaz de transmitir al usuario los sistemas dinámicos simulados y ser capaz de realizar actividades de control. El módulo de paleta háptica está constituido por una palanca de mando de fuerza de respuesta de un solo eje. La parte electrónica está implementada por: un actuador, un sistema sensorial con un sensor de posición angular y un microcontrolador Arduino. La comunicación e interconexión para el control de la planta se desarrolla en LabVIEW. En este trabajo se planteó una nueva práctica educativa que se llevó a cabo gracias a la paleta háptica de bajo costo construida en la Universidad Técnica del Norte, centrándose principalmente en añadir una actividad de práctica realizable con el módulo, el uso de este como equipo de práctica en el tema de oscilaciones, presentando el experimento de movimiento armónico y movimiento amortiguado. A nivel de Ecuador e Imbabura se implementó el primer módulo de paleta háptica con cambios electrónicos y de software, presentando el cambio en su interfaz de control, sin dejar de lado las características que identifica a la paleta háptica de otras universidades, esto como un gran aporte al aprendizaje en el proceso de enseñanza que se llevó a cabo en la universidad Técnica del Norte, siendo base para el desarrollo de futuros trabajos de investigación en dispositivos hápticos.

SUMMARY

This project details the construction of a haptic paddle module, a research was carried out to make a device, which will be able to transmit controlled movements, so, the user will be in the capacity to perform control activities and simulation of systems. The haptic paddle module consists of a single-axis response force of control lever and its electronic part is implemented by: an actuator, a sensory system with an angular position sensor and an Arduino microcontroller for communication and its interconnection between LabVIEW and the plant for its control. In this work, a new educational practice was proposed, it was carried out thanks to the low cost of haptic paddle which was built at “Técnica del Norte” University, it has been focusing mainly on a feasible practice activity with the haptic paddle module, the usage of this as a practice equipment for oscillations, presenting the harmonic and damped motion experiment. In Ecuador, specifically Imbabura, it has been implemented the first module of haptic paddle with electronic and software changes, having changes in its control interface, without leaving aside the characteristics which identifies the haptic paddle from other universities, this is a great contribution for learning in the teaching process which is carried out at “Técnica del Norte” University, it will be the basis for the development of future researches about haptic devices.

KEYWORDS: Movements, simulation, haptic, paddle, lever, actuator, oscillation, motion, interface.



ÍNDICE DE CONTENIDO

1.	IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA.....	ii
2.	AUTORIZACIÓN DE USO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD.....	iii
3.	CONSTANCIAS.....	iii
CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE GRADO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE		
	DECLARACIÓN	v
	CERTIFICACIÓN	vi
	DEDICATORIA	vii
	AGRADECIMIENTO	viii
	RESUMEN.....	ix
	SUMMARY	x
	ÍNDICE DE CONTENIDO.....	xi
	ÍNDICE DE TABLAS	xv
	ÍNDICE DE FIGURAS.....	xvi
	ÍNDICE DE ECUACIONES	xvii
	INTRODUCCIÓN	1
	DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	2

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
OBJETIVO GENERAL	3
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
JUSTIFICACIÓN.....	4
ALCANCE	4
ANTECEDENTES	5
CAPÍTULO I.....	8
1. MARCO TEÓRICO.....	8
1.1 DISPOSITIVOS HÁPTICOS	8
1.2 PALETA HÁPTICA	10
1.3 SISTEMA DE CONTROL.....	11
1.3.1 MODELADO MATEMÁTICO DE SISTEMAS DINÁMICOS.....	12
1.3.2 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA	12
1.3.3 CARACTERÍSTICAS DE RESPUESTA DE LOS SISTEMAS.....	13
1.3.4 SISTEMAS DE SEGUNDO ORDEN.....	13
1.3.5 TIPOS DE CONTROL.....	14
1.4 ACTUADOR.....	18
1.4.1 MOTOR DC	18

1.5	SENSOR.....	18
1.5.1	ENCODER	19
1.6	ARDUINO SOFTWARE Y HARDWARE.....	19
1.7	MICROCONTROLADOR	20
1.8	COMUNICACIÓN SERIE	21
1.9	SISTEMA ARDUINO (IDE).....	22
1.10	LabVIEW.....	23
1.10.1	LabVIEW INTERFAZ PARA ARDUINO	25
1.11	MATLAB	25
CAPÍTULO II.....		26
2.	MARCO METODOLÓGICO	26
2.1	CONSTRUCCIÓN DEL MÓDULO DE PALETA HÁPTICA.	26
2.1.1	SELECCIÓN DEL DISEÑO PARA EL MÓDULO DIDÁCTICO.....	26
2.1.2	SELECCIÓN DEL MATERIAL PARA SU FABRICACIÓN.....	27
2.1.3	SELECCIÓN DEL ACTUADOR Y PLATAFORMA ELECTRÓNICA ARDUINO	28
2.1.4	IMPLEMENTACIÓN DE LA ESTRUCTURA	31
2.1.5	IMPLEMENTACIÓN DE DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS	32

2.2	SISTEMA DE CONTROL.....	34
2.2.1	MODELO MATEMÁTICO EXPERIMENTAL DE LA PLANTA.....	34
2.2.2	DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL	39
2.3	INTERFAZ DE CONTROL	43
2.3.1	SOFTWARE INTERFAZ	43
2.3.1.1	PANEL FRONTAL.....	43
2.3.1.2	PANEL DE PROGRAMACIÓN.....	45
2.3.2	PROGRAMACIÓN DEL MANDO EN ARDUINO.....	48
	CAPÍTULO III.....	49
3.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	49
3.1	MÓDULO FINAL.....	49
3.2	ANÁLISIS DE RESPUESTA.....	50
	CAPÍTULO IV.....	53
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	53
4.1	CONCLUSIONES.....	53
4.2	RECOMENDACIONES.....	54
	BIBLIOGRAFÍA	55
	ANEXOS	58

ANEXO A: PLANO DEL MÓDULO DE PALETA HÁPTICA	59
ANEXO B: HOJA DE DATOS DEL MOTOR.....	60
ANEXO C: HOJA DE DATOS DEL ENCODER	61
ANEXO D: HOJA DE DATOS DEL CONTROLADOR.....	62
ANEXO E: HOJA DE DATOS DE ARDUINO UNO	64
ANEXO F: DIAGRAMA ELECTRÓNICO.....	65
ANEXO G: INTERFAZ DE CONTROL LabVIEW/ARDUINO	66
ANEXO H: PROGRAMACIÓN ARDUINO.....	72

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1: MODELOS HÁPTICOS	8
TABLA 2: COMPARACIÓN DE MATERIALES.....	27
TABLA 3: SELECCIÓN DEL ACTUADOR.....	28
TABLA 4: PLATAFORMA ELECTRÓNICA ARDUINO.....	30
TABLA 5: ARRANQUE DEL SISTEMA.....	34
TABLA 6: DATOS TEÓRICO DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA	41
TABLA 7: CARACTERÍSTICAS DE LA GRÁFICA DEL SISTEMA.....	52

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: (A) DISPOSITIVO DE PALETA HÁPTICA. (B) DISPOSITIVO PHANTOM OMNI. (C) GUANTE HÁPTICO CYBERGRASP.....	10
FIGURA 2: DISPOSITIVOS HÁPTICOS DE LA (A)UNIVERSIDAD DE STANFORD Y DE JOHN HOPKINS, (B) UNIVERSIDAD DE MICHIGAN, (C)UNIVERSIDAD DE RICE, (D)UNIVERSIDAD DE UTAH, (E)UNIVERSIDAD DE VANDERBILT, (F)UNIVERSIDAD DE ETH ZURICH, Y (G)UNIVERSIDAD MÁLAGA.	11
FIGURA 3: MOTOR DC.	18
FIGURA 4: SENSOR DE POSICIÓN OPTOELECTRÓNICO.	19
FIGURA 5: TARJETA DE DESARROLLO ARDUINO.	20
FIGURA 6: COMUNICACIÓN SERIE.....	21
FIGURA 7: ENTORNO DE DESARROLLO INTEGRADO DE ARDUINO.	22
FIGURA 8: PANEL FRONTAL DE LABVIEW.	24
FIGURA 9: ENTORNO DEL DIAGRAMA DE BLOQUES DE LABVIEW	24
FIGURA 10: ENTORNO DE MATLAB.	25
FIGURA 11: MOTOR DC MAXON A-MAX BRUSHES.	29
FIGURA 12: ENCODER HEDS 5540.	29
FIGURA 13: PLATAFORMA ARDUINO UNO.	31
FIGURA 14: ESTRUCTURA DEL MÓDULO DE PALETA HÁPTICA EN ACRÍLICO.	32
FIGURA 15: DIAGRAMA DEL CIRCUITO ELÉCTRICO.	33
FIGURA 16: CONEXIÓN DE DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS DEL MÓDULO HÁPTICO.	33
FIGURA 17: RESPUESTA PASO DEL SISTEMA.	35
FIGURA 18: IMPORTACIÓN DE DATOS EN MATLAB.	36
FIGURA 19: SELECCIÓN DE LA ESTRUCTURA DE LA PLANTA EN MATLAB.	37
FIGURA 20: PLANTA IDENTIFICADA.	37
FIGURA 21: PARÁMETROS DE LA PLANTA EN MATLAB	38
FIGURA 22: GRÁFICA DEL SISTEMA FT Y FUNCIÓN PASO.....	39
FIGURA 23: DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SISTEMA DE CONTROL.	39
FIGURA 24: COMPORTAMIENTO TEÓRICO DEL SISTEMA.....	42
FIGURA 25: RESPUESTA CONTROLADA DEL SISTEMA EN LABVIEW.	42

FIGURA 26: PUERTO DE COMUNICACIÓN.	43
FIGURA 27: RESPUESTA PASO DEL SISTEMA.	43
FIGURA 28: RESPUESTA CONTROLADA DEL SISTEMA.	44
FIGURA 29: SEÑAL DEL SISTEMA REAL.	44
FIGURA 30: GANANCIAS PID.	45
FIGURA 31: BOTÓN STOP.	45
FIGURA 32: ACTIVACIÓN DEL PUERTO.	45
FIGURA 33: INICIO DE ARDUINO.	46
FIGURA 34: LECTURA ENCODER.	46
FIGURA 35: GANANCIAS PID.	46
FIGURA 36: CODIFICACIÓN DE DATOS.	47
FIGURA 37: ESCRITURA DE DATOS.	47
FIGURA 38: CIERRE DE PUERTO.	47
FIGURA 39: DIAGRAMA DE FLUJO (SERIAL).	48
FIGURA 40: MÓDULO DE PALETA HÁPTICA.	49
FIGURA 41: INTERFAZ DEL MÓDULO DE PALETA HÁPTICA.	51
FIGURA 42: RESPUESTA CONTROLADA DEL SISTEMA EN LABVIEW.	51
FIGURA 43: CURVAS ENVOLVENTES DE RESPUESTA DEL SISTEMA EN LABVIEW.	52

ÍNDICE DE ECUACIONES

ECUACIÓN 1: FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DE UN RETARDO DE SEGUNDO ORDEN.	13
ECUACIÓN 2: FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA CON DENOMINADOR POSEE DOS RAÍCES REALES.	13
ECUACIÓN 3: RESPUESTA PARA UNA SEÑAL DE EXCITACIÓN DEL TIPO ESCALÓN UNITARIO. .	14
ECUACIÓN 4: RELACIÓN ENTRE LA SALIDA DEL CONTROLADOR $U(T)$ Y LA SEÑAL DE ERROR $E(T)$	15
ECUACIÓN 5: GANANCIA INTEGRAL EN EL DOMINIO.	15
ECUACIÓN 6: ACCIÓN DE TIPO INTEGRAL.	15
ECUACIÓN 7: ACCIÓN DE TIPO INTEGRAL EN EL DOMINIO DE S	16

ECUACIÓN 8: ACCIÓN DE TIPO DERIVATIVO.....	16
ECUACIÓN 9: ACCIÓN DE TIPO DERIVATIVO EN EL DOMINIO DE S.	16

INTRODUCCIÓN

Actualmente, los dispositivos hápticos despertaron un alto interés en la comunidad universitaria para la enseñanza y prácticas de laboratorio, entre uno de los dispositivos que ejerció un impacto directo sobre el proceso de enseñanza aprendizaje es la paleta háptica.

La paleta háptica se desarrolló para proporcionar una plataforma práctica de un grado de libertad para que los estudiantes interactúen físicamente y “sientan” los sistemas dinámicos simulados a través de la fuerza de retroalimentación. Esta herramienta ya ha sido probada con éxito para el desarrollo de actividades de docentes en control y simulación de sistemas, como se puede ver en (Gorlewicz, Kratchman, & WEBSTER III, 2014).

Existen diversas versiones de la paleta háptica en las universidades Stanford, Johns Hopkins, Rice, Michigan, Vanderbilt, Utah, ETH Zurich y Málaga, cada una de ellas incorpora características accesibles y de bajo costo sin dejar de lado los beneficios de aprendizaje con su uso. Entre las características de los últimos dispositivos desarrollados radicó su estructura mecánica construida en acrílico de corte laser o en el uso de impresoras 3D y en su sistema de control basado en Arduino.

Debido a lo antes mencionado referente a la importancia de estos recursos y la escasa existencia de los mismos en el área, se construyó el módulo de paleta háptica con cambios electrónicos, con la implementación de un driver, como también en la programación de la interfaz de control en LabVIEW, sin dejar de lado las características que identifica a la paleta háptica de las universidades indicadas, aportando así al aprendizaje en el proceso de enseñanza.

El funcionamiento del dispositivo radicó en función de la fuerza o movimiento que el usuario aplica sobre la paleta del dispositivo y la rueda de aluminio, el motor arranca y el sensor de posición adaptado al eje del motor detecta el movimiento y envía los datos de su posición actual

a la entrada del microcontrolador, los datos son procesados para poder ser leídos, controlando así su señal de entrada y enviándolos a través de la interfaz diseñada en LabVIEW/Arduino para que el sistema se mantenga estable, traduciendo en un movimiento transmitido de nuevo al usuario mediante el motor.

En este trabajo se planteó una nueva práctica educativa que puede llevarse a cabo gracias a la paleta háptica de bajo costo construida en la Universidad Técnica del Norte, se centró principalmente en añadir una actividad de practica realizable con el módulo de paleta háptica, el uso de este como equipo de práctica en el tema de oscilaciones presentando el experimento de movimiento armónico y movimiento amortiguado.

DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Los estudiantes al recibir solamente conceptos teóricos presentan mayor dificultad en la comprensión del modelado matemático de un sistema dinámico, porque carecen de la interacción con un sistema físico real con el cual pueda comparar, analizar, calibrar, programar y desarrollar prácticamente el contenido aprendido en clase.

En la actualidad los estudiantes al momento de realizar un modelamiento de una planta o mecanismo hacen evidente ciertas dudas como es la detección de elementos o variables que conforma el sistema de control, o la presencia de ruidos y perturbaciones que impiden que las ganancias asignadas para la retroalimentación logren estabilidad necesaria del sistema.

Por lo que se propone la realización de un Módulo Didáctico portátil y de bajo costo para refuerzo e implementación de lo adquirido teóricamente mediante el desarrollo de actividades de laboratorio que permitan mayor facilidad al momento de implementar un controlador a un sistema.

El estudiante al utilizar un dispositivo de paleta háptica estará en la capacidad de aplicar los conocimientos aprendidos en clase, desarrollando prácticas de forma más didáctica, encontrando la ecuación característica de sistemas físicos (plantas) requeridos y poder aplicarlo en el modelamiento del sistema utilizando el módulo propuesto.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Construir un módulo de paleta háptica portátil y de bajo costo para desarrollar prácticas de laboratorio de sistemas dinámicos, en la carrera de Ingeniería en Mecatrónica.

OBJETIVO GENERAL

Construir un módulo de paleta háptica para desarrollar prácticas de laboratorio de sistemas dinámicos, en la carrera de Ingeniería en Mecatrónica.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Buscar información bibliográfica y determinar los parámetros necesarios para la construcción del módulo didáctico.
- Construir la planta para el sistema dinámico a utilizar en el módulo didáctico.
- Implementar el sistema electrónico y de control para la interconexión entre la interfaz y la planta.
- Diseñar e implementar la etapa para la visualización del control del sistema mediante una simulación.

JUSTIFICACIÓN

El diseño e implementación de controladores es uno de los temas más importantes y complejos que se estudian en la carrera de mecatrónica. Estos temas son abordados en su mayoría de manera teórica con una deficiente vinculación práctica en plantas reales, motivos por los cuales y basándose en los trabajos previos encontrados y referenciados en los antecedentes (Gorlewicz & Webster III, 2012), se cree necesario la implementación de un módulo de paleta háptica para estudiantes y docentes de la carrera de Ingeniería en Mecatrónica, donde será posible modelar y diseñar controladores que serán utilizados en la regulación del comportamiento dinámico del dispositivo; alcanzando el estudiantes habilidades prácticas en la manipulación de variables de entrada de los sistema para establecer diferentes valores a la salida.

A su vez, al implementar un módulo de aprendizaje como el que se propone, pudiera servir como una investigación base, la cual abra las puertas a nuevos y futuros trabajos en el área de la enseñanza con el fin de mejorar el proceso y la calidad de los egresados.

Está demostrado, cuestión que se fundamenta en el análisis de la bibliografía, que la utilización de este tipo de módulos brinda robustez, portabilidad y versatilidad a estudiantes y docentes, presentando buenos resultados y un mejoramiento potencialmente significativo en la experiencia educativa, transmitiendo conceptos básicos de las asignaturas y aumentando en los estudiantes el entusiasmo por el aprendizaje de la materia (Gorlewicz & Webster III, 2012).

ALCANCE

El desarrollo del proyecto constará de dos fases: La primera encargada del ensamblado de cada uno de los componentes que conforman el módulo didáctico a construir y del diseño de la

interfaz entre software y el módulo didáctico; la segunda fase es la realización de una prueba práctica con el módulo ya ensamblado.

La primer fase está conformada de: (a) La construcción del diseño mecánico, basado en una paleta háptica constituida de un solo grado de libertad, con una fuerza de retroalimentación mediante la palanca de mano (b) la implementación de su parte electrónica conformada por: un actuador, un sistema de sensores y un microcontrolador para la comunicación y (c) la interconexión entre el software de alto nivel y la planta, permitiendo el modelamiento matemático del sistema dinámico con la aplicación de conocimientos teóricos de Sistemas de Control y la visualización de la simulación del funcionamiento del sistema.

La segunda fase consiste en la realización de una prueba práctica con el módulo de paleta háptica como es:

- Interactuar con el Módulo didáctico utilizando la paleta háptica y la visualización en la interfaz LabVIEW.

ANTECEDENTES

Las esferas de software y hardware han mostrado un amplio desarrollo en la actualidad. Estas a su vez han revolucionado la didáctica debido al impacto directo que ejercen sobre el proceso de enseñanza aprendizaje, y en este contexto ha tenido lugar la renovación y la introducción de nuevos conceptos orientados a hacer más dinámicos, flexibles y creativos los encuentros pedagógicos en las universidades(Santana, Rubiano, & Villamizar, 2012).

Según plantean (Guerrero-Hernández, Gallardo, & Nieves, 2016) en su trabajo: “un módulo educativo, es un recurso instruccional que sirve de guía para aprender”. El mismo provee y

contiene herramientas que ayudan al estudiante a entender y aprender paso a paso cualquier tipo de material expedido por cualquier curso educativo; de manera que el adquirir conocimientos y destrezas se haga de manera efectiva aun sin tener contacto presencial continuo con un instructor.

Los dispositivos hápticos son uno de los tantos recursos didácticos que son poco conocidos actualmente, por lo que, ha despertado un alto interés en la comunidad universitaria para la enseñanza y prácticas de laboratorio. Pese al gran interés que despierta su desventaja radica en su elevado coste de implementación (Bengoechea, Sánchez, & Gil, 2015). Algunos ejemplos de estos sistemas se pueden encontrar en la medicina (Basdogan et al., 2004) o en el diseño (Lu, Wang, Liang, & Ouhyoung, 2002).

Entre los diferentes dispositivos hápticos desarrollados, el departamento de Ingeniería de la universidad de John Hopkins en el año 2002 construyó un módulo didáctico de paleta háptica, conformada por una palanca de mando de fuerza de respuesta de un solo eje y una PC estándar para el control (Grow, Verner, & Okamura, 2007), desarrollada para: ilustrar conceptos en un curso de sistemas dinámicos, modelar un sistema dinámico real y aplicar el control de retroalimentación simple, Además otros autores comparten la idea de que con el uso de la paleta los estudiantes serán capaces de sentir los efectos de fenómenos tales como amortiguamiento viscoso, rigidez e inercia (A. M. Okamura, Richard, & Cutkosky, 2002). En el año 2003, el proyecto de construcción de la paleta háptica de la universidad de Michigan añadió varias características propias y cambios menores para la mejora del dispositivo, analizando y construyendo su propia interfaz (Gillespie, Hoffinan, & Freudenberg, 2003). En el año 2006, la universidad de Rice describe la adaptación de la serie de paletas de laboratorio hápticos a un curso de sistemas dinámicos, los principales cambios incluyen: el hardware para mejorar la

robustez, y el uso hardware y software de National Instruments para el control de la computadora de los dispositivos electromecánicos(Bowen & O'Malley, 2006).

La universidad de Utah y la universidad de ETH Zurich, adoptan el modelo de paleta háptica desarrollado por la universidad Rice para la enseñanza del control de robots, con la diferencia que el diseño de Zurich fue adaptada al sistema métrico, e introduce algunos componentes y características de nuevos equipos, incluyendo una tarjeta comercial de adquisición datos USB de medición y control, un amplificador de corriente y un sensor de fuerza(Gassert et al., 2013).

En el año 2010 en la universidad de Vanderbilt se desarrolla otro modelo de este tipo con las características de accionamiento de fricción con la fuerza de contacto ajustable, evitando la necesidad de tensión o re-conectar un cable de accionamiento de cabrestante(Medlab, 2012) basado en el modelo de Okamura.

A nivel de Ecuador e Imbabura no se encontraron trabajos investigativos ni publicaciones referentes a los dispositivos hápticos y su uso en prácticas de laboratorio o enseñanza en general. Debido a lo antes mencionado referente a la importancia de estos recursos y la escasa existencia de los mismos en el área, es que se plantea este trabajo con cambios en su interfaz de control ofreciendo una interfaz más didáctica al usuario y reduciendo costos en el maquinado de la estructura y elementos electrónicos y de control.

Debido a lo antes mencionado referente a la importancia de estos recursos y la escasa existencia de los mismos en el área, se construyó el módulo didáctico de paleta háptica en la universidad Técnica del Norte con cambios en su interfaz de control sin dejar de lado las características que identifica a la paleta háptica de otras universidades, esto como un gran aporte al aprendizaje en el proceso de enseñanza que se lleva a cabo en la universidad.

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO

1.1 DISPOSITIVOS HÁPTICOS

Los dispositivos hápticos son definidos como dispositivos que muestran "un sentido del tacto" para el operador. Este sentido del tacto se puede transmitir no sólo por una fuerza si no también por las vibraciones, la temperatura, la fricción, y sentidos táctiles (Arata, Kondo, Ikedo, & Fujimoto, 2011).

Algunos de los modelos hápticos utilizados se presentan a continuación en la Tabla 1:

Tabla 1: Modelos Hápticos

GDL	NOMBRE	CARACTERÍSTICAS	CREADORES
1	Paleta háptica	<ul style="list-style-type: none"> • Ilustra conceptos en un curso de sistemas dinámico. • Los elementos que la conforma son: una palanca de mando de fuerza de respuesta de un solo eje y una PC para el control, ver Figura 1(a). • Diseñado especialmente para sentir los efectos de fenómenos tales como: amortiguamiento viscoso, rigidez e inercia. 	Okamura Universidad de John Hopkins

6	PHANToM Omni	<ul style="list-style-type: none"> • Brinda tres grados de libertad en fuerza, pero seis grados de libertad en orientación • Situado sobre un soporte de trabajo que permite moverse en cualquier lugar en el entorno virtual, como se muestra en la Figura 1(b). 	Geomagic
	Guante háptico CYBERGRASP	<ul style="list-style-type: none"> • Estructura exoesquelética fijada a la parte posterior de la mano, ver Figura 1(c). • Accionado por unos actuadores con su respectivo controlador. • Interactúa con la mano entera para poder tocar, manipular y coger los objetos virtuales. 	Immersion Co.

Fuente: (Fischer & Vance, 2003; Grow et al., 2007; Martín Doñate, 2004; A. M. Okamura, Richard, C., & Cutkosky, M., 2002; Raya González, 2011).

En la Figura 1, se muestra algunos de los dispositivos hápticos utilizados actualmente en el proceso enseñanza aprendizaje.

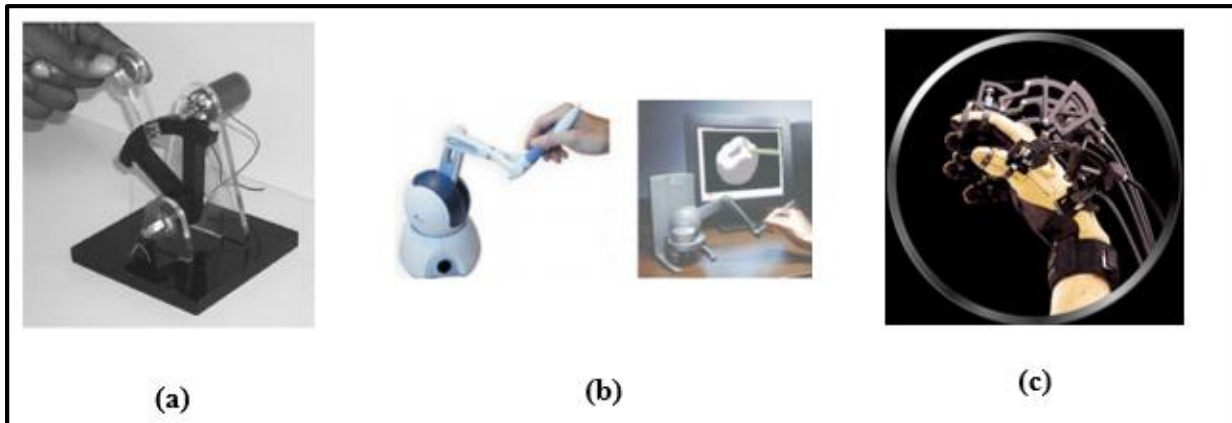


Figura 1: (a) Dispositivo de paleta háptica. (b) Dispositivo PHANTOM OMNI. (c) Guante Háptico CYBERGRASP.

1.2 PALETA HÁPTICA

La paleta háptica y un plan de estudios de laboratorio asociados fueron desarrollados a finales de 1990 en el Universidad de Stanford para proporcionar una plataforma práctica de un grado de libertad para que los estudiantes interactúen físicamente y "sientan" los sistemas dinámicos simulados a través de la fuerza de retroalimentación(Gorlewicz, Kratchman, & WEBSTER III, 2014).

En la universidad Técnica del Norte, se contribuye a la evolución de la paleta háptica a través de cambios electrónicos y de software. En la parte electrónica se adicionó un driver para el control del motor. En el software se diseñó una interfaz de control flexible, con disminución de tiempos de desarrollo en el sistema y amigable al usuario. El diseño mecánico de la paleta es similar a la de Rice, Utah, Vanderbilt, ETH Zurich y Málaga con el motor en la parte inferior(Gandarias Palacios, Akbari Kalhor, & Gómez de Gabriel, 2016), con una unidad de fricción(Gorlewicz & Webster III, 2012) y el mango que consta de una sola pieza, ver Figura 2, a diferencia del diseño original de ver Figura 2(a).

En la Figura 2, se muestra los diferentes dispositivos de paleta háptica desarrolladas en las distintas universidades:

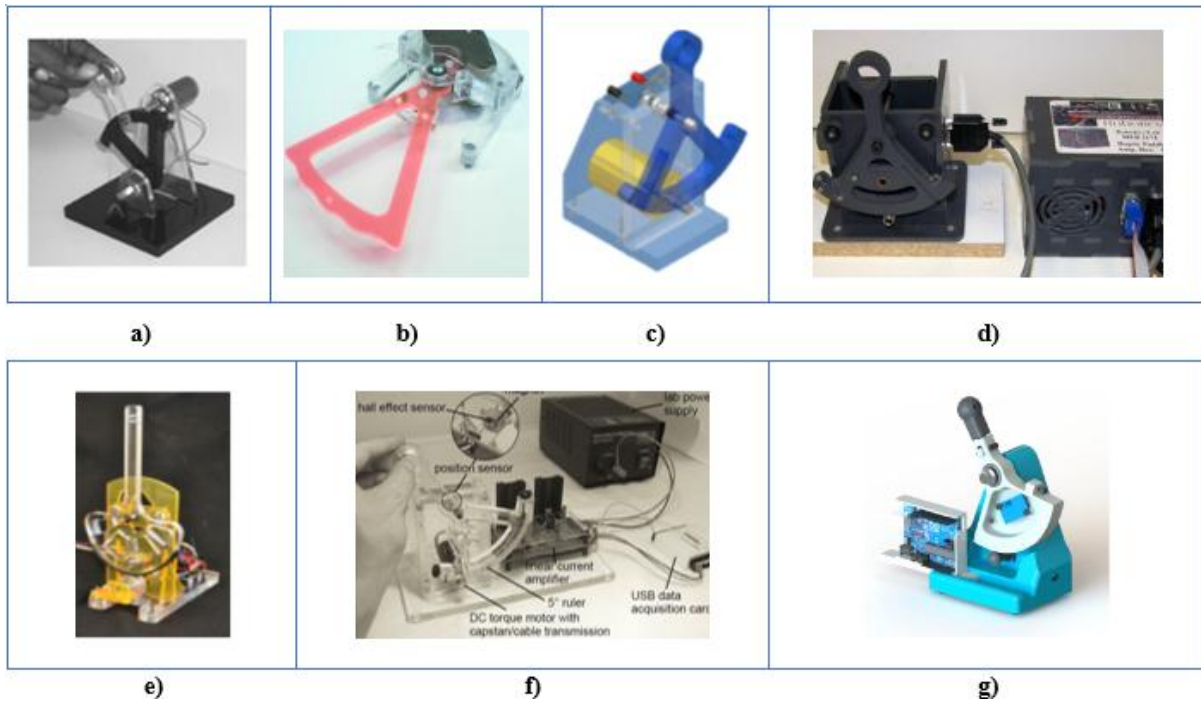


Figura 2: Dispositivos hápticos de la (a)Universidad de Stanford y de John Hopkins, (b) Universidad de Michigan, (c)Universidad de Rice, (d)Universidad de Utah, (e)Universidad de Vanderbilt, (f)Universidad de ETH Zurich, y (g)Universidad Málaga.

1.3 SISTEMA DE CONTROL

Un sistema de control es el que tiene como objetivo mantener una o varias variables dentro de unos límites fijados. Cuando se opera sobre un sistema físico este puede estar afectado por una serie de perturbaciones que afectan al valor inicial del sistema, al existir estas perturbaciones obligan al sistema a observar continuamente el proceso y actuar para corregirlas(Canales & Martínez, 2010).

1.3.1 MODELADO MATEMÁTICO DE SISTEMAS DINÁMICOS

Un modelo matemático de un sistema dinámico se define como un conjunto de ecuaciones que representan la dinámica del sistema con precisión. La dinámica de muchos sistemas, ya sean mecánicos, eléctricos, térmicos, etc., se describe en términos de ecuaciones diferenciales(Ogata, 2010).Entre los modelos matemáticos que tienen gran relevancia en el análisis y el diseño de los sistemas de control se encuentra el modelado del motor dc con una ecuación diferencial simplificada de segundo orden(Alvarado, 2012).

En el modelado matemático del motor de corriente continua se requiere de dos ecuaciones, una ecuación mecánica y otra ecuación eléctrica. Estas ecuaciones están acopladas y se basan en las Leyes de la dinámica y de Kirchhoff, respectivamente. Por una parte, la ecuación mecánica modela principalmente el movimiento del rotor, y por otra parte la ecuación eléctrica modela lo que ocurre en el circuito eléctrico del inducido(Paredes, Lozoya, & Solano, 2010).

1.3.2 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA

La función de transferencia de un sistema descrito mediante una ecuación diferencial lineal e invariante con el tiempo se define como el cociente entre la transformada de Laplace de la salida y la transformada de Laplace de la entrada, bajo la suposición de que todas las condiciones de valores iniciales sean cero(Ogata, 2010).

Para conocer la función de transferencia de un sistema, previamente se obtuvo un modelo matemático de la planta. En el caso de un motor, se agrupa en términos a partir de la relación de la tensión de inducido con la posición angular, donde al aplicar la transformada de Laplace se obtiene la función de transferencia(Alvarado, 2012).

1.3.3 CARACTERÍSTICAS DE RESPUESTA DE LOS SISTEMAS

En el análisis y diseño de sistemas de control, se debe tener una base de comparación del comportamiento de diversos sistemas de control. Esta base se configura especificando las señales de entrada de prueba particulares y comparando las respuestas de varios sistemas ante estas señales de entrada(Ogata, 2010).

1.3.4 SISTEMAS DE SEGUNDO ORDEN

Un bloque de retardo de segundo orden tiene la siguiente función de transferencia.

Ecuación 1: Función de transferencia de un retardo de segundo orden.

$$G(s) = \frac{1}{T^2s^2 + 2\zeta Ts + 1}$$

Fuente:(Cusido, 2014)

La función de transferencia que se muestra a continuación posee un denominador con dos raíces reales y puede ser factorizado de acuerdo con sus funciones de origen, entonces se cumple que el factor de amortiguación $\zeta \geq 1$ (Cusido, 2014).

Ecuación 2: Función de transferencia con denominador posee dos raíces reales.

$$G(s) = \frac{1}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)}$$

Fuente:(Cusido, 2014)

- **RESPUESTA ESCALÓN DE UN SISTEMA DE SEGUNDO ORDEN**

La salida o respuesta del bloque retardo de tiempo de segundo orden, para una señal de excitación del tipo escalón unitario se describe como:

Ecuación 3: Respuesta para una señal de excitación del tipo escalón unitario.

$$Y = \frac{1}{s(T^2S^2 + 2\zeta Ts + 1)}$$

Fuente:(Cusido, 2014)

Las respuestas tipificadas para un escalón de amplitud A, puede ser o no oscilatoria, dependiendo ello, exclusivamente, del factor de amortiguación (Ogata, 2010), debiéndose diferenciar cuatro casos:

- Subamortiguado ($0 < \zeta < 1$)
- Oscilatorio puro ($\zeta = 0$)
- Sobreamortiguado($\zeta > 1$)
- Críticamente amortiguado ($\zeta=1$)

1.3.5 TIPOS DE CONTROL

Los controladores son elementos que se añaden al sistema original para mejorar sus características de funcionamiento, con el objetivo de satisfacer las especificaciones de diseño tanto en régimen transitorio como en estado estable(Gaviño & Gaviño, 2010).

A continuación, se describen los tipos de controladores de acuerdo con sus acciones de control, como:

- **ACCIÓN PROPORCIONAL (P).**

Un control es de tipo proporcional cuando permite generar una señal de control $v(t)$ proporcional a la señal de error $e(t)$:

Ecuación 4: Relación entre la salida del controlador $u(t)$ y la señal de error $e(t)$.

$$v(t) = k_p e(t)$$

Fuente:(Ogata, 2010)

que es su equivalente en el dominio s, donde k_p es la ganancia proporcional:

Ecuación 5: Ganancia integral en el dominio.

$$G_C(s) = \frac{V(s)}{E(s)} = k_p$$

Fuente:(Ogata, 2010)

Es decir, el controlador proporcional es, en esencia, un amplificador con una ganancia ajustable, en cualquier mecanismo real y en la forma de potencia de operación(Ogata, 2010).

- **ACCIÓN INTEGRAL (I).**

El controlador integral hace que el elemento final de control $v(t)$ se mueva a una velocidad que es proporcional a la señal de error $e(t)$ (Cusido, 2014).

Es decir,

Ecuación 6: Acción de tipo integral.

$$v(t) = K_i \int e(t) dt$$

Fuente:(Gaviño & Gaviño, 2010)

y el equivalente en el dominio s de la ecuación es:

Ecuación 7: Acción de tipo integral en el dominio de s.

$$G(s) = \frac{V(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s} = \frac{K_p}{T_i s}$$

Fuente:(Gaviño & Gaviño, 2010)

donde K_i es la ganancia del control integral y T_i es un factor de proporcionalidad ajustable que indica el tiempo de integración(Gaviño & Gaviño, 2010).

- **ACCIÓN DERIVATIVO (D).**

El control es de tipo derivativo cuando la salida del controlador $v(t)$ es proporcional a la derivada del error $e(t)$, indicando que este responde a la rapidez de cambio del error, lo que produce una corrección importante antes de que el error sea elevado.

Es decir,

Ecuación 8: Acción de tipo derivativo.

$$v(t) = K_d \frac{de(t)}{dt}$$

Fuente:(Gaviño & Gaviño, 2010)

y el equivalente de la ecuación en el dominio s es:

Ecuación 9: Acción de tipo derivativo en el dominio de s.

$$G_c(s) = \frac{V(s)}{E(s)} = K_d s = K_p T_d s$$

Fuente:(Gaviño & Gaviño, 2010)

donde K_d es la ganancia del control derivativo y T_d es un factor de proporcionalidad ajustable que indica el tiempo de derivación (Gaviño & Gaviño, 2010).

Los controladores pueden interactuar entre si formando las siguientes configuraciones:

- **CONTROL PROPORCIONAL-INTEGRAL (PI)**

Este modo de control reúne las características de los modos de control proporcional e integral, en los instantes que siguen a un cambio de carga o de punto de consigna, la acción proporcional facilitará inmediatamente un cambio en la salida del controlador que tenderá de manera aproximada a ajustar el proceso. Finalmente, la acción integral proporcionará paulatinamente la corrección suplementaria exacta hasta anular la desviación (Cusido, 2014).

- **CONTROL PROPORCIONAL-DERIVATIVO (PD)**

Al modo de control proporcional, con o sin integral, se le puede añadir una acción llamada derivativa, que, como se verá a continuación, responde solamente a la magnitud de velocidad de cambio de la desviación, de tal manera que se oponen a ella, mostrando un comportamiento correcto anticipado a los cambios de la desviación. Es por ello que esta acción aporta un fuerte efecto estabilizador en la controlabilidad de un sistema (Cusido, 2014).

- **CONTROL PROPORCIONAL-INTEGRAL- DERIVATIVO (PID)**

Un refinamiento adicional consiste en dotar al controlador de una capacidad anticipada utilizando una predicción de la salida basada en una extrapolación lineal. La acción de control es una suma de tres términos que representan el pasado por la acción integral de error (el termino I), el presente (el termino P) y el futuro por una extrapolación lineal del error (el termino D). Los parámetros del controlador se llaman: ganancia proporcional K, tiempo integral T_i , y tiempo derivativo T_d (Åström & Hägglund, 2009).

1.4 ACTUADOR

Un actuador es un dispositivo que acciona mecánicamente un sistema de control. Existen muchas clasificaciones de los actuadores. Aquellas que operan directamente un proceso (la planta de carga) se denominan actuadores del proceso(de Silva, 2015).

1.4.1 MOTOR DC

Según plantea (de Silva, 2015) “un motor de corriente continua convierte la energía eléctrica en energía mecánica de rotación”. Una parte importante del par generado en el rotor del motor está disponible para conducir una carga externa y se utiliza en una variedad de aplicaciones para el control exacto de velocidad(Keljik, 2013), ver Figura 3.



Figura 3: Motor DC.

Los motores de dc son accionados desde una fuente de potencia de dc. A menos que se especifica lo contrario, (Chapman et al., 2012) expresa que “el voltaje de entrada de un motor de dc es constante, porque esto simplifica el análisis de los motores y la comparación entre diferentes tipos de ellos”.

1.5 SENSOR

Los sensores son útiles en una variedad de aplicaciones de ingeniería(de Silva, 2015), especialmente en robótica con el uso de sensores de posición. Entre los más utilizados está el

encoder, un sensor con la capacidad de indicar el desplazamiento exacto del eje y el sentido de giro del motor(Vilardell, 2013).

1.5.1 ENCODER

Cualquier transductor que genera una lectura codificada (digital) de una medición puede ser denominado como un codificador. Los codificadores de eje (Shaft Encoder) son transductores digitales que se utilizan para medir el desplazamiento angular y velocidades angulares(de Silva, 2015), ver Figura 4.

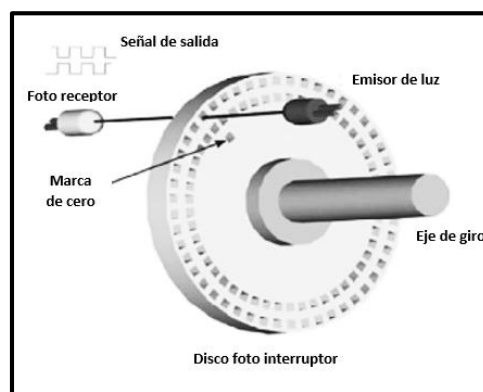


Figura 4: Sensor de posición optoelectrónico.

1.6 ARDUINO SOFTWARE Y HARDWARE

Arduino es un sistema de programación de lenguaje C/C++, con plataformas electrónicas que utiliza microcontroladores, como se muestra en la Figura 5, para formar sistemas empotrados especializados en la automatización de procesos, con un amplio espectro de aplicaciones en ciencias exactas y en ingeniería.

En la Figura 5, se muestra la Tarjeta de desarrollo Arduino.



Figura 5: Tarjeta de desarrollo Arduino.

1.7 MICROCONTROLADOR

Un microcontrolador es un chip programable, incorporado de todos los elementos necesarios para funcionar, tales como memoria, reloj y algunos periféricos.

El propósito fundamental es leer y ejecutar los programas que el usuario le escribe, es por esto que la programación es una actividad básica e indispensable cuando se diseñan circuitos y sistemas.

A continuación, se describe dos modelos de microcontroladores con sus respectivas características.

- **Microcontrolador ATmega328**

El **Microcontrolador ATmega328** está basado en una arquitectura Harvard modificado de 8 bits con memorias separadas para el programa, datos y un conjunto de instrucciones simples para realizar la programación (José Rafael Lajara Vizcaíno & Sebastía, 2014), a continuación de describen las características del microcontrolador.

- Combina una memoria Flash interna de 32 Kb para almacenar el programa
- Memoria EEPROM de 1Kb para los datos volátiles.

- Tiene 23 pines de entrada y salida digital, 3 timer/contadores, interrupciones internas y externas.
- Soporta comunicación tipo USART, I²C y SPI.
- Convertidor de analógico/digital de 10 bits.
- **Microcontrolador pic 2550**

Este pic pertenece a la familia de los microcontroladores de 8 bits (bus de datos), es de gama alta, posee comunicación USB FLASH mejorada, a continuación se presentan las características de este microcontrolador(Microchip, 2006).

- Frecuencia de operación (hasta 48Mhz).
- Convertidor análogo digital.
- 1 K byte Dual Port RAM + 1K byte GP RAM.
- Grandes cantidades de memoria RAM para el almacenamiento del búfer.

1.8 COMUNICACIÓN SERIE

La comunicación serie recibe y envía valores codificados en ASCII con un dispositivo externo, a través de una conexión por un cable/puerto USB o cable/puerto serie RS-232 como se muestra en la Figura 6, utilizando niveles lógicos TTL (5V o 3.3V dependiendo de la tarjeta) en los pines TX / RX(Arduino, 2016).

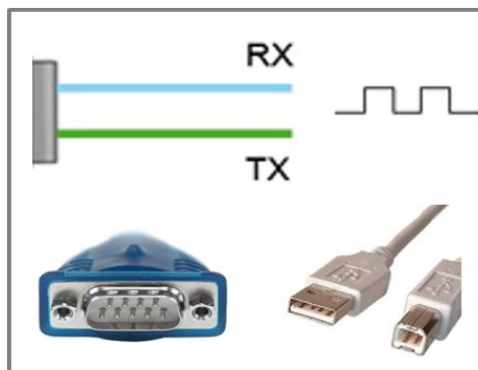


Figura 6: Comunicación serie.

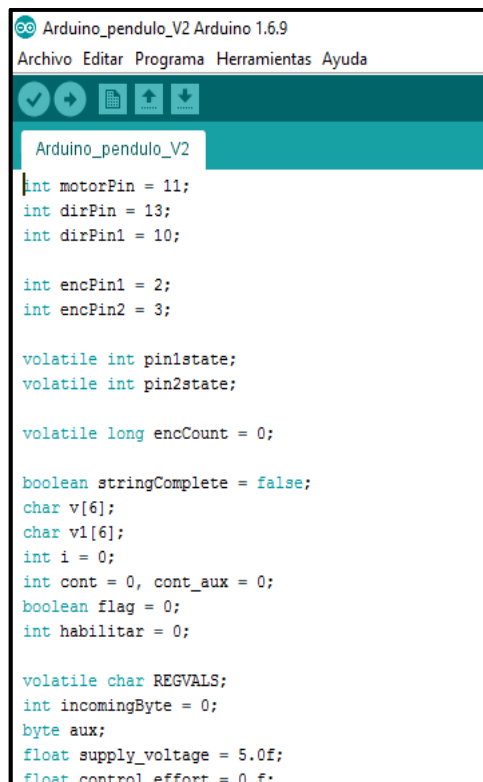
Según plantea (Prometec, 2015) “La comunicación serie envía mediante dos hilos una diferencia de tensión entre ellos y poder marcar niveles alto (5V) y bajo (0V)” y con esto puede transmitir información digital.

Para transmitir información es necesario:

- Un código común para codificar los caracteres que envía.
- Un acuerdo de velocidad para saber a qué ritmo hay que leer los datos.

1.9 SISTEMA ARDUINO (IDE)

El sistema Arduino tiene un ambiente de programación (IDE) con herramientas integrales para editar, compilar y descargar sketch a las tarjetas electrónicas. Como se muestra en la Figura 7. Cuenta también con suficiente información y documentación técnica, así como ejemplos de desarrollo.



```
Arduino_pendulo_V2 Arduino 1.6.9
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda

Arduino_pendulo_V2
int motorPin = 11;
int dirPin = 13;
int dirPin1 = 10;

int encPin1 = 2;
int encPin2 = 3;

volatile int pin1state;
volatile int pin2state;

volatile long encCount = 0;

boolean stringComplete = false;
char v[6];
char v1[6];
int i = 0;
int cont = 0, cont_aux = 0;
boolean flag = 0;
int habilitar = 0;

volatile char REGVALS;
int incomingByte = 0;
byte aux;
float supply_voltage = 5.0f;
float control_effort = 0.0f;
```

Figura 7: Entorno de desarrollo integrado de Arduino.

Además, debido a su lenguaje de programación (C/C++) y las características tecnológicas de la plataforma electrónica es muy fácil expandirlo a otros paquetes de programación como MATLAB y LabVIEW (Reyes Cortés & Cid Monjaraz, 2015).

1.10 LabVIEW

Según plantean (José Rafael Lajara Vizcaíno & Sebastián, 2014) “LabVIEW es un software para ingenieros y científicos que permite la programación gráfica de aplicaciones”. Está especializado en el control de instrumentos y adquisición de datos, además incorpora muchas funciones de tratamiento de datos y representación gráfica.

LabVIEW realiza las siguientes funciones (Larsen, 2011):

- Adquisición de datos de los instrumentos.
- Proceso de datos (por ejemplo, el filtrado).
- Análisis de datos.
- Control de instrumentos y equipos.

Las funciones y VI generalmente operan sobre una o varias entradas y proporcionan una o más salidas. A las entradas se les conectará un dato del tipo requerido que puede provenir de un control, una constante o una salida de otro VI o función y a su salida se podrá conectar un indicador o una entrada de algún VI o función (J.R.L. Vizcaíno & Sebastián, 2012).

A continuación, se muestra los VIs de LabVIEW, en la Figura 8, se observa el panel frontal.

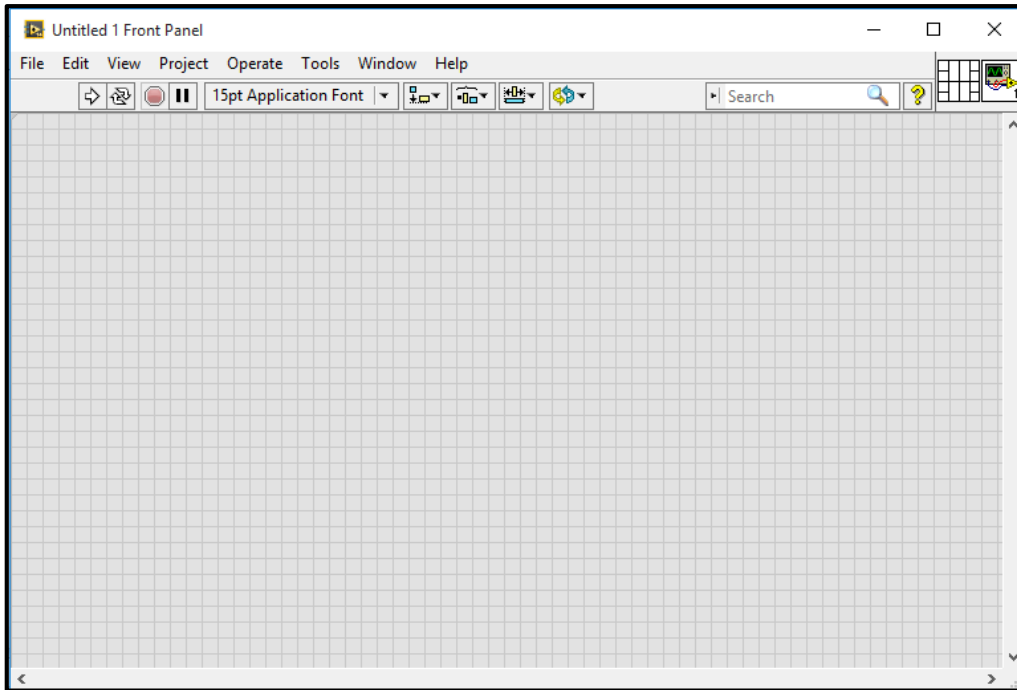


Figura 8: Panel frontal de LabVIEW.

En la Figura 9, se muestra el entorno del diagrama de bloques. En este entorno se utiliza bloques que incluyen terminales, subVIs, funciones, constantes, estructuras y cables, los cuales transfieren datos junto con otros objetos del diagrama de bloques.

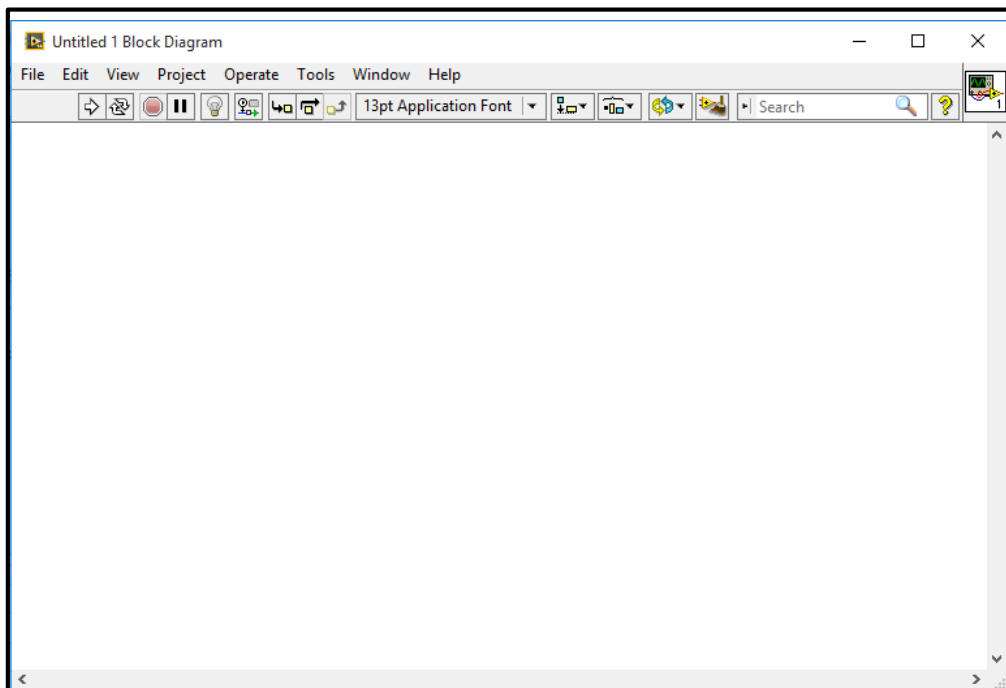


Figura 9: Entorno del diagrama de bloques de LabVIEW

1.10.1 LabVIEW INTERFAZ PARA ARDUINO

Es una infraestructura, que se basa en un programa que se ejecutará en la placa y una librería para hacer programas en el PC. El objetivo es poder conectarse y controlar Arduino sin tener que realizar el programa en él (José Rafael Lajara Vizcaíno & Sebastián, 2014).

1.11 MATLAB

MATLAB es un lenguaje intuitivo para expresar problemas y soluciones matemáticamente y gráficamente. Se integra cálculo, visualización y programación en un entorno flexible y abierto (Davis, 2010), ver Figura 10. Los problemas numéricos y simbólicos complejos se pueden resolver en una fracción del tiempo requerido.

En la siguiente Figura 10, se puede observar el entorno de Matlab.

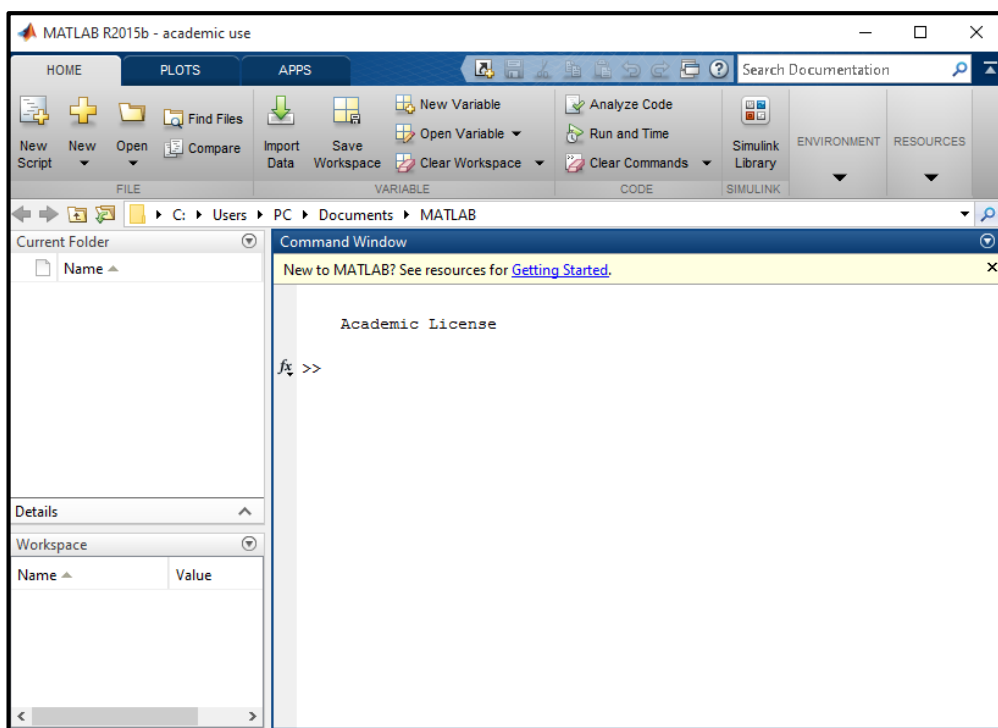


Figura 10: Entorno de Matlab.

CAPÍTULO II

2. MARCO METODOLÓGICO

2.1 CONSTRUCCIÓN DEL MÓDULO DE PALETA HÁPTICA.

2.1.1 SELECCIÓN DEL DISEÑO PARA EL MÓDULO DIDÁCTICO.

Existen diversas versiones de la paleta háptica en las universidades Stanford, Johns Hopkins, Rice, Michigan, Vanderbilt, Utah, ETH Zurich y Málaga, cada una de ellas incorpora características accesibles y de bajo costos sin dejar de lado los beneficios de aprendizaje en su uso.

Entre los dispositivos mencionados anteriormente destaca el modelo desarrollado en la universidad de Vanderbilt con ventajas en su parte mecánica como es el uso de la paleta de una sola pieza con una unidad de fricción acoplada al motor, evitando así la necesidad de reconectar un cable de accionamiento cabrestante como en modelos anteriores. Otra de sus ventajas destaca el uso de elementos electrónicos como actuador, sensor y microcontrolador que ayudan a la comunicación e interconexión de la paleta háptica.

En base al análisis anterior se decide seleccionar el diseño de la universidad Vanderbilt e incorporar cambios que aporten a la evolución de este dispositivo como es la implementación de un controlador para protección del motor en la parte electrónica y la implantación de la interfaz de control entre Arduino y LabVIEW, ofreciendo así una interfaz flexible con disminución de tiempos de desarrollo en el sistema, y amigable al usuario. Otro de los beneficios radica en la estructura del módulo con materiales maquinables y dispositivos electrónicos accesibles, reduciendo el costo en configuración de la paleta háptica.

2.1.2 SELECCIÓN DEL MATERIAL PARA SU FABRICACIÓN.

Para la selección del material de la estructura del módulo de paleta háptica se realiza una comparación de 3 materiales los cuales se resumen en la Tabla 2, cada material cuenta con sus respectivas características.

Tabla 2: Comparación de materiales

Material	Acrílico	Vidrio	ABS
Resistencia al impacto	Si	No	Si
Peso (%)	50%	90%	25%
Resistencia a la intemperie.	Si	Si	Si
Conductividad eléctrica	No	No	No
Costo (%)	50%	90%	90%
Maquinable	Si	No	Si

En base al análisis realizado en la tabla anterior se decide utilizar el material de acrílico por la resistencia al impacto, y costo, siendo este un material accesible, maquinable y de bajo costo para la construcción del módulo háptico.

2.1.3 SELECCIÓN DEL ACTUADOR Y PLATAFORMA ELECTRÓNICA ARDUINO

- **SELECCIÓN DEL ACTUADOR**

El actuador es uno de los dispositivos necesarios para la implementación electrónica de la planta del módulo háptico, por tal razón se procede a la selección del actuador mediante la comparación de tres tipos de motores, los cuales se sintetiza en la Tabla 3.

Tabla 3: Selección del actuador.

Tipo	Motor DC	Servomotor	Motor paso a paso
Ángulo de rotación	Rotación continua	180°	360°
Circuito de control	No incluye	Incluye	No incluye
Velocidad	Alto	Alta	Bajo
Precisión	Si	Si	Si
Costo (%)	50%	65%	45%
Sensor de posición	Si	Si	Si

En base al análisis realizado en la tabla anterior se decide utilizar el motor dc por las características de funcionar a altas revoluciones por minuto, por su rotación continua rápida, por el costo accesible y por incluir un sensor de posición adaptado al eje del motor (VER ANEXO A), siendo este el actuador del módulo de paleta háptica como se muestra en la Figura 11.

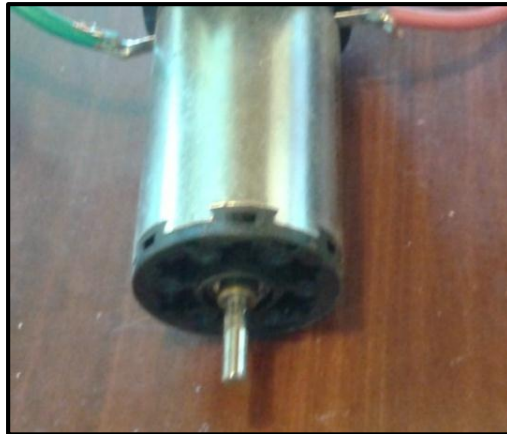


Figura 11: Motor DC maxon A-max Brushes.

El sensor de posición (encoder) del motor permite realizar tareas de posicionamiento, reconocimiento del sentido de giro y velocidad a partir del número de pulsos por vuelta (VER ANEXO B).

En la Figura 12, se muestra el encoder HEDS 5540 del motor dc maxon.

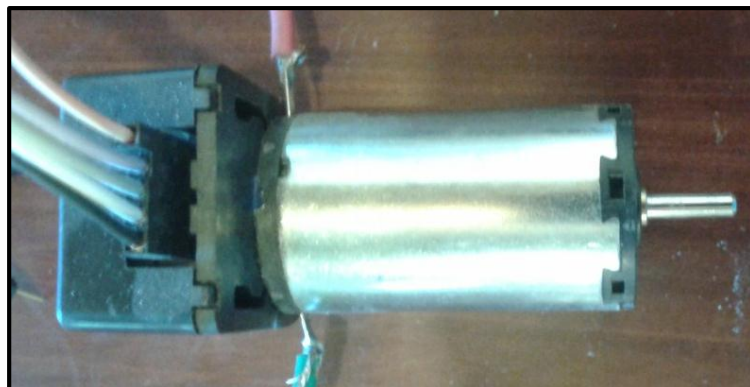


Figura 12: Encoder HEDS 5540.

- **Selección de la plataforma electrónica Arduino.**

Para la selección de la plataforma de comunicación de la planta con la interfaz de control del módulo háptico se realiza una comparación de dos placas electrónicas Arduino, las cuales se describen en la Tabla 4.

Tabla 4: Plataforma electrónica Arduino

Tipo de Arduino	Uno	Pro
Entradas/Salidas digitales	14	14
Microcontrolador	ATmega328	ATmega328
Cable de comunicación serial	USB	FTDI
Voltaje de entrada	DC 7-12V.	DC de 5V a 12V
Costo	Accesible	Accesible
Plataforma de programación	C/C++	C/C++
SRAM	2 KB	2 KB

En base al análisis realizado en la tabla anterior se decide utilizar la plataforma de Arduino Uno por sus características de programación de lenguaje C/C++, por su plataforma electrónica que utiliza un microcontrolador ATmega328 para formar sistemas de control, por su comunicación serial mediante Cable USB y por el costo accesible (VER ANEXOS D), siendo esta la plataforma de control del módulo de paleta háptica como se muestra en la Figura 13.

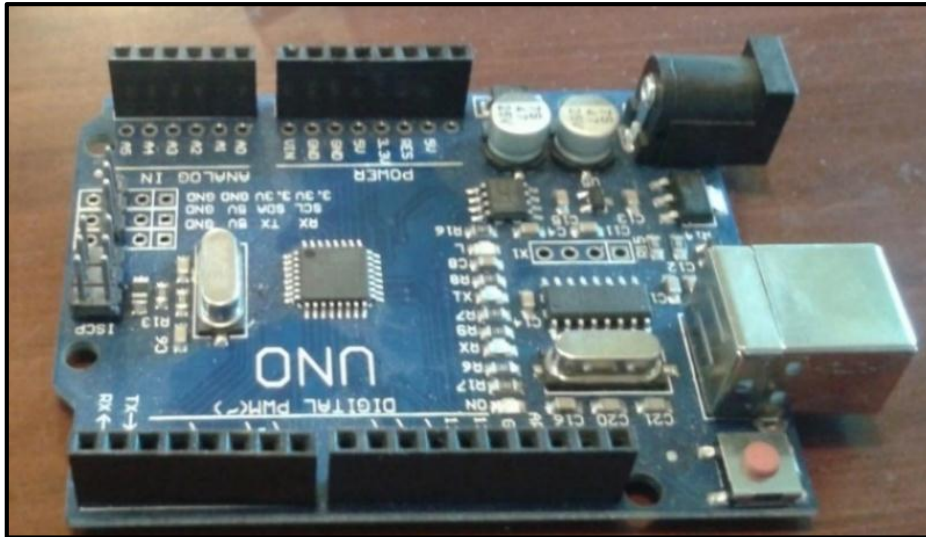


Figura 13: Plataforma Arduino Uno.

2.1.4 IMPLEMENTACIÓN DE LA ESTRUCTURA

Previa a la implementación de la estructura del módulo, se seleccionó el diseño de paleta háptica de la universidad Vanderbilt (Ver Anexo A) con la finalidad de realizar el respectivo mecanizado de las piezas que la componen. Construyendo así los elementos en acrílico de corte láser en el caso de la paleta y la base superior e inferior. Las piezas restantes fueron mecanizadas mediante torno como son rueda en aluminio y el eje en hierro, logrando así la implantación de todos los elementos de la estructura, como se observa en la siguiente Figura 14.



Figura 14: Estructura del módulo de paleta háptica en acrílico.

2.1.5 IMPLEMENTACIÓN DE DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS

Después de la selección del actuador y plataforma Arduino se procede a la implementación de estos dispositivos en el módulo de paleta háptica. Las conexiones realizadas entre el motor dc, encoder y driver Ln298 a la plataforma Arduino Uno se efectuó acorde a las especificaciones técnicas de cada elemento (VER ANEXOS B, C, D Y E), tal como muestra el diagrama del circuito eléctrico diseñado en el software ISIS de PROTEUS (VER ANEXOS F), como se observa en la Figura 15.

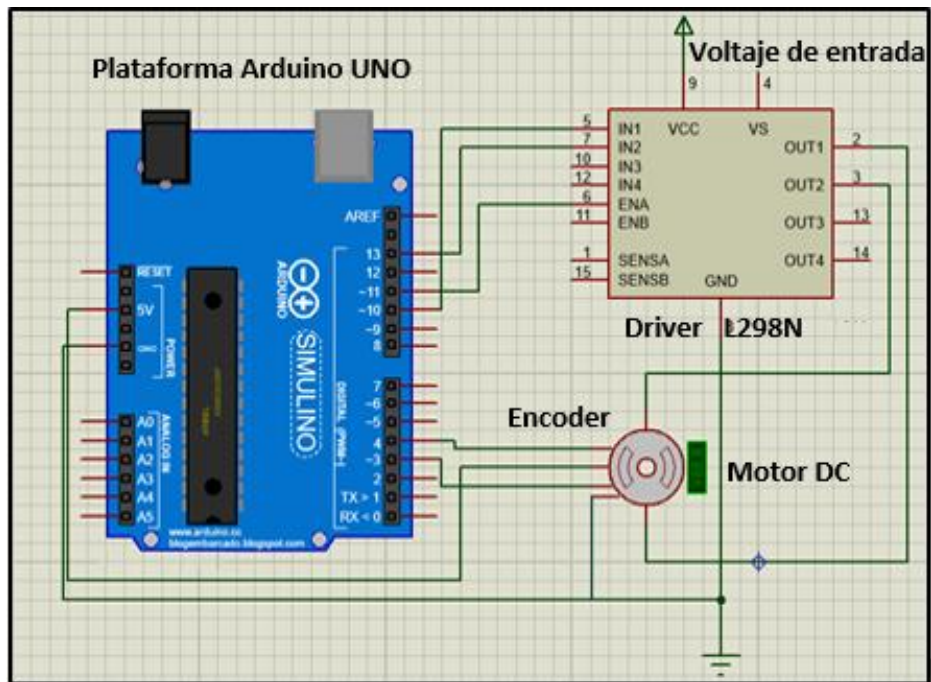


Figura 15: Diagrama del circuito eléctrico.

En Figura 16, se muestra el módulo de paleta háptica ensamblado por completo con la conexión de los dispositivos electrónicos.

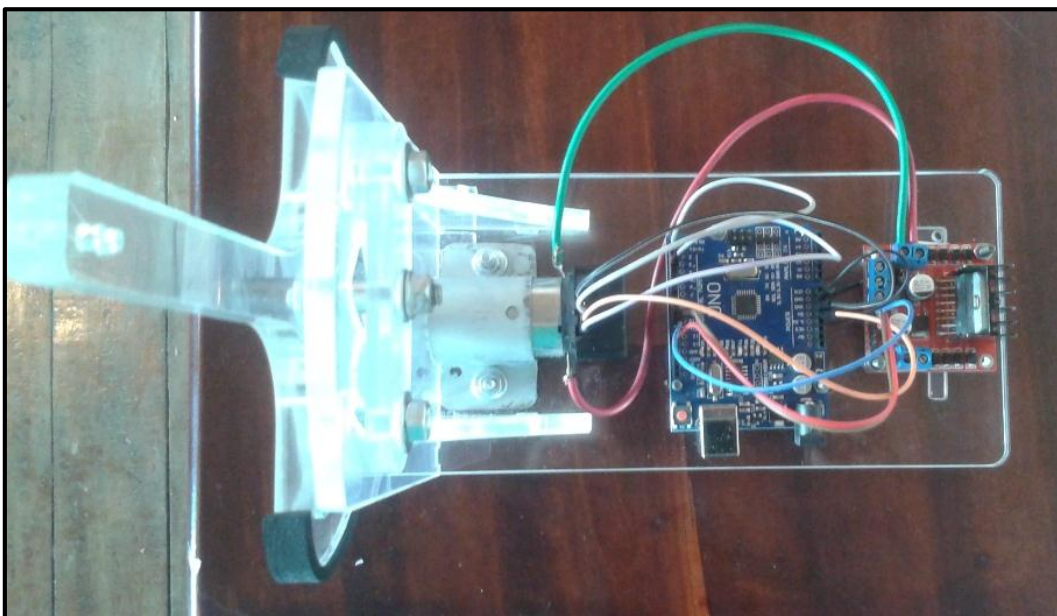


Figura 16: Conexión de dispositivos electrónicos del módulo háptico.

2.2 SISTEMA DE CONTROL

2.2.1 MODELO MATEMÁTICO EXPERIMENTAL DE LA PLANTA

Para la determinación experimental del modelo matemático de la planta se utiliza MATLAB mediante el siguiente proceso:

- a) Se adquiere 6 diferentes muestras del arranque del sistema en función de la velocidad angular respecto al tiempo, de las cuales se obtiene de un promedio de muestras como se indica en la Tabla 5.

Tabla 5: Arranque del sistema.

TIEMPO (segundos)	Cantidad de pulsos Lectura encoder	Velocidad angular Lectura encoder
0	0	0
0,006	0	0
0,012	0	0
0,018	0	0
0,024	0,8	0,03
0,294	35,4	1,27
0,3	36,4	1,31
0,594	74,2	2,67
1,194	129,4	4,66
1,794	162,6	5,85
2,394	181	6,52
2,994	194	6,98
3,594	201,8	7,26
4,194	205,2	7,39
4,794	210,8	7,59
5,394	213	7,67
5,994	215,4	7,75
6,594	217	7,81
7,194	218,6	7,87
7,794	219	7,88
8,394	217,4	7,83
8,994	219,4	7,90
9,594	218,4	7,86
10,194	219,2	7,89
10,794	218,6	7,87

11,394	219,4	7,90
11,4	219,6	7,91
11,574	221,2	7,96
11,58	220,8	7,95
11,586	221	7,96
11,592	221,8	7,98
11,598	221,6	7,98
11,604	220,6	7,94
11,61	221,2	7,96

La siguiente Figura 17, muestra el arranque del sistema en función de la velocidad angular respecto al tiempo.

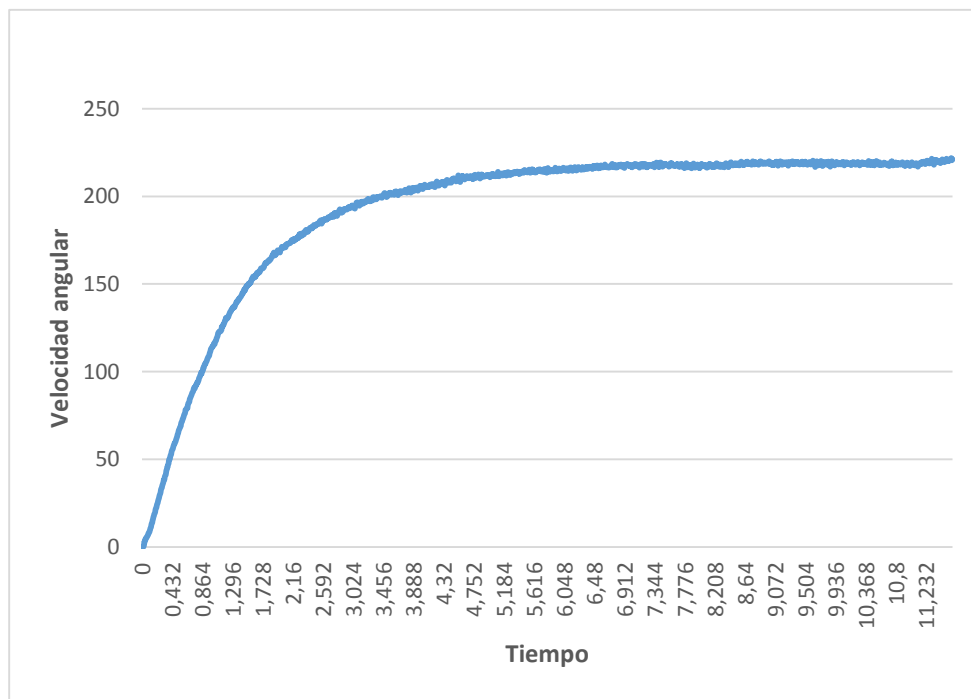


Figura 17: Respuesta paso del sistema.

- b) Se realiza la identificación de la planta mediante Matlab con los datos que se muestran a continuación:
- Datos requeridos para la identificación de la planta

Se importa la Tabla 6 Arranque del sistema hacia Matlab, de la cual se toma la columna cantidad de pulsos y se ingresa la amplitud máxima de 221,2 con un tiempo de muestra de 0,006 segundos, datos que son requeridos para la identificación de la planta, como muestra la Figura 18.

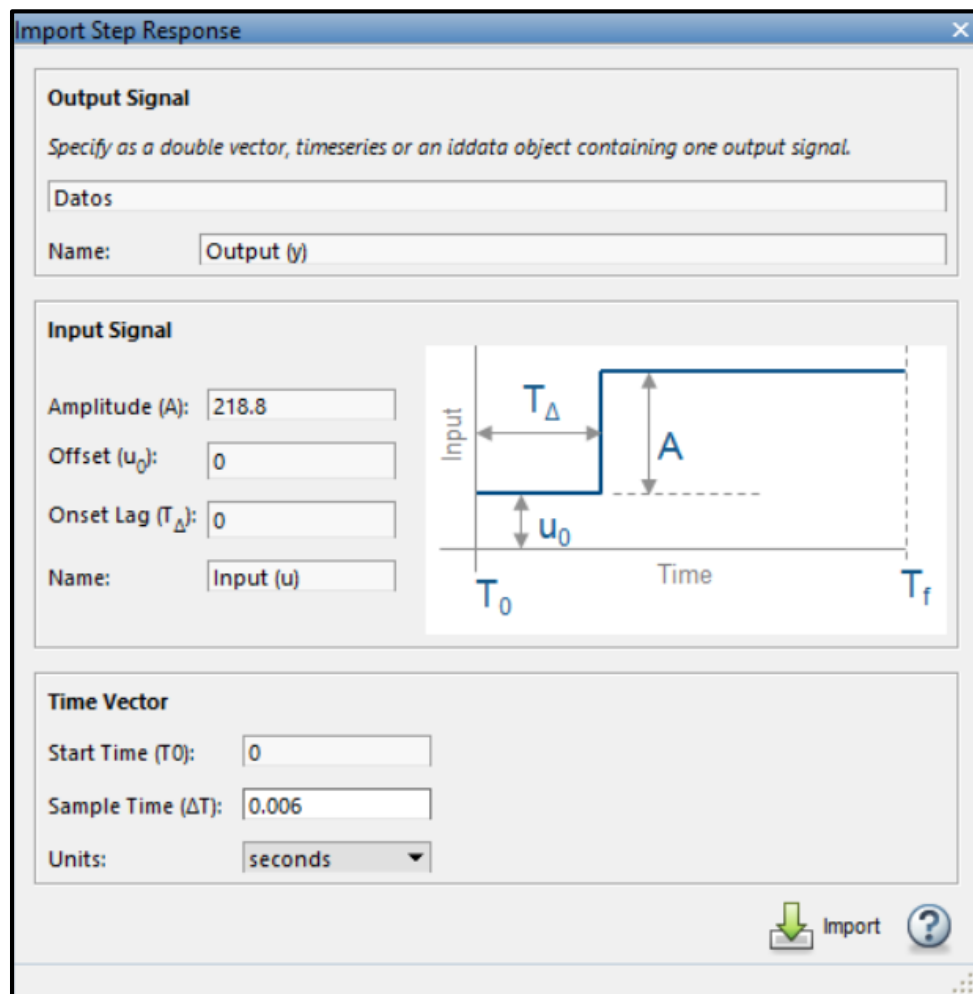


Figura 18: Importación de datos en Matlab.

- Estructura de la planta

Como siguiente paso, se escoge la estructura de la planta con dos polos reales para la función de transferencia, como muestra la Figura 19.

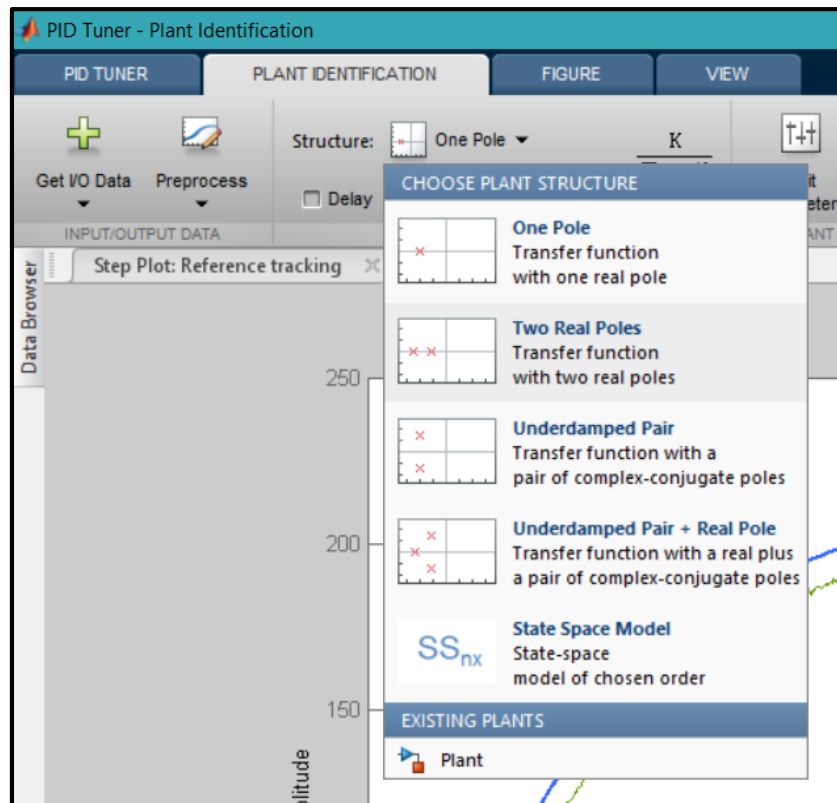


Figura 19: Selección de la estructura de la planta en Matlab.

La siguiente gráfica muestra el resultado de los datos identificados, ver Figura 20 y la planta identificada con dos polos reales con los tiempos de $T_1 = 0,1582$ y $T_2 = 1,259$, ver Figura 21.

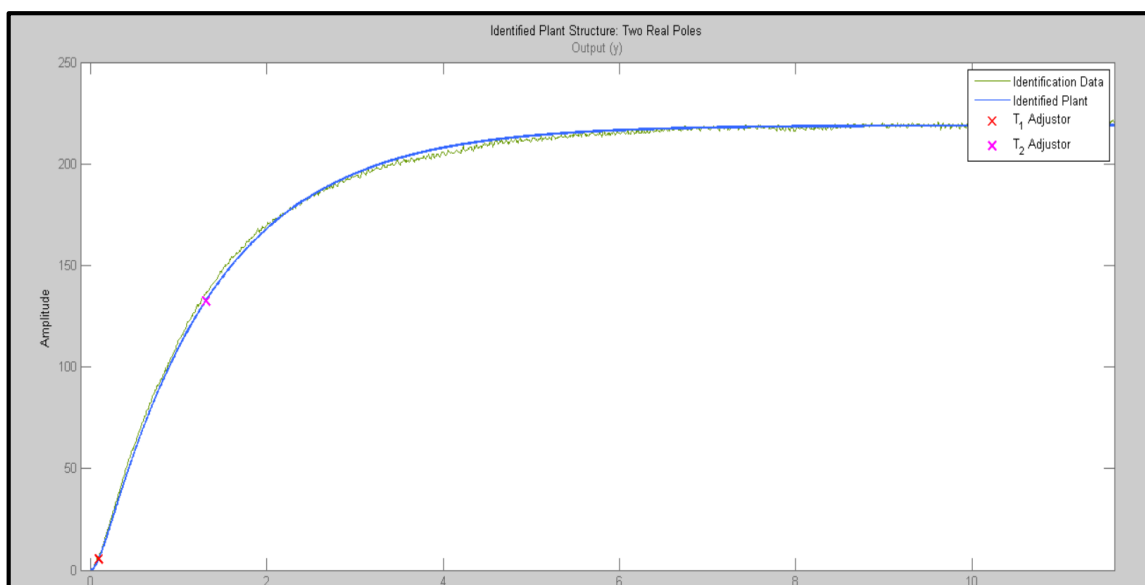


Figura 20: Planta identificada.

En la Figura 21, se observa los parámetros de la planta.

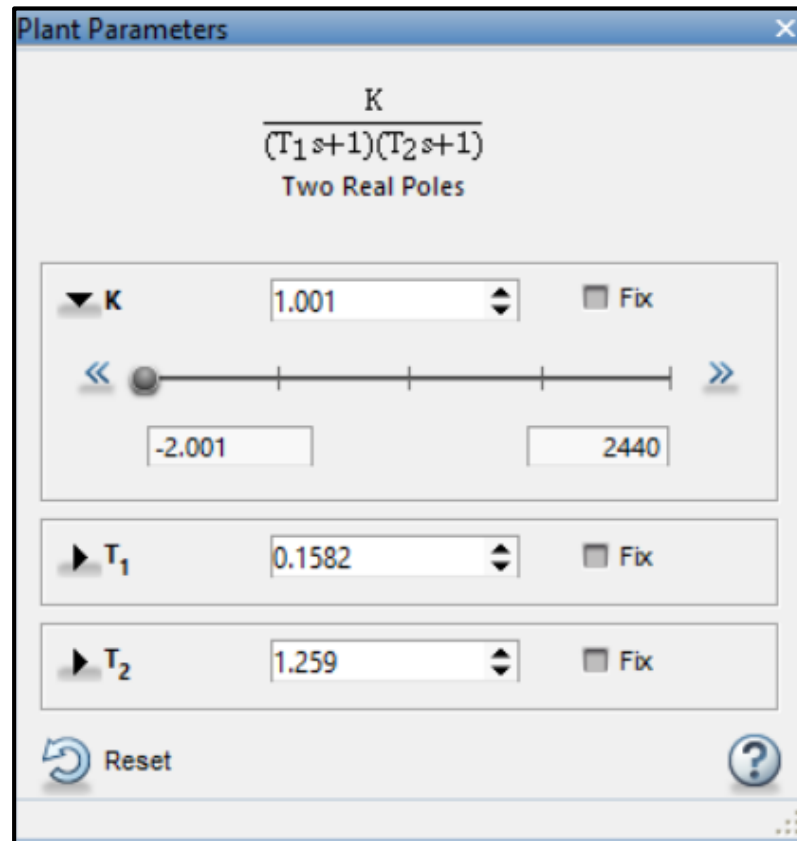


Figura 21: Parámetros de la planta en Matlab

- c) La obtención de la función de transferencia se realiza mediante el código de Matlab, en donde la planta identificada con dos polos reales con los tiempos de $T_1=0,1582$ y $T_2=1,259$. Se procede a reemplazar en la forma de la ecuación de segundo orden y como se muestra a continuación:

$$FT = \frac{1}{0,1991s^2 + 1,477s + 1}$$

En la Figura 22, se muestra la gráfica de la función de transferencia obtenida en lazo abierto y la respuesta paso del sistema real.

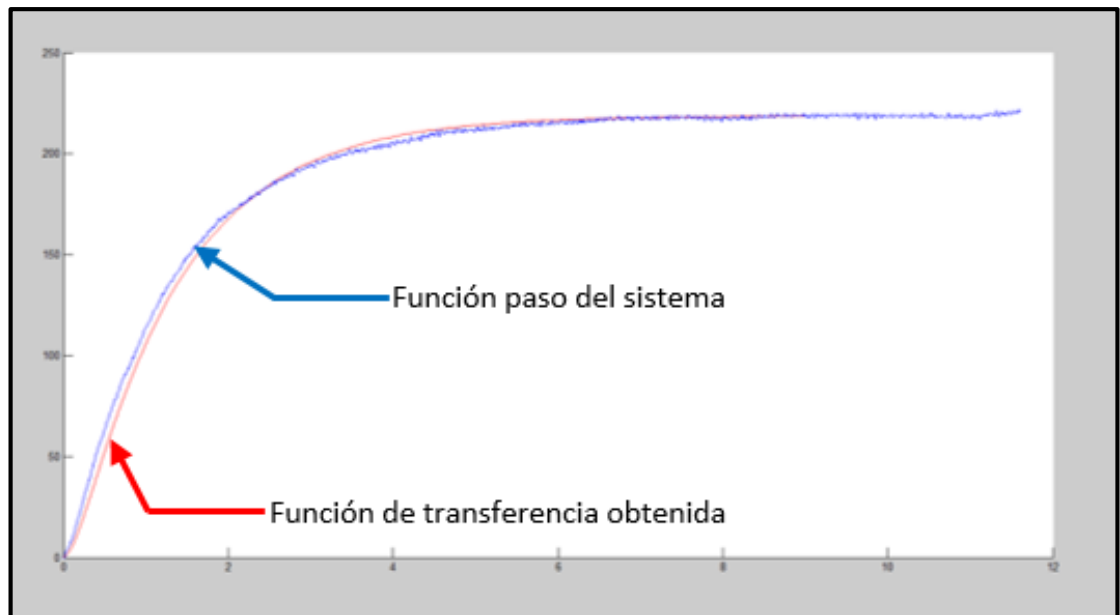


Figura 22: Gráfica del sistema FT y función paso.

2.2.2 DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL

Existen varios tipos de controladores los cuales se describieron anteriormente y cada uno de estos controladores se puede implementar en el diseño del sistema de control del módulo de paleta háptica y así observar las diferentes características que muestra cada controlador.

A continuación, en la siguiente Figura 23, se presenta el diagrama de bloques del sistema de control.

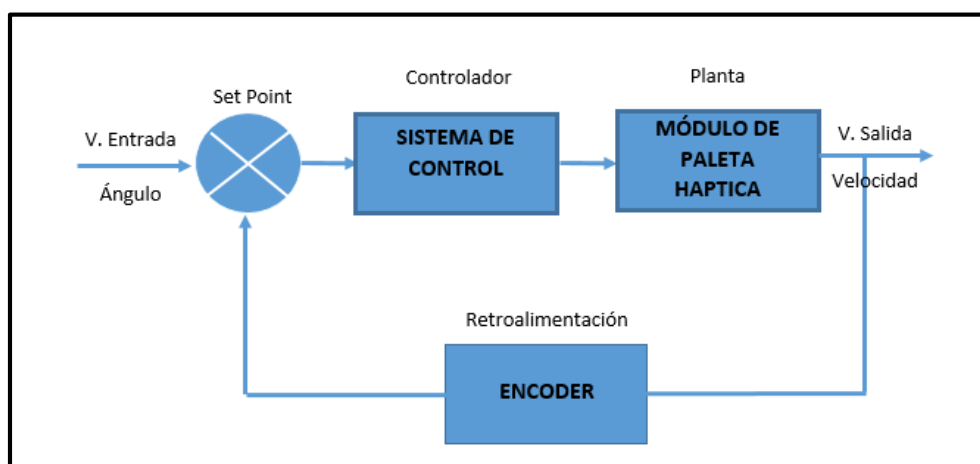


Figura 23: Diagrama de bloques del sistema de control.

Para comprobar el sistema, se usa un controlador proporcional, en donde se aplica a la función de transferencia original del sistema una retroalimentación con una constante de tiempo proporcional $p=20$ y una función paso al sistema, como se muestra a continuación:

- Función de transferencia original en lazo abierto.

$$FT = \frac{1}{0,1991s^2 + 1,447s + 1}$$

- Función de transferencia original retroalimentada con una constante proporcional de $p=20$.

$$FT = \frac{100,458}{s^2 + 7,11656s + 105,481}$$

- Función de transferencia al dar una función paso al sistema en lazo cerrado.

$$FT = \frac{1}{s} \frac{100,458}{s^2 + 7,11656s + 105,481}$$

- a) Al ver que la función de transferencia original más la función paso no son factorizable se aplica fracciones parciales.

$$FT = \frac{1}{s} \frac{100,458}{s^2 + 7,11656s + 105,481} = \frac{A}{s} + \frac{Bs + C}{s^2 + 7,11656s + 105,481}$$

$$100,458 = (A + B)s^2 + (7,11656A + C)s + 105,481A$$

$$100,458 = 105,481A$$

$$A + B = 0$$

$$7,11656sA + C = 0$$

Donde,

$$A = 0,9525$$

$$B = -0,9525$$

$$C = -6,779$$

La función de transferencia queda de la siguiente manera al reemplaza A, B y C.

$$FT = 0,9525 \left(\frac{1}{s} \frac{s + 7,11656}{s^2 + 7,11656s + 105,481} \right)$$

Al pasar la ecuación anterior en el dominio del tiempo se muestra así:

$$FT = 0,9525(1 - e^{-3,558t}(\cos(9,63t) - 0,369 \sin(9,63t)))$$

Con la función obtenida matemáticamente en el dominio del tiempo se obtiene gráficamente el comportamiento del sistema ver Figura 24, con un tiempo de establecimiento 1,5s como se muestra a continuación.

En la siguiente Tabla 6 se muestra los datos teóricos del comportamiento del sistema respecto al tiempo con su respectiva gráfica.

Tabla 6: Datos teórico del comportamiento del sistema

TIEMPO	PASO
0	0
0.01	0.03756328
0.1	0.57171744
0.2	1.11558479
0.3	1.26988111
0.4	1.12631999
0.5	0.93578553
0.6	0.8538856
0.7	0.88191309
0.8	0.94452475
0.9	0.98083648

1	0.97914205
1.2	0.94545991
1.3	0.94327443
1.4	0.94864592
1.5	0.95401401

En la siguiente Figura 24, se muestra el comportamiento teórico del sistema.

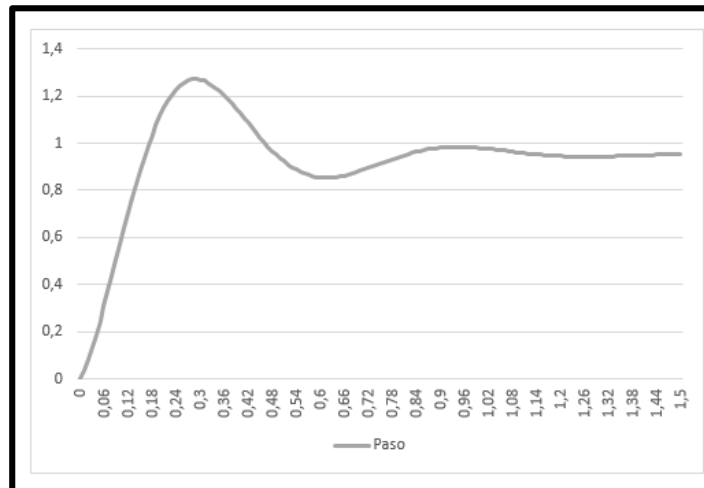


Figura 24: Comportamiento teórico del sistema.

A continuación, se observa la respuesta controlada del sistema en LabVIEW con un tiempo de establecimiento de $t=1,5s$ al aplicar el control proporcional, ver Figura 25.

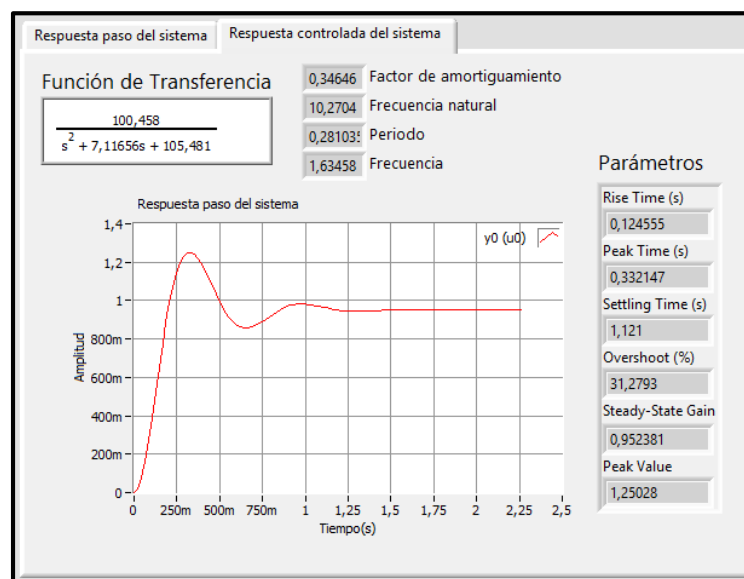


Figura 25: Respuesta controlada del sistema en LabVIEW.

2.3 INTERFAZ DE CONTROL

2.3.1 SOFTWARE INTERFAZ

A continuación, se desarrolla el sistema que muestra e interpreta las señales mediante programación que soporta la plataforma de LabVIEW (VER ANEXOS G).

2.3.1.1 PANEL FRONTAL

En las siguientes figuras, se observa las partes que conforman la interfaz gráfica para uso del usuario en el panel frontal de LabVIEW.

- a) Selección del puerto de comunicación mediante el botón, ver Figura 26.

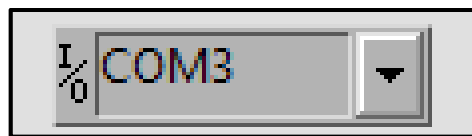


Figura 26: Puerto de comunicación.

- b) Respuesta paso del sistema original en lazo abierto, ver Figura 27.

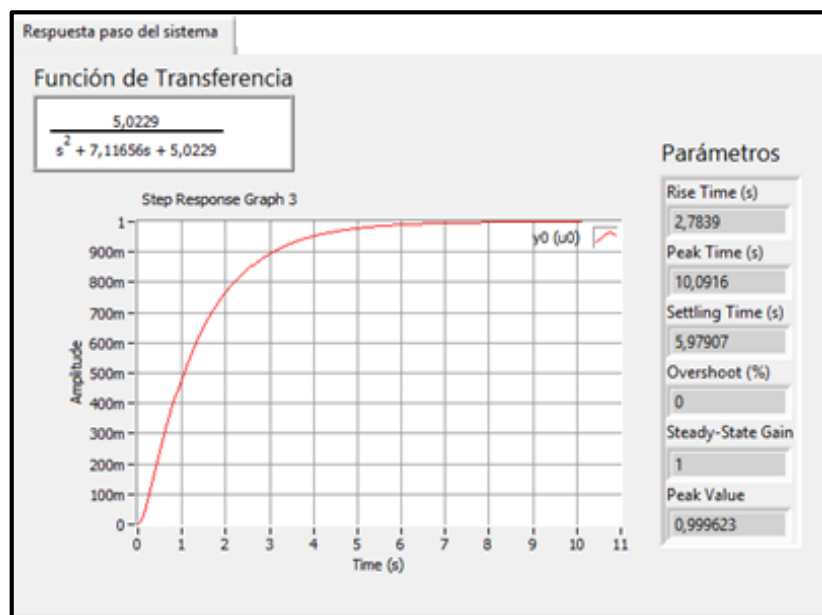


Figura 27: Respuesta paso del sistema.

- c) Respuesta controlada del sistema con sus respectivas características en lazo cerrado, ver Figura 28.

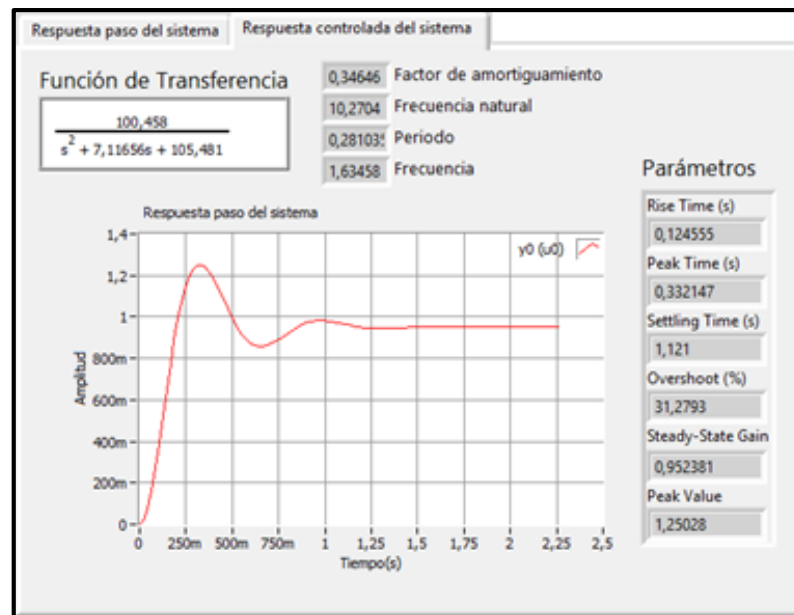


Figura 28: Respuesta controlada del sistema.

- d) En la siguiente ventana se muestra la señal del módulo real, ver Figura 29.

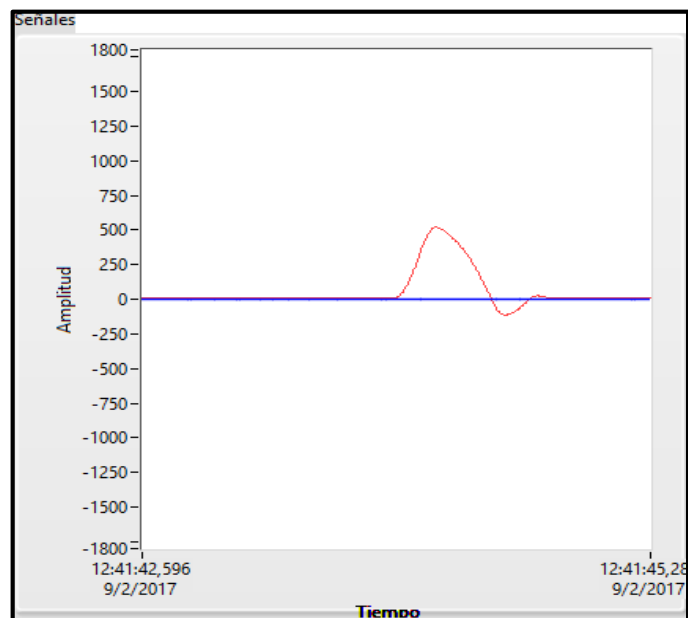


Figura 29: Señal del sistema real.

- e) Ingreso de ganancias PID, ver Figura 30.

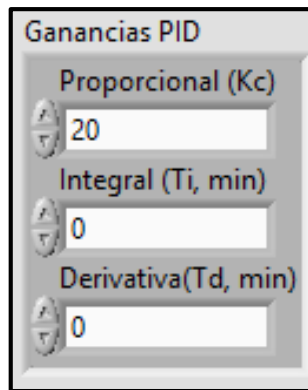


Figura 30: Ganancias PID

f) El botón STOP permite al usuario salir de ejecución del programa, ver Figura 31.



Figura 31: Botón Stop.

2.3.1.2 PANEL DE PROGRAMACIÓN

a) Decodificación de datos

Para recibir y leer datos enviados por medio de la tarjeta Arduino, se desarrolló la programación para decodificación de datos en LabVIEW, como se muestra a continuación.

- Activación del puerto, ver Figura 32.

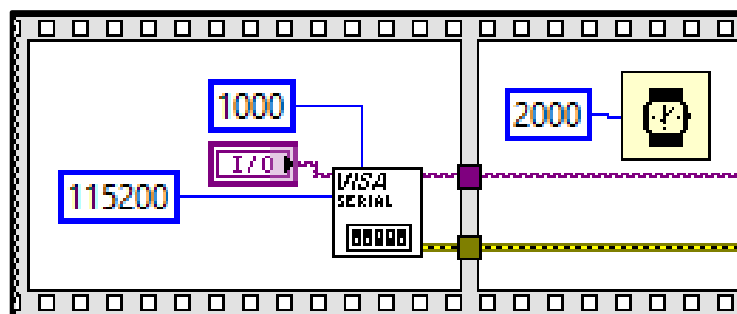


Figura 32: Activación del puerto.

- Inicio de Arduino para envío de datos, ver Figura 33.

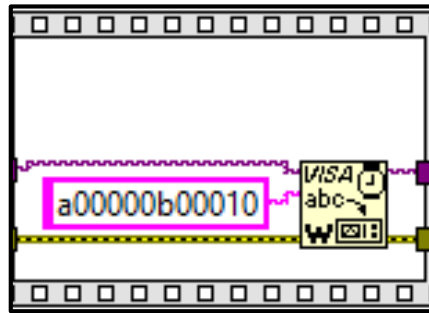


Figura 33: Inicio de Arduino

- Lectura encoder, ver Figura 34.

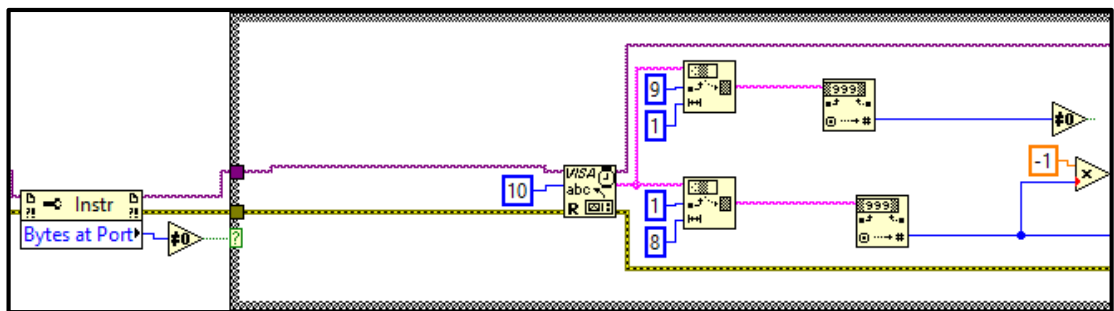


Figura 34: Lectura encoder.

- b) Controlador PID, ver Figura 35.

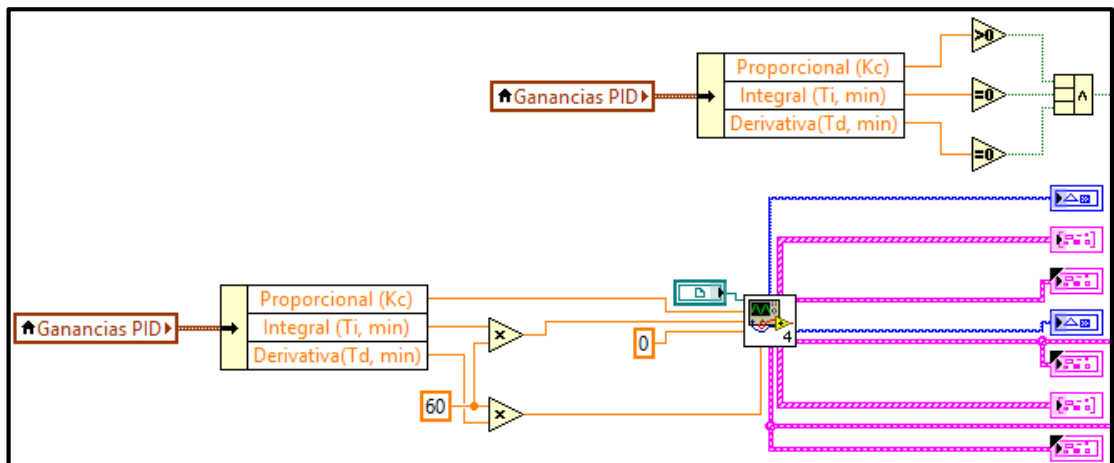


Figura 35: Ganancias PID.

- c) Codificación de datos

Se muestra a continuación la programación para la codificación de datos en LabVIEW, en esta parte del programa se envía y escribe datos en la tarjeta Arduino:

- Codificación de datos entregados por el controlador PID, ver Figura 36.

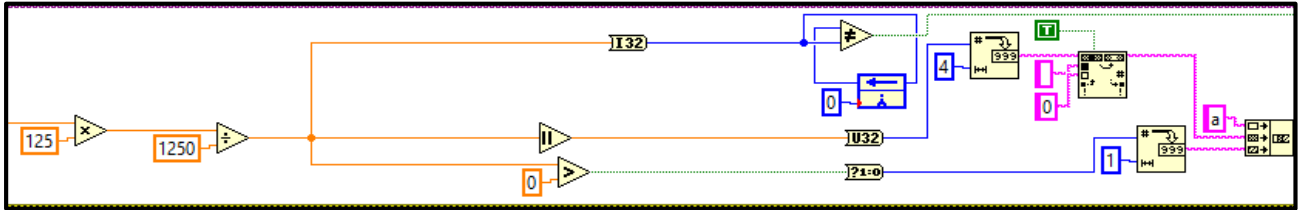


Figura 36: Codificación de datos.

- Escribe los datos en Arduino, ver Figura 37.



Figura 37: Escritura de datos.

- Cierra el puerto de Arduino, ver Figura 38.

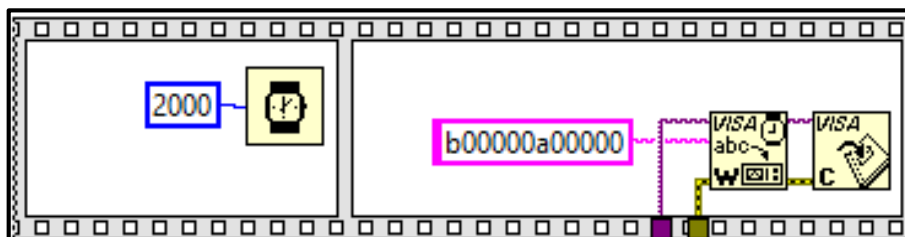


Figura 38: Cierre de puerto.

2.3.2 PROGRAMACIÓN DEL MANDO EN ARDUINO

Se realiza la programación del microcontrolador ATmega328 de Arduino en el ambiente de programación de Arduino con lenguaje de programación basado en C++ (VER ANEXOS H). El microcontrolador crea el enlace con LabVIEW y realiza las operaciones de control interactuando el Módulo de paleta háptica con el usuario, como se observa una parte del diagrama de flujo del sistema en la Figura 39.

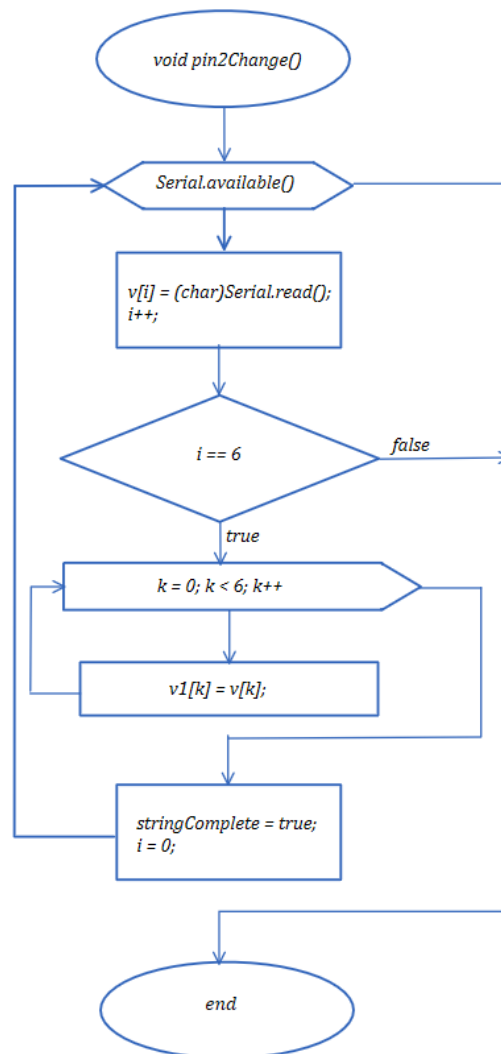


Figura 39: Diagrama de Flujo (Serial).

CAPÍTULO III

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Luego de determinar los parámetros que permiten desarrollar la interfaz de control implementada, se realiza un análisis haciendo énfasis en el módulo y la respuesta que presenta la paleta háptica.

3.1 MÓDULO FINAL

Se realizó el ensamblaje de todo el módulo de paleta háptica, elementos mecánicos, electrónicos y sistema de control, ver Figura 40. Al ejecutar las pruebas de funcionamiento se determinó el modelo matemático de la planta y se diseñó un controlador para el sistema, teniendo como resultado un funcionamiento óptimo del mecanismo y la visualización de la respuesta simulada del sistema de control acorde a las necesidades planteadas en los objetivos.

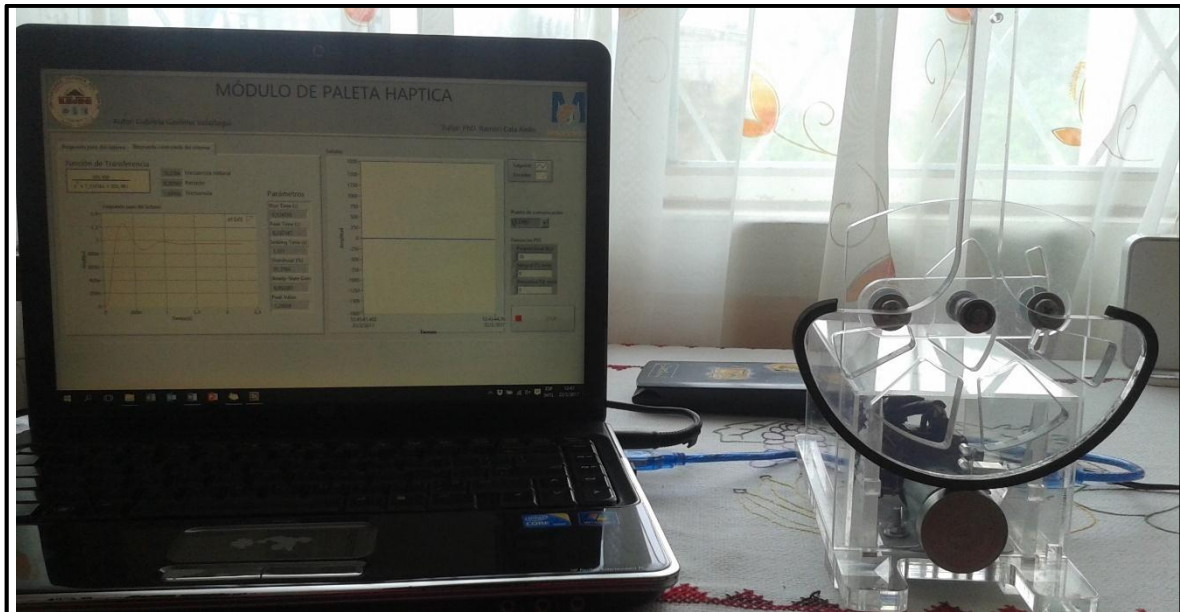


Figura 40: Módulo de paleta háptica.

El módulo de paleta háptica incorporó nuevos cambios como son la implementación de un controlador para el uso motor en la parte electrónica y una interfaz de control entre

LabVIEW y Arduino con disminución de tiempos en el desarrollo del sistema y amigable al usuario, contribuyendo así a la evolución de dispositivos de paleta háptica.

El funcionamiento de este dispositivo se basó en función de la fuerza o movimiento que el usuario aplica en la paleta del dispositivo sobre la rueda de aluminio, el motor arranca y el sensor de posición adaptado al eje del motor detecta el movimiento y envía los datos de su posición actual a la entrada del microcontrolador, los datos son procesados para poder ser leídos, controlando así la señal y enviar los datos a través de la interfaz diseñada en LabVIEW/Arduino para que el sistema se mantenga estable, traduciéndolo en un movimiento transmitido de nuevo al usuario mediante el motor.

3.2 ANÁLISIS DE RESPUESTA

El módulo de paleta háptica es un sistema de mayor dificultad en lo que a control corresponde. Se determinó las ecuaciones respectivas para obtener un modelo matemático que implica relacionar la posición de la paleta, teniendo como resultado una interfaz de control de diferentes tipos para el establecimiento sistema.

La interfaz realizada para el módulo didáctico, permite al usuario observar la señal del movimiento controlado real con su respectiva función de transferencia cuando este aplica una fuerza en la paleta háptica, experimentando así con los movimientos oscilatorios, como se muestra en la siguiente Figura 41.

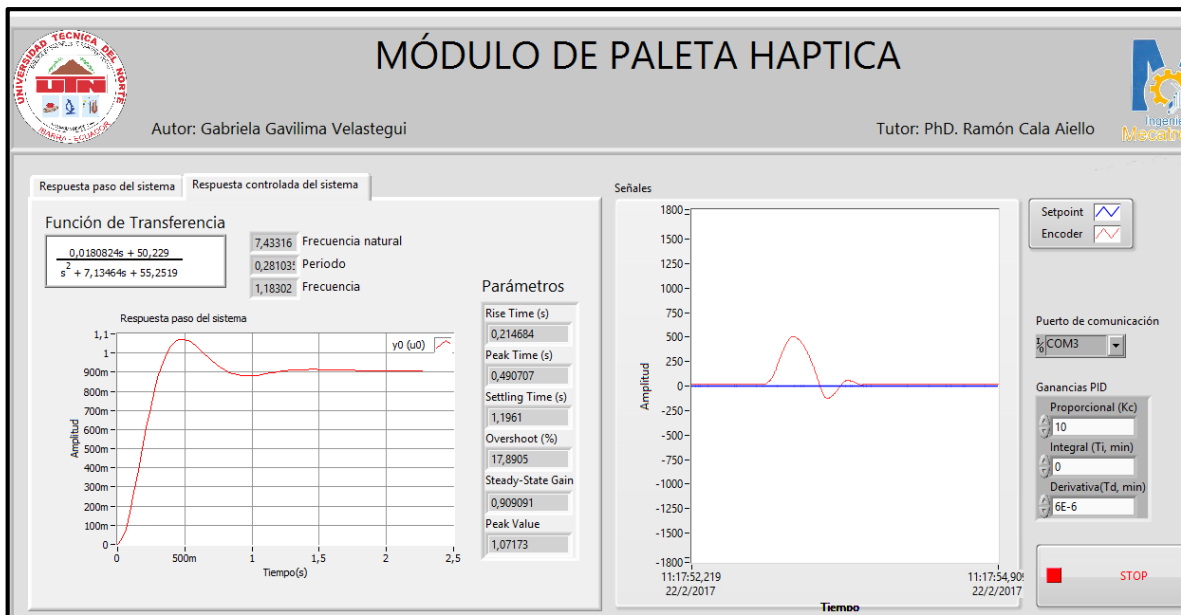


Figura 41: Interfaz del módulo de paleta háptica.

Para la prueba del funcionamiento del sistema de control se realizó un control proporcional donde se observa el comportamiento del sistema calculado adaptado al sistema real, ver Figura 42, con sus respectivas características, ver Tabla 7 y curvas envolventes de la respuesta del sistema ante una entrada escalón unitario, ver Figura 43.

A continuación, se observa la respuesta controlada del sistema en LabVIEW con un tiempo de establecimiento de $t=1,5s$ al aplicar un control proporcional, ver Figura 42.

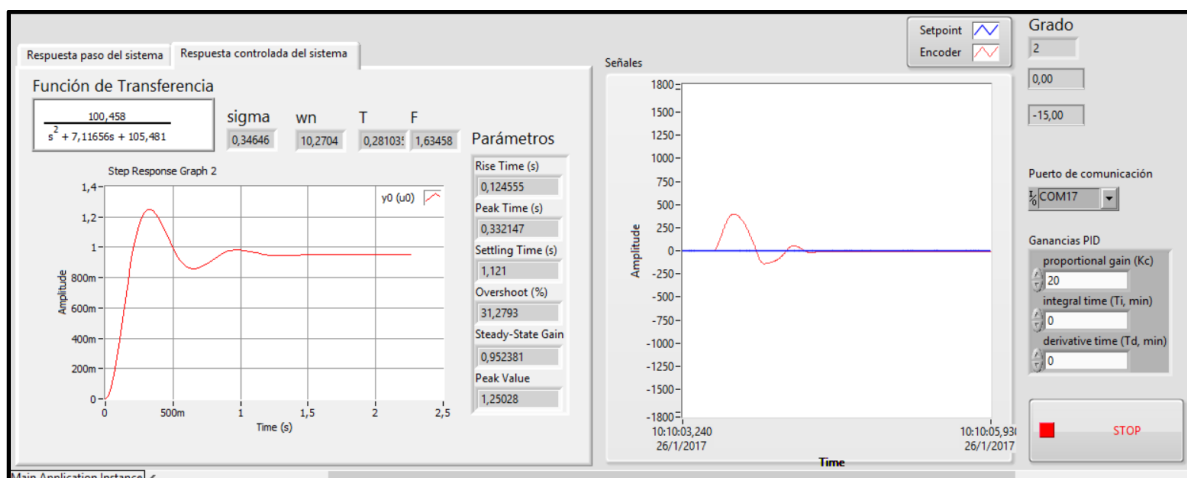


Figura 42: Respuesta controlada del sistema en LabVIEW.

En la Tabla 7, se muestran las características del comportamiento del sistema de la Figura 43 en la interfaz de LabVIEW.

Tabla 7: Características de la gráfica del sistema

Frecuencia natural no amortiguada ω_n	10,2701
Factor de amortiguamiento relativo del sistema (ζ)	0,3464
Constante de tiempo (T)	0,2810s
Frecuencia de oscilación (f)	1,6345
Tiempo pico (t_p)	1,25s
Tiempo de asentamiento, t_s	1,12s

A continuación, se muestra en la Figura 43, con las curvas envolventes de la respuesta del sistema para una entrada escalón unitario en la plataforma LabVIEW.

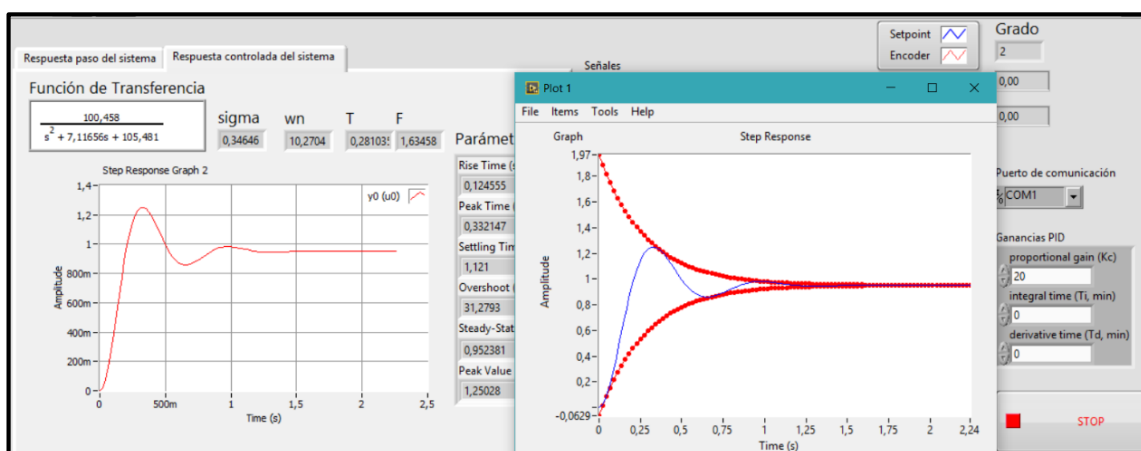


Figura 43: Curvas envolventes de respuesta del sistema en LabVIEW.

CAPÍTULO IV

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

4.1 CONCLUSIONES.

- Con el análisis de la información bibliográfica se determinó que las variaciones estructurales en el módulo como tipo del material, sujeción de la paleta o elementos de fricción, generan cambios considerables en el modelo matemático.
- El uso de acrílico de corte laser en la estructura y elementos electrónicos accesibles y de bajo costo como actuador, sensor de posición y microcontrolador permitió la construcción de la planta del módulo didáctico.
- A través de pruebas experimentales se obtuvo el modelado matemático de la planta y el coeficiente de fricción del caucho.
- Como resultado de las pruebas realizadas en el sistema eléctrico y de control se implementó la etapa de interconexión entre la interfaz y la planta al módulo de paleta háptica.
- Mediante la utilización de Arduino y LabVIEW se logró reducir el tiempo de desarrollo de la interfaz del sistema, debido a la facilidad de uso y a la gran cantidad de información disponible de los programas anteriormente mencionados.
- En LabVIEW se representó de forma gráfica el comportamiento esperado y real del sistema háptico y se mostrara los parámetros que caracterizan al sistema, ofreciendo una interfaz de control amigable al usuario.

4.2 RECOMENDACIONES.

- El sensor de lectura del módulo de paleta háptica debe poseer una buena precisión para que tenga una reacción eficiente al tacto de las personas.
- Para miniaturizar el sistema se puede desarrollar una placa de control con todos los componentes en montajes superficial.
- Se puede anexar o aumentar sensores que permitan resetear la paleta y volver a su posición central como puede ser el uso de acelerómetros.
- Otra mejora es implementar módulos de comunicación de control inalámbrica para expandir la funcionalidad del sistema en diferentes plataformas, como también en la reducción de cableado y así brindar la mayor facilidad de traslado del dispositivo.

BIBLIOGRAFÍA

- Alvarado, M. S. A. (2012). Modelo matemático de un motor de corriente continua separadamente excitado: Control de velocidad por corriente de armadura. *Lat. Am. J. Phys. Educ. Vol, 6(1)*, 155.
- Arata, J., Kondo, H., Ikedo, N., & Fujimoto, H. (2011). Haptic device using a newly developed redundant parallel mechanism. *Robotics, IEEE Transactions on, 27(2)*, 201-214.
- Arduino. (2016). Arduino Software (IDE). Retrieved from <https://www.arduino.cc/en/Guide/Environment#>
- Basdogan, C., De, S., Kim, J., Muniyandi, M., Kim, H., & Srinivasan, M. A. (2004). Haptics in minimally invasive surgical simulation and training. *IEEE computer graphics and applications, 24(2)*, 56-64.
- Bengoechea, E., Sánchez, E., & Gil, J. J. (2015). Palanca Háptica Versátil de Bajo Coste para Simuladores de Conducción y Entrenamiento.
- Bowen, K., & O'Malley, M. K. (2006). *Adaptation of haptic interfaces for a labview-based system dynamics course*. Paper presented at the Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 2006 14th Symposium on.
- Canales, A. R., & Martínez, J. M. M. (2010). *Automatización y telecontrol de sistemas de riego: Marcombo*.
- Chapman, S. J. S. J., Boylestad, R. L. L. B., Hayt, W. H. D., KEMMERLY, S. M., Hayt, J. E. W. H., Kemmerly, J. E., . . . Edminister, M. A. (2012). *Máquinas eléctricas: Pirelli*.
- Cusido, A. R. (2014). *Control automático de procesos industriales: Con prácticas de simulación y análisis por ordenador PC*: Ediciones Díaz de Santos.
- Davis, T. A. (2010). *MATLAB primer*: CRC press.
- de Silva, C. W. (2015). *Sensors and Actuators: Engineering System Instrumentation, Second Edition*: CRC Press.
- Fischer, A., & Vance, J. M. (2003). *Phantom haptic device implemented in a projection screen virtual environment*. Paper presented at the Proceedings of the workshop on Virtual environments 2003.
- Gandarias Palacios, J. M., Akbari Kalhor, S., & Gómez de Gabriel, J. M. (2016). Diseño y uso de una paleta háptica para prácticas de teleoperación con simulink.
- Gassert, R., Metzger, J.-C., Leuenberger, K., Popp, W. L., Tucker, M. R., Vigar, B., . . . Lambercy, O. (2013). Physical Student–Robot Interaction With the ETHZ Haptic Paddle. *Education, IEEE Transactions on, 56(1)*, 9-17.
- Gaviño, H., & Gaviño, R. H. (2010). *Introducción a los sistemas de control: conceptos, aplicaciones y simulación con MATLAB*: Prentice Hall.

- Gillespie, R. B., Hoffinan, M., & Freudenberg, J. (2003). *Haptic interface for hands-on instruction in system dynamics and embedded control*. Paper presented at the Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 2003. HAPTICS 2003. Proceedings. 11th Symposium on.
- Gorlewicz, J. L., & Webster III, R. J. (2012). *A formal assessment of the haptic paddle laboratories in teaching system dynamics*. Paper presented at the American Society for Engineering Education.
- Grow, D. I., Verner, L. N., & Okamura, A. M. (2007). *Educational Haptics*. Paper presented at the AAAI Spring Symposium: Semantic Scientific Knowledge Integration.
- Guerrero-Hernández, A., Gallardo, J. A. A., & Nieves, M. G. (2016). Implementación de módulos didácticos para sistemas electrónicos de potencia. *Revista Educación en Ingeniería*, 11(21), 9-13.
- Keljik, J. J. (2013). *Electricity 4: AC/DC Motors, Controls, and Maintenance*: Cengage Learning.
- Larsen, R. W. (2011). *LabVIEW for Engineers*: Pearson Higher Ed.
- Lu, Y.-H., Wang, W.-T., Liang, R.-H., & Ouhyoung, M. (2002). *Virtual sculptor: A feature preserving haptic modeling system*. Paper presented at the Proc. of ACM International Workshop on Immersive Telepresence (ITP2002).
- Martín Doñate, C. (2004). INTERFACES HÁPTICOS. APLICACION EN ENTORNOS VIRTUALES.
- Medlab. (2012). The Vanderbilt Haptic Paddle. In (pp. 6).
- Microchip. (2006). PIC18F2455/2550/4455/4550 Data Sheet. In M. T. Inc (Ed.).
- Ogata, K. (2010). *INGENIERÍA DE CONTROL MODERNA* (M. Martín-Romo Ed. PEARSON EDUCACIÓN, S.A. ed.). Madrid.
- Okamura, A. M., Richard, C., & Cutkosky, M. (2002). Feeling is believing: Using a force-feedback joystick to teach dynamic systems. *Journal of Engineering Education*, 91(3), 345-349.
- Okamura, A. M., Richard, C., & Cutkosky, M. (2002). Feeling is believing: Using a force-feedback joystick to teach dynamic systems.
- Paredes, S. R., Lozoya, R. R., & Solano, M. G. (2010). Análisis estructural de un motor de corriente directa. *ContactoS*, 75, 21-26.
- Prometec. (2015). COMUNICACIÓN SERIE CON EL MUNDO EXTERIOR COMUNICACIÓN SERIE CON EL MUNDO EXTERIOR R. Retrieved from <http://www.prometec.net/comunicacion-exterior/>
- Raya González, L. (2011). Visión global sobre tecnología háptica. *Manual formativo, La revista de ACTA*(61), 115-122.
- Reyes Cortés, F., & Cid Monjaraz, J. (2015). *Arduino: Aplicaciones en robótica, mecatrónica e ingenierías* (Alfaomega Ed.).
- Santana, F. H. H., Rubiano, S. M. M., & Villamizar, F. A. (2012). Kit de desarrollo robótico: una herramienta de aprendizaje en ingeniería. *Revista Educación en Ingeniería*, 5(9), 49-63.

Vilardell, E. N. (2013). *Mantenimiento industrial práctico: Aprende siguiendo el camino contrario*: Createspace Independent Pub.

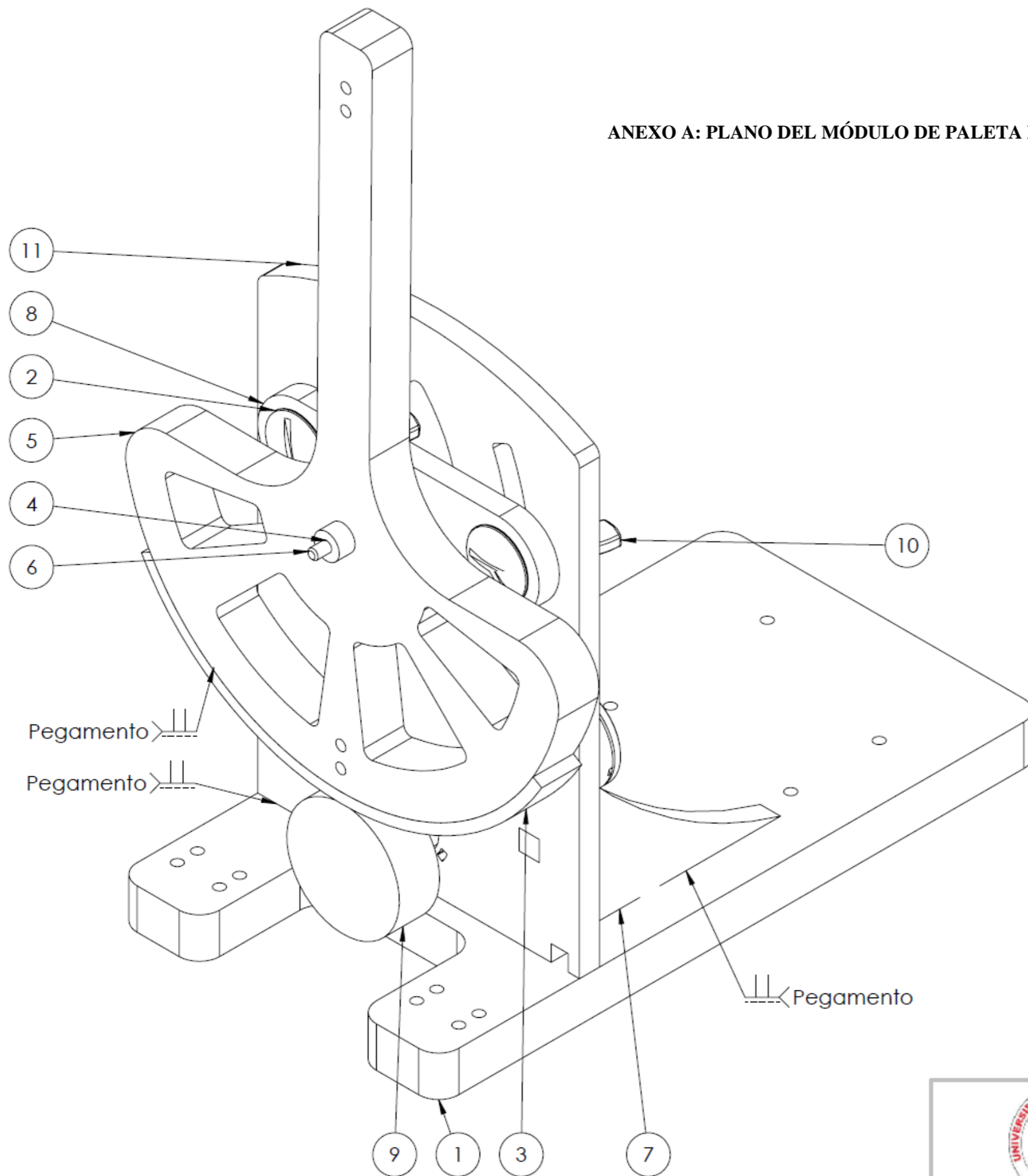
Vizcaíno, J. R. L., & Sebastián, J. P. (2012). *LabVIEW: Entorno gráfico de programación*: Marcombo.

Vizcaíno, J. R. L., & Sebastián, J. P. (2014). *Sistemas integrados con arduino*. México, DF.: Alfaomega.

Åström, K. J., & Hägglund, T. (2009). *Control PID avanzado*: Pearson Educación.

ANEXOS

ANEXO A: PLANO DEL MÓDULO DE PALETA HÁPTICA



N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	Base inferior	Espesor 9mm, Acrílico	1
2	Tornillo	1/4 "	2
3	Lámina EVA	Espesor 3mm, EVA	1
4	Rodela	Acero	2
5	Paleta	Espesor 9mm, Acrílico	1
6	Eje	Hierro	1
7	Soporte	Espesor 6mm, Acrílico	2
8	Soporte ajustable	Espesor 6mm, Acrílico	1
9	Rueda	Aluminio	1
10	Tuerca	Acero	2
11	Base superior	Espesor 6mm, Acrílico	1

	PROYECTO: Construcción de un módulo de paleta háptica		ESCALA: 1:1
	PARTE: Estructura		TOLERANCIA:
CÓDIGO: UTN/2017/CMPH1		DISEÑO: Gavilima G.	HOJA: 1/1
MATERIAL: Ninguno		DIBUJÓ: Gavilima G.	A3
TRATAMIENTO: Ninguno		REVISÓ: Ph.D. Ramón Cala	
RECUBRIMIENTO: Ninguno		APROBÓ: Ph.D. Ramón Cala	
CANTIDAD: 1			

FICA

CIME

ANEXO B: HOJA DE DATOS DEL MOTOR

AMAX 26 26 MM, GRAPHITE BRUSHES, 6 WATT.

maxon 4-max

Kabel AWG 24/7
cabel UL Style 1061
⊕ Kabel rot
cabel red

Terminal 2.8x0.4
(+ Terminal)

M1.6 x 4.6 tief/deep
M_A (L=4.2 min.) 3.5 Ncm max.
∅ 0.2 B

M 1:2

■ Stock program

Standard program

Special program (on request)

Order Number

	with terminals	110946	110947	110948	110949	110950	110951	110952	110953	110954	110955	110956	110957
	with cables	353143	353144	353145	353146	353147	353148	353149	353150	353151	353152	353153	353154

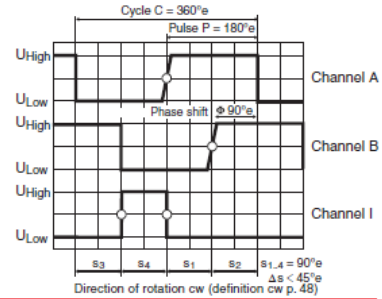
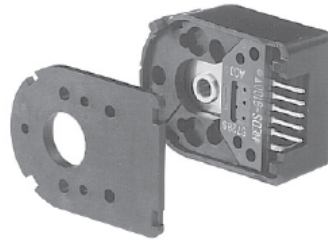
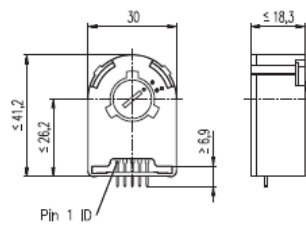
Motor Data														
Values at nominal voltage														
1	Nominal voltage	V	7.2	9.0	12.0	12.0	18.0	18.0	24.0	24.0	30.0	36.0	42.0	48.0
2	No load speed	rpm	9270	10000	10000	8300	8260	7410	8590	7870	8810	8440	8170	6240
3	No load current	mA	118	104	76.8	59.7	39.2	34.0	30.8	27.6	25.4	20.0	16.4	10.3
4	Nominal speed	rpm	7160	7620	7600	5590	5640	4790	5890	5100	6210	5850	5550	3550
5	Nominal torque (max. continuous torque)	mNm	6.73	7.97	11.1	13.0	13.6	13.8	13.1	12.9	13.7	13.8	13.7	13.7
6	Nominal current (max. continuous current)	A	1.08	1.08	1.08	1.03	0.708	0.642	0.532	0.481	0.452	0.365	0.300	0.201
7	Stall torque	mNm	38.2	39.7	52.7	43.8	45.6	41.0	43.5	38.1	47.9	46.4	43.7	32.6
8	Starting current	A	5.50	4.90	4.80	3.29	2.25	1.82	1.67	1.34	1.51	1.16	0.911	0.455
9	Max. efficiency	%	67	69	73	72	74	73	74	73	75	75	75	72
Characteristics														
10	Terminal resistance	Ω	1.31	1.84	2.50	3.65	8.00	9.91	14.4	17.9	19.9	31.0	46.1	106
11	Terminal inductance	mH	0.101	0.138	0.254	0.372	0.862	1.07	1.42	1.69	2.13	3.35	4.85	10.8
12	Torque constant	mNm / A	6.94	8.09	11.0	13.3	20.2	22.5	26.0	28.3	31.8	39.9	48.0	71.6
13	Speed constant	rpm / V	1380	1180	869	718	472	423	367	337	300	239	199	133
14	Speed / torque gradient	rpm / mNm	260	268	198	197	186	186	203	213	188	186	191	197
15	Mechanical time constant	ms	33.4	30.5	27.9	27.1	25.4	25.2	24.9	24.9	24.5	24.3	24.2	24.2
16	Rotor inertia	gcm ²	12.3	10.9	13.5	13.2	13.0	12.9	11.7	11.2	12.5	12.1	11.7	

Specifications	Operating Range	Comments
Thermal data		
17	Thermal resistance housing-ambient	13.2 K / W
18	Thermal resistance winding-housing	3.2 K / W
19	Thermal time constant winding	12.4 s
20	Thermal time constant motor	660 s
21	Ambient temperature	-30 ... +85°C
22	Max. permissible winding temperature	+125°C
Mechanical data (ball bearings)		
23	Max. permissible speed	10400 rpm
24	Axial play	0.1 - 0.2 mm
25	Radial play	0.025 mm
26	Max. axial load (dynamic)	5 N
27	Max. force for press fits (static)	75 N
	(static, shaft supported)	1200 N
28	Max. radial loading, 5 mm from flange	20.5 N
Mechanical data (sleeve bearings)		
23	Max. permissible speed	10400 rpm
24	Axial play	0.1 - 0.2 mm
25	Radial play	0.012 mm
26	Max. axial load (dynamic)	1.7 N
27	Max. force for press fits (static)	80 N
	(static, shaft supported)	1200 N
28	Max. radial loading, 5 mm from flange	5.5 N
Other specifications		
29	Number of pole pairs	1
30	Number of commutator segments	13
31	Weight of motor	100 g
<p>Values listed in the table are nominal. Explanation of the figures on page 49.</p>		
Option		
Sleeve bearings in place of ball bearings		
		<p>Continuous operation In observation of above listed thermal resistance (lines 17 and 18) the maximum permissible winding temperature will be reached during continuous operation at 25°C ambient. = Thermal limit.</p> <p>Short term operation The motor may be briefly overloaded (recurring).</p> <p>Assigned power rating</p>

maxon Modular System	Overview on page 16 - 21
<p>Planetary Gearhead ∅26 mm 0.5 - 2.0 Nm Page 228</p> <p>Spur Gearhead ∅30 mm 0.07 - 0.2 Nm Page 229</p> <p>Planetary Gearhead ∅32 mm 0.4 - 6.0 Nm Page 230 / 231 / 233</p> <p>Spur Gearhead ∅38 mm 0.1 - 0.6 Nm Page 237</p> <p>Spindle Drive ∅32 mm Page 249 / 250 / 251</p>	<p>Recommended Electronics: LSC 30/2 Page 282 EPOS2 Module 36/2 304 EPOS2 24/5 305 EPOS2 50/5 305 EPOS2P 24/5 308</p> <p>Notes 18</p> <p>Encoder MR 128 - 1000 Imp., 3 channels Page 262</p> <p>Encoder Enc 22 mm 100 Imp., 2 channels Page 265</p> <p>Encoder HED_ 5540 500 Imp., 3 channels Page 267 / 269</p> <p>Encoder MEnc ∅13 mm 16 Imp., 2 channels Page 275</p>

ANEXO C: HOJA DE DATOS DEL ENCODER

ENCODER HEDS 5540, 500 COUNTS PER TURN, 3 CHANNELS



- Stock program
- Standard program
- Special program (on request)

Order Number			
110511	110513	110515	110517

Type	110511	110513	110515	110517
Counts per turn	500	500	500	500
Number of channels	3	3	3	3
Max. speed (rpm)	12000	12000	12000	12000
Max. operating frequency (kHz)	100	100	100	100
Shaft diameter (mm)	3	4	6	8



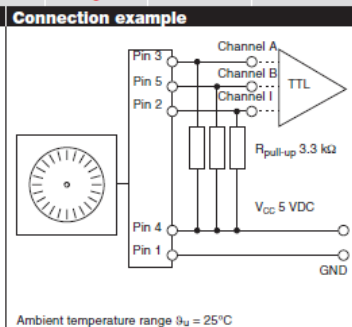
maxon Modular System						
+ Motor	Page	+ Gearhead	Page	+ Brake	Page	Overall length [mm] / • see Gearhead
RE 25	78					63.8
RE 25	78	GP 26, 0.5 - 2.0 Nm	228			•
RE 25	78	GP 32, 0.75 - 4.5 Nm	230			•
RE 25	78	GP 32, 0.75 - 6.0 Nm	231/233			•
RE 25	78	KD 32	236			•
RE 25	78	GP 32 S	249-251			•
RE 25, 20 W	78			AB 28	318	94.3
RE 25, 20 W	78	GP 26, 0.5 - 2.0 Nm	228	AB 28	318	•
RE 25, 20 W	78	GP 32, 0.75 - 4.5 Nm	230	AB 28	318	•
RE 25, 20 W	78	GP 32, 0.75 - 6.0 Nm	231/233	AB 28	318	•
RE 25, 20 W	78	KD 32	236	AB 28	318	•
RE 25, 20 W	78	GP 32 S	249-251	AB 28	318	•
RE 50, 150 W	83					128.7
RE 50, 150 W	83	GP 52, 4 - 30 Nm	242			•
RE 50, 150 W	83	GP 62, 8 - 50 Nm	243			•
RE 65, 250 W	84					157.3
RE 65, 250 W	84	GP 81, 20 - 120 Nm	244			•
A-max 26	102-108					63.5
A-max 26	102-108	GP 26, 0.5 - 2.0 Nm	228			•
A-max 26	102-108	GS 30, 0.07 - 0.2 Nm	229			•
A-max 26	102-108	GP 32, 0.75 - 4.5 Nm	230			•
A-max 26	102-108	GP 32, 0.75 - 6.0 Nm	231/234			•
A-max 26	102-108	GS 38, 0.1 - 0.6 Nm	237			•
A-max 26	102-108	GP 32 S				•
A-max 32	110/112					82.3
A-max 32	110/112	GP 32, 0.75 - 6.0 Nm	232/234			•
A-max 32	110/112	GS 38, 0.1 - 0.6 Nm	237			•
A-max 32	100/102	GP 32 S	249-251			•
EC 32, 80 W	153					78.4
EC 32, 80 W	153	GP 32, 0.75 - 6.0 Nm	232/234			•
EC 32, 80 W	153	GP 32 S				•
EC 40, 120 W	154					88.4
EC 40, 120 W	154	GP 42, 3.0 - 15 Nm	238			•
EC 40, 120 W	154	GP 52, 4.0 - 30 Nm	241			•

Technical Data	
Supply voltage	5 V ± 10 %
Output signal	TTL compatible
Phase shift ϕ	90° ± 45°e
Signal rise time (typically, at $C_L = 25$ pF, $R_L = 2.7$ k Ω , 25°C)	180 ns
Signal fall time (typically, at $C_L = 25$ pF, $R_L = 2.7$ k Ω , 25°C)	40 ns
Index pulse width	90°e
Operating temperature rang	-40 ... +100°C
Moment of inertia of code wheel	≤ 0.6 gcm ²
Max. angular acceleration	250 000 rad s ⁻²
Output current per channel	min. -1 mA, max. 5 mA

Pin Allocation			
	Encoder	Description	Pin no. from 3409.506
Pin 5		Channel B	1
Pin 4		Vcc	2
Pin 3		Channel A	3
Pin 2		Channel I	4
Pin 1		GND	5

Cable with plug:
 maxon Art. No. 3409.506
 The plug (Harting 918.906.6803) can be fixed in the required position

Cable with plug: (compatible with encoder HEDS5010)
 maxon Art. No. 3409.504
 The plug (3M 891100101) can be fixed in the required position



ANEXO D: HOJA DE DATOS DEL CONTROLADOR

CONTROLADOR LN298



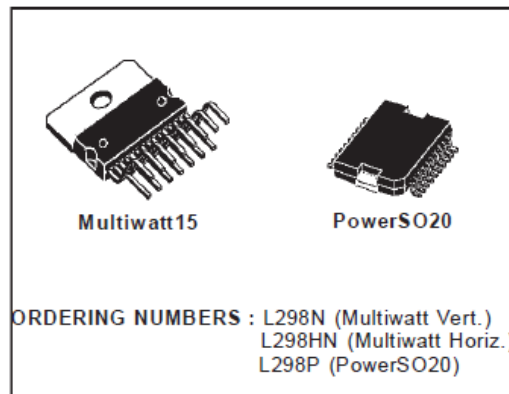
L298

DUAL FULL-BRIDGE DRIVER

- OPERATING SUPPLY VOLTAGE UP TO 46 V
- TOTAL DC CURRENT UP TO 4 A
- LOW SATURATION VOLTAGE
- OVERTEMPERATURE PROTECTION
- LOGICAL "0" INPUT VOLTAGE UP TO 1.5 V (HIGH NOISE IMMUNITY)

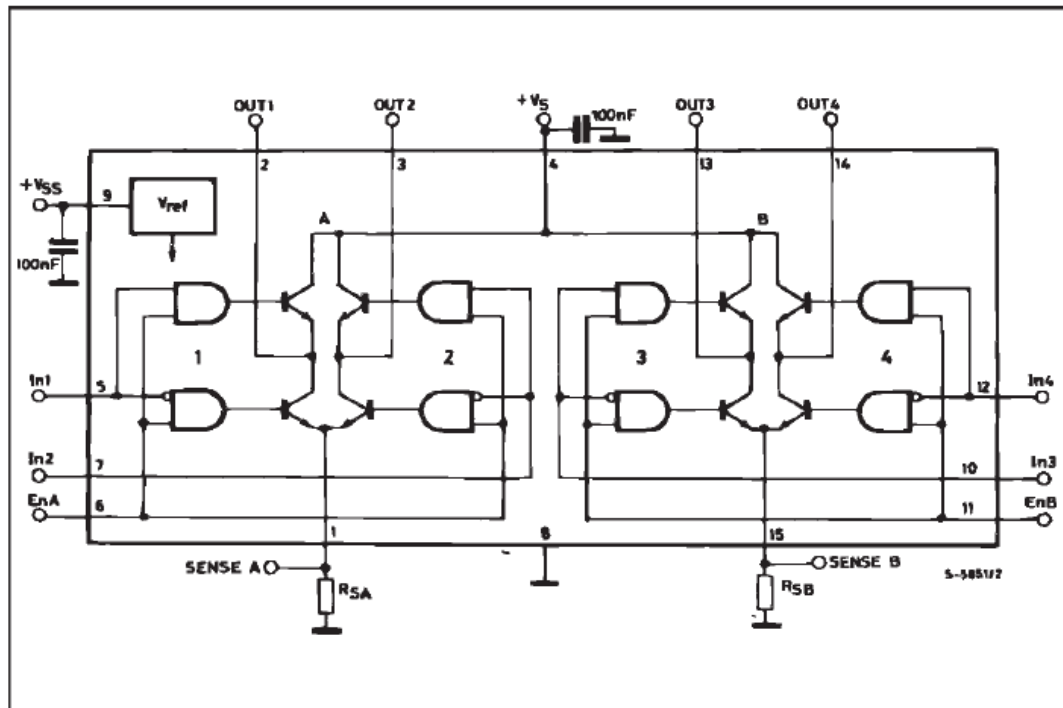
DESCRIPTION

The L298 is an integrated monolithic circuit in a 15-lead Multiwatt and PowerSO20 packages. It is a high voltage, high current dual full-bridge driver designed to accept standard TTL logic levels and drive inductive loads such as relays, solenoids, DC and stepping motors. Two enable inputs are provided to enable or disable the device independently of the input signals. The emitters of the lower transistors of each bridge are connected together and the corresponding external terminal can be used for the con-



nection of an external sensing resistor. An additional supply input is provided so that the logic works at a lower voltage.

BLOCK DIAGRAM

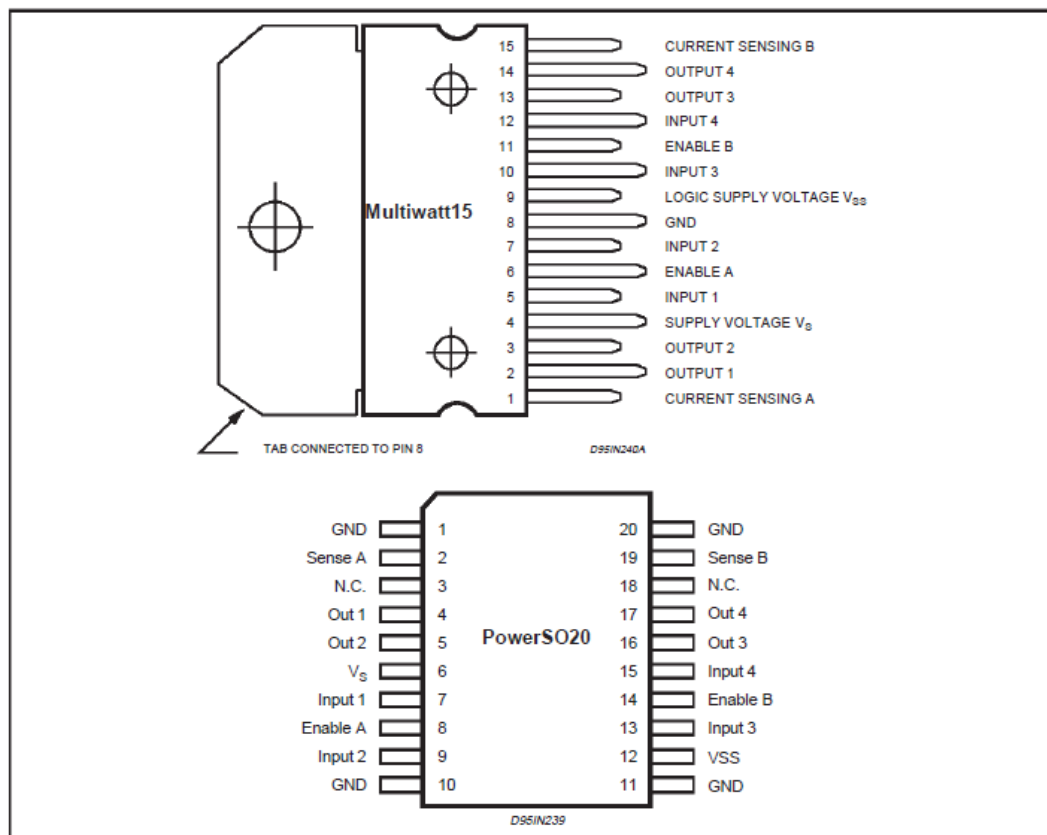


L298

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Symbol	Parameter	Value	Unit
V_S	Power Supply	50	V
V_{SS}	Logic Supply Voltage	7	V
V_i, V_{en}	Input and Enable Voltage	-0.3 to 7	V
I_O	Peak Output Current (each Channel)		
	- Non Repetitive ($t = 100\mu s$)	3	A
	- Repetitive (80% on -20% off; $t_{on} = 10ms$)	2.5	A
	-DC Operation	2	A
V_{sens}	Sensing Voltage	-1 to 2.3	V
P_{tot}	Total Power Dissipation ($T_{case} = 75^\circ C$)	25	W
T_{op}	Junction Operating Temperature	-25 to 130	$^\circ C$
T_{stg}, T_j	Storage and Junction Temperature	-40 to 150	$^\circ C$

PIN CONNECTIONS (top view)

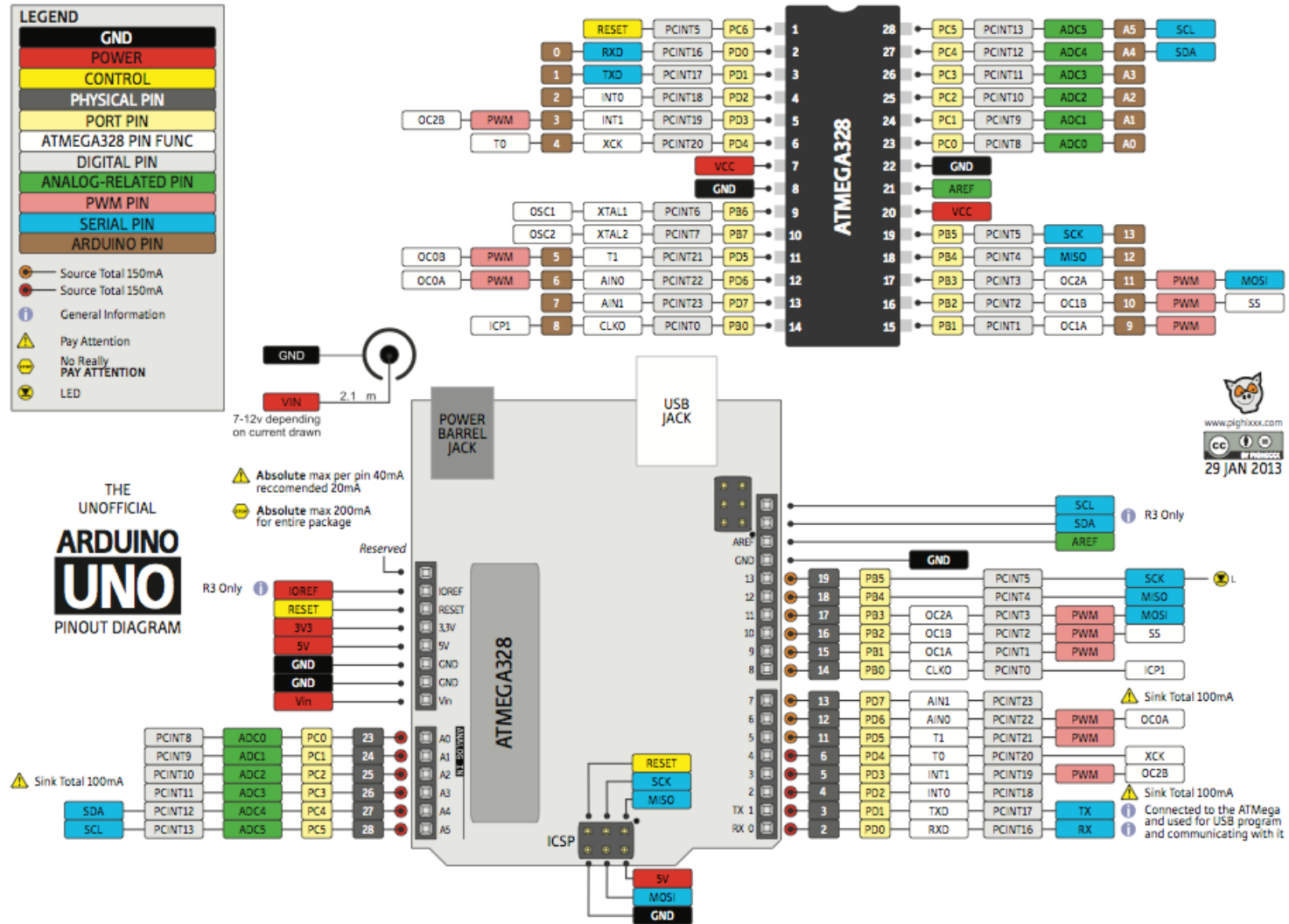


THERMAL DATA

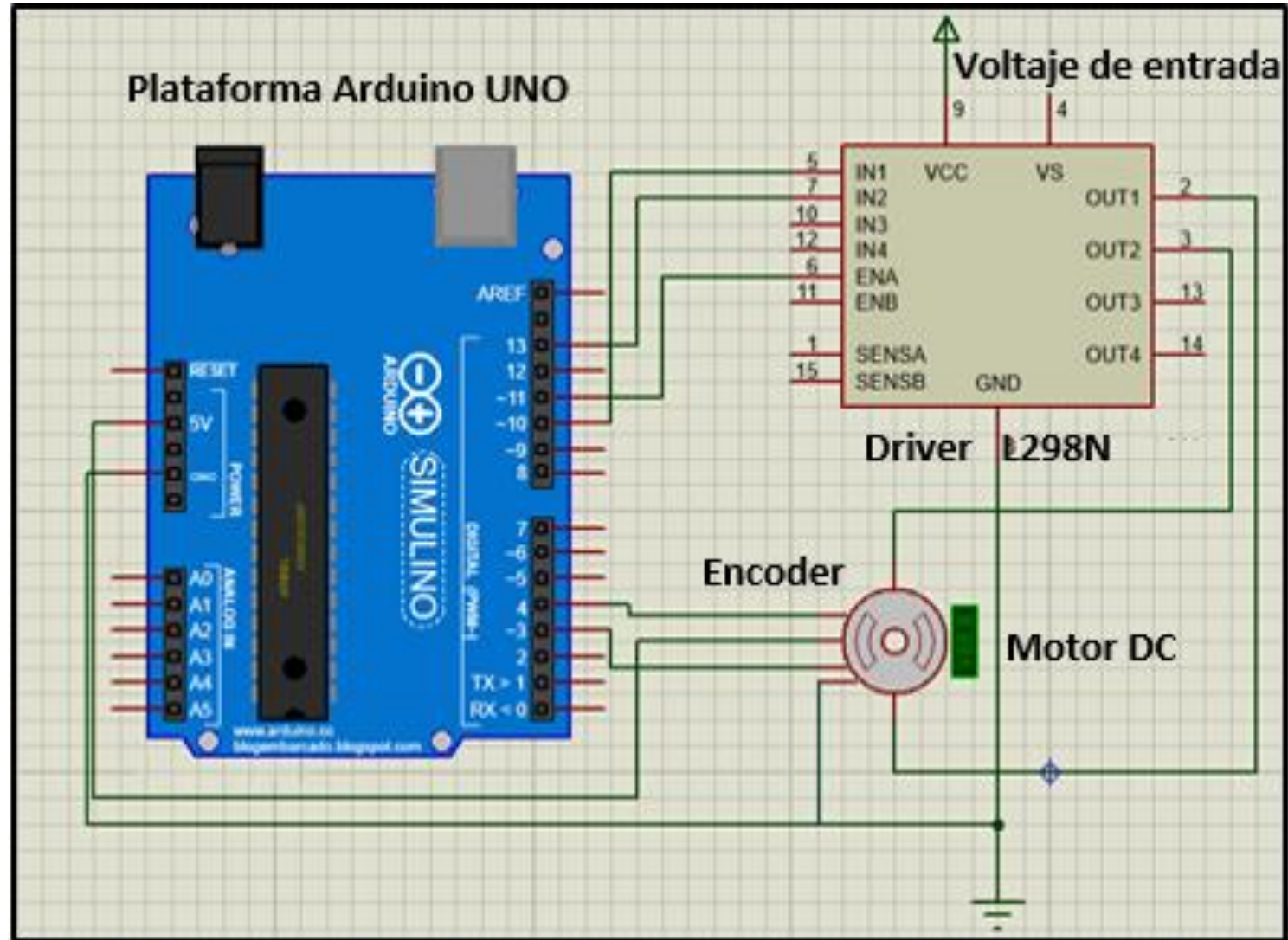
Symbol	Parameter		PowerSO20	Multiwatt15	Unit
$R_{th\ j-case}$	Thermal Resistance Junction-case	Max.	-	3	$^\circ C/W$
$R_{th\ j-amb}$	Thermal Resistance Junction-ambient	Max.	13 (*)	35	$^\circ C/W$

(*) Mounted on aluminum substrate

ANEXO E: HOJA DE DATOS DE ARDUINO UNO

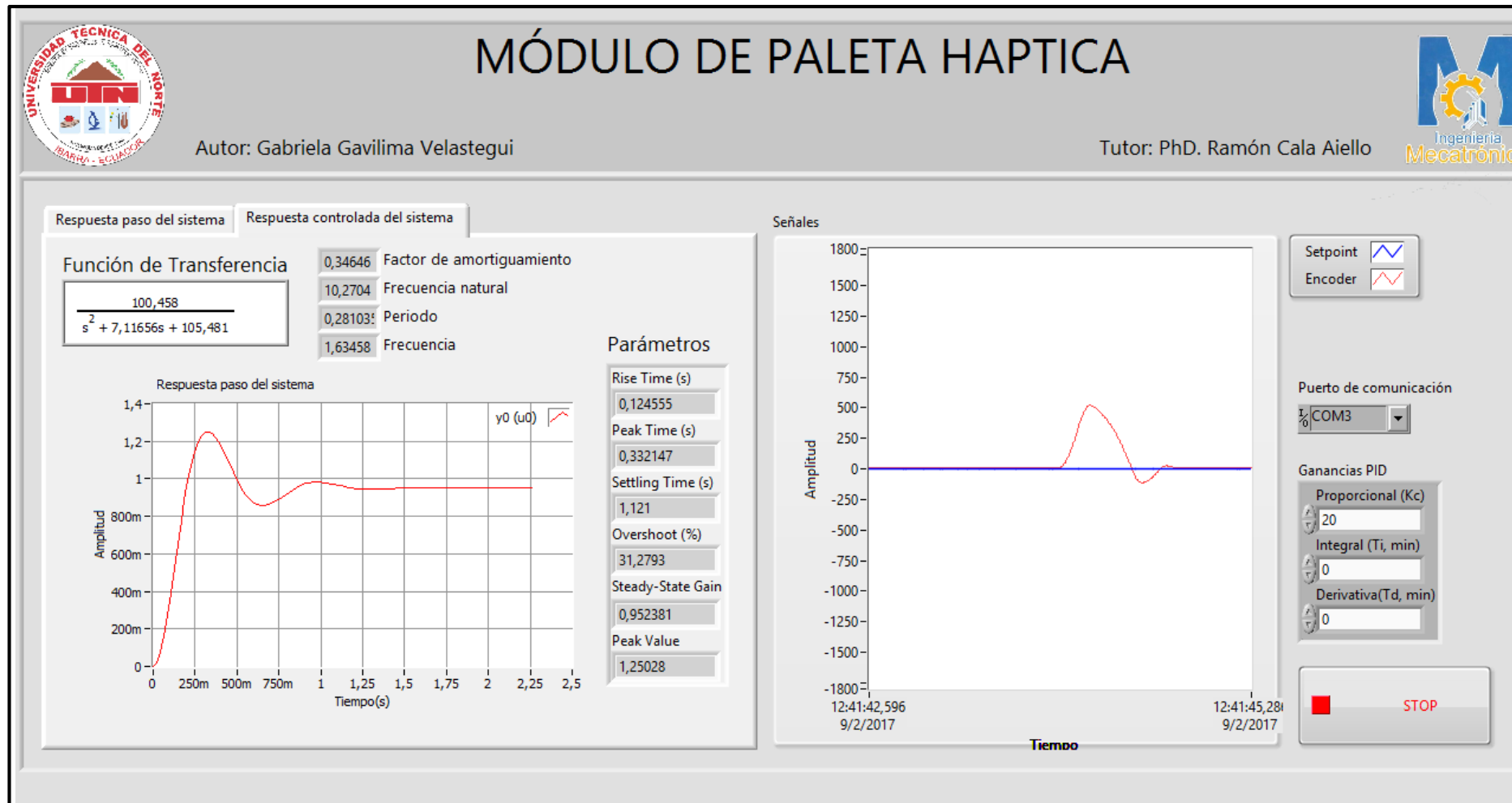


ANEXO F: DIAGRAMA ELECTRÓNICO

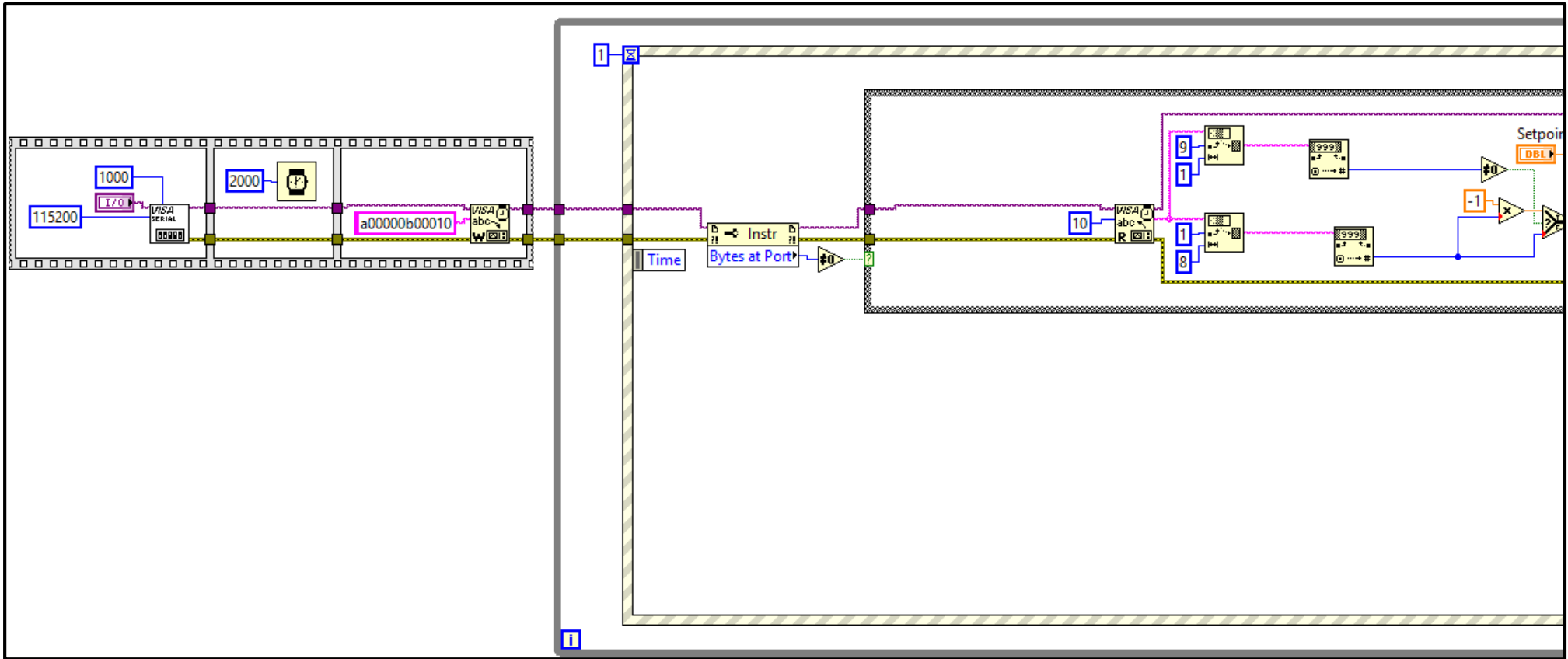


ANEXO G: INTERFAZ DE CONTROL LabVIEW/ARDUINO

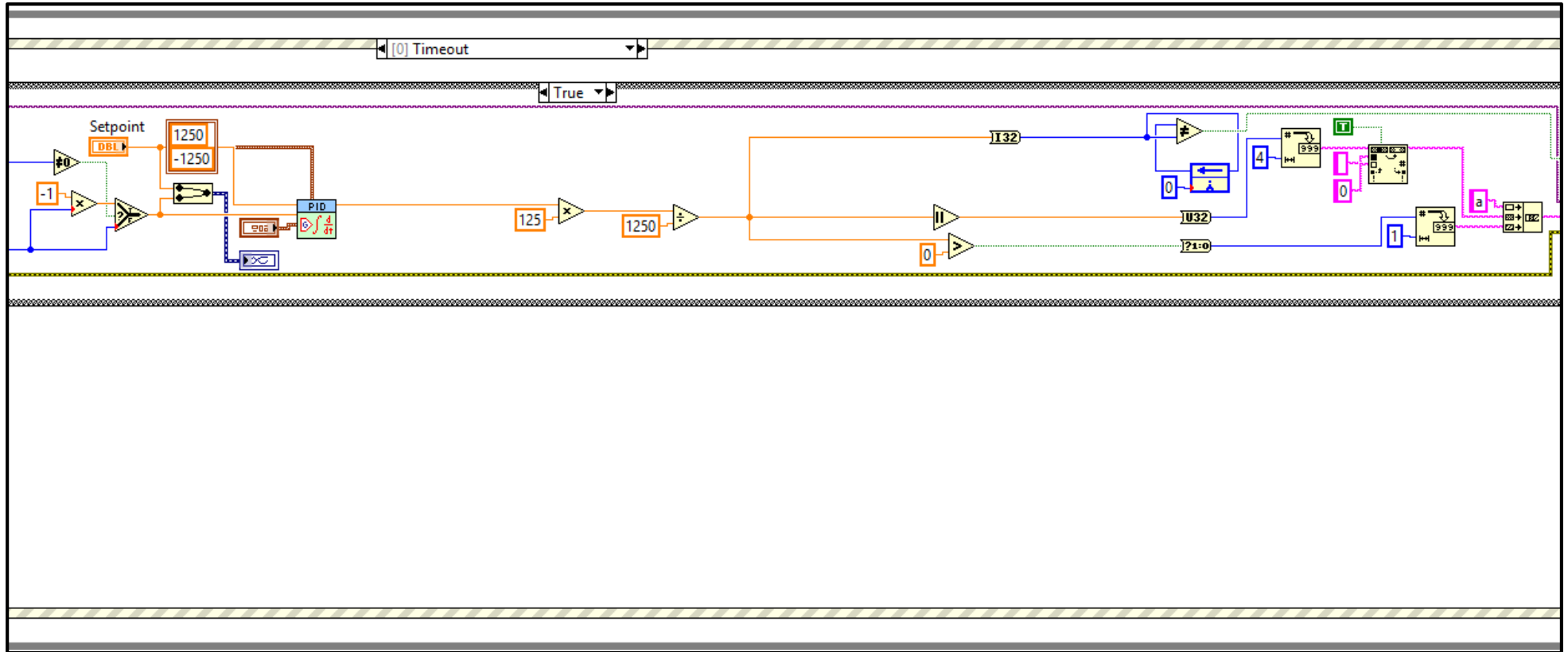
1. PANEL FRONTAL



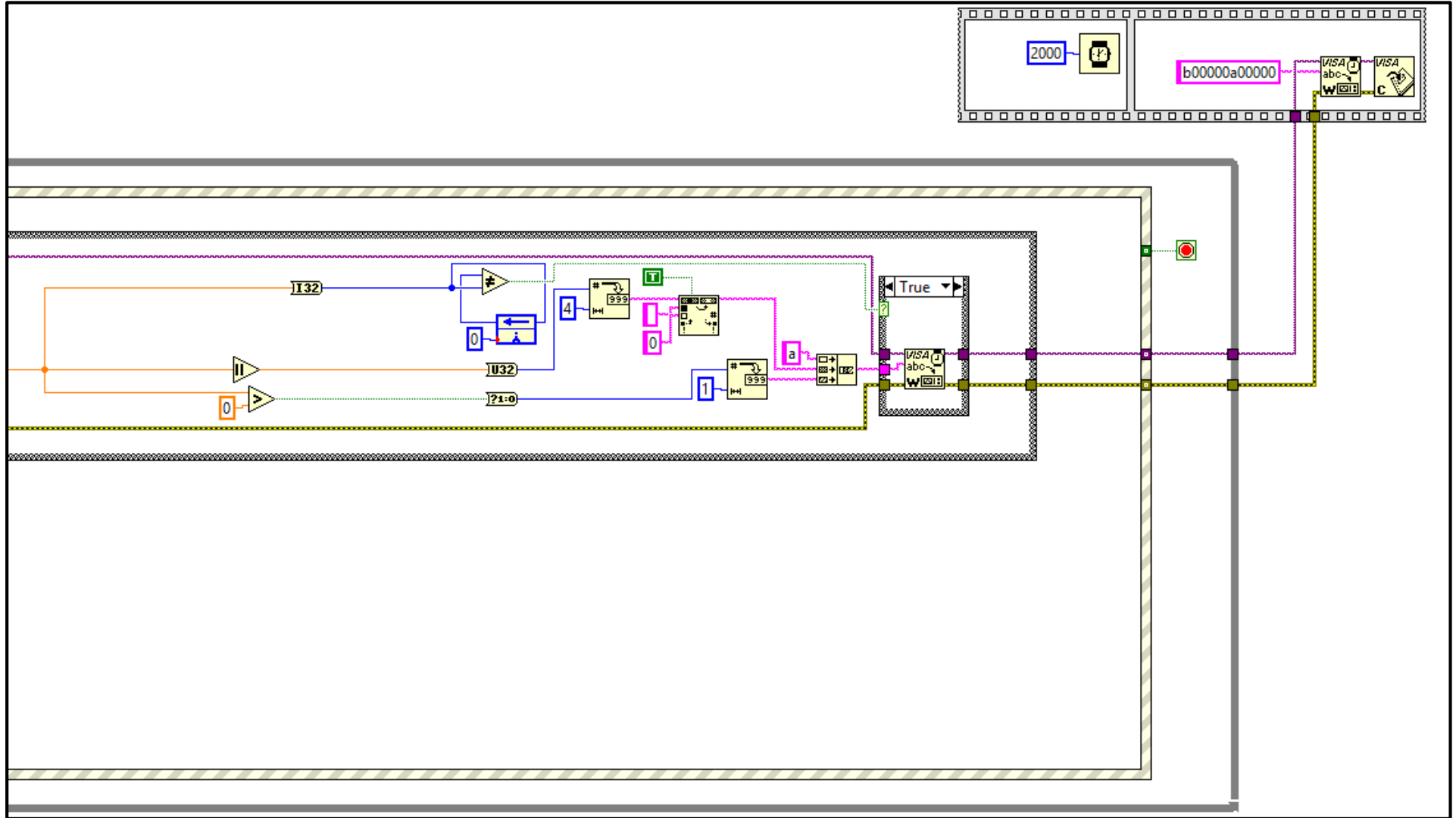
2. PANEL DE PROGRAMACIÓN



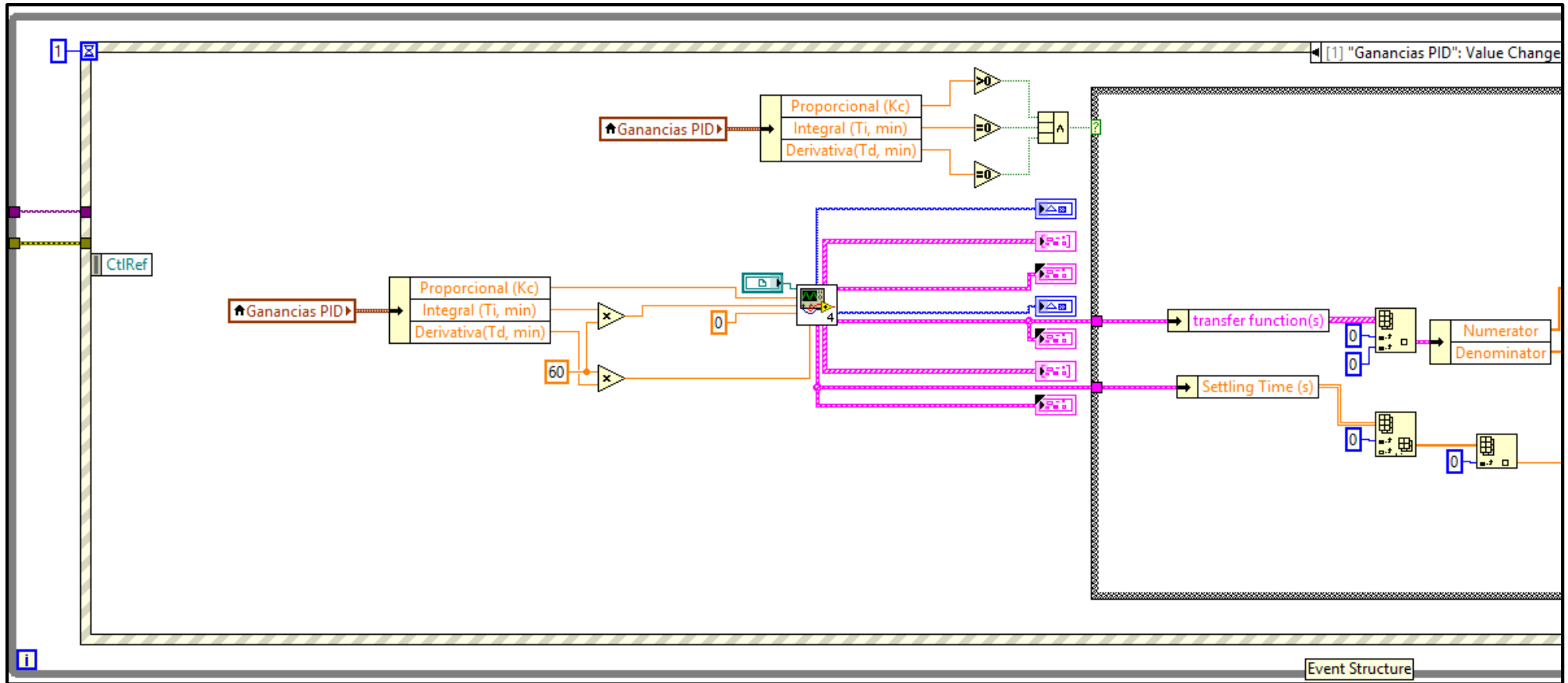
2. PANEL DE PROGRAMACIÓN



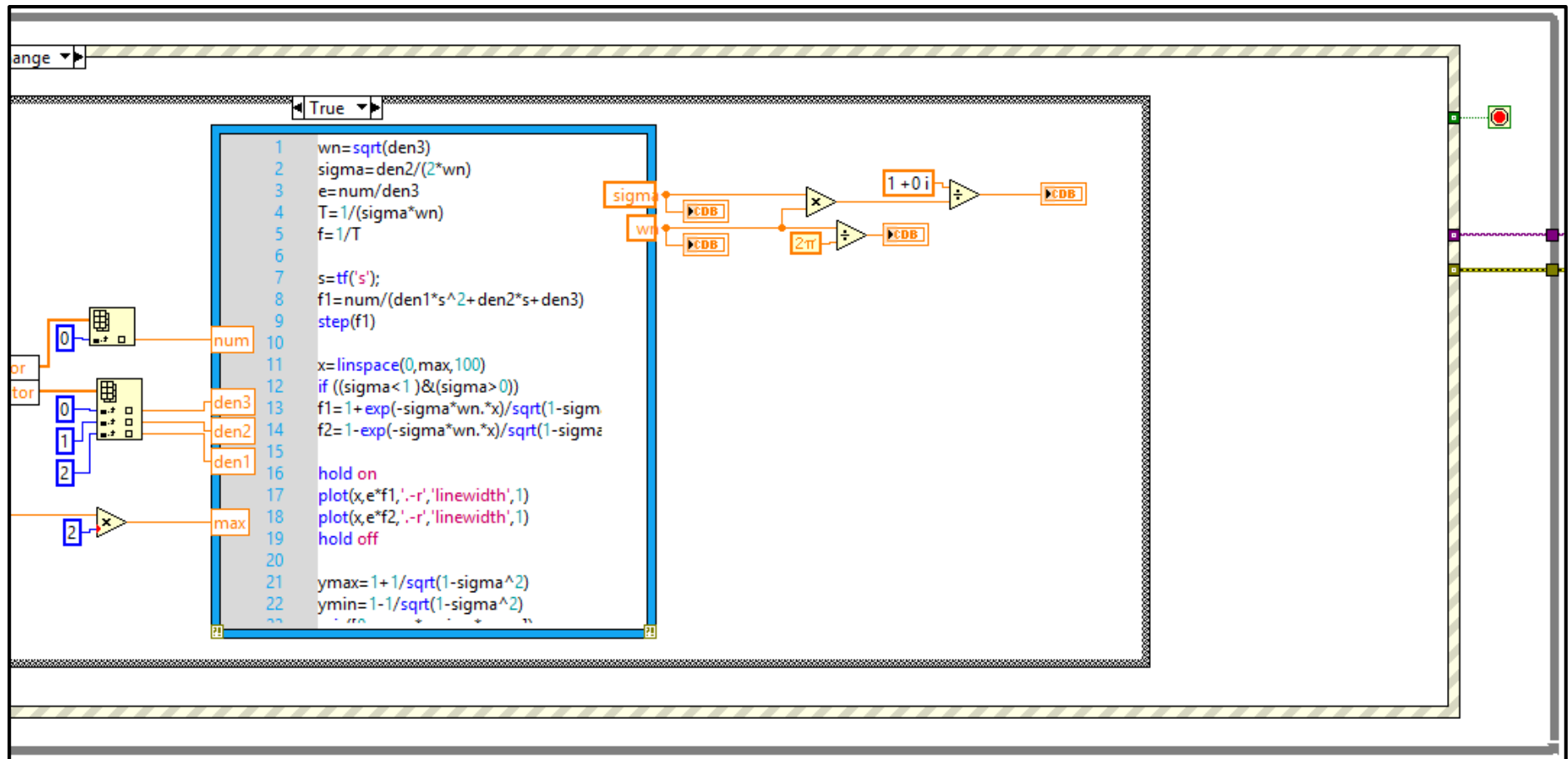
2. PANEL DE PROGRAMACIÓN



3. PANEL DE PROGRAMACIÓN PID



3. PANEL DE PROGRAMACIÓN PID



ANEXO H: PROGRAMACIÓN ARDUINO

```
int motorPin = 11;
```

```
int dirPin = 13;
```

```
int dirPin1 = 10;
```

```
int encPin1 = 2;
```

```
int encPin2 = 3;
```

```
volatile int pin1state;
```

```
volatile int pin2state;
```

```
volatile long encCount = 0;
```

```
boolean stringComplete = false;
```

```
char v[6];
```

```
char v1[6];
```

```
int i = 0;
```

```
int cont = 0, cont_aux = 0;
```

```
boolean flag = 0;
```

```
int habilitar = 0;
```

```
volatile char REGVALS;
```

```
int incomingByte = 0;

byte aux;

float supply_voltage = 5.0f;

float control_effort = 0.f;

float serial_input = 0;

unsigned long time;

unsigned long time_last_sent;

float time_f, last_time_f;

int valor = 0;

long temp_encCount;

void pin1Change();

void pin2Change();

void setup()

{

    Serial.begin(115200);

    pinMode(encPin1, INPUT);

    pinMode(encPin2, INPUT);
```

```
pinMode(motorPin, OUTPUT);

TCCR2B = TCCR2B & 0b11111000 | 0x01;

pinMode(dirPin, OUTPUT);

pinMode(dirPin1, OUTPUT);

analogWrite(motorPin, 0);

attachInterrupt(0, pin1Change, CHANGE);

attachInterrupt(1, pin2Change, CHANGE);

pin1state = digitalRead(encPin1);

pin2state = digitalRead(encPin2);

last_time_f = float(micros());

time_f = float(micros());

}

void loop()

{

  delay(5);

  temp_encCount = encCount;

  if (habilitar)

  {
```

```
char buff[10];

sprintf(buff, "%08lu", abs(temp_encCount));

Serial.print("a");

Serial.print(buff);

if (temp_encCount > 0)

    Serial.print("1");

else

    Serial.print("0");

}

else

{

    digitalWrite(dirPin, 1);

    digitalWrite(dirPin1, 1);

    analogWrite(motorPin, 0);

}

if (stringComplete)

{

    stringComplete = false;
```

```
valor = 0;

for (int j = 1; j < 5; j++)

    valor = valor * 10 + v1[j] - 48;

switch (v1[0])

{

    case 'a':

        if (habilitar)

            {

                analogWrite(motorPin, valor);

                //Serial.print(valor);

                if (v1[5] == 49)

                    {

                        digitalWrite(dirPin, 1);

                        digitalWrite(dirPin1, 0);

                    }

                else

                    {

                        digitalWrite(dirPin, 0);
```

```
        digitalWrite(dirPin1, 1);

    }

}

else

{

    digitalWrite(dirPin, 1);

    digitalWrite(dirPin1, 1);

    analogWrite(motorPin, 0);

}

break;

case 'b':

    habilitar = valor;

    break;

}

}

}

void pin1Change() {

    REGVALS = PIND;
```

```
pin1state = REGVALS & B00000100;
```

```
pin2state = REGVALS & B00001000;
```

```
if (pin1state == B00000100) {
```

```
    if (pin2state == B00000000) {
```

```
        encCount++;
```

```
    }
```

```
    else {
```

```
        encCount--;
```

```
    }
```

```
}
```

```
else {
```

```
    if (pin2state == B00001000) {
```

```
        encCount++;
```

```
    }
```

```
    else {
```

```
        encCount--;
```

```
    }
```

```
}
```



```
}  
  
void pin2Change() {  
  
    REGVALS = PIND;  
  
    pin1state = REGVALS & B00000100;  
  
    pin2state = REGVALS & B00001000;  
  
    if (pin1state == B00000100) {  
  
        if (pin2state != B00000000) {  
  
            encCount++;  
  
        }  
  
        else {  
  
            encCount--;  
  
        }  
  
    }  
  
    else {  
  
        if (pin2state != B00001000) {  
  
            encCount++;  
  
        }  
  
        else {
```

```
    encCount--;  
  
    }  
  
    }  
  
    }  
  
void serialEvent()  
  
{  
  
    while (Serial.available())  
  
    {  
  
        v[i] = (char)Serial.read();  
  
        i++;  
  
        if (i == 6)  
  
        {  
  
            for (int k = 0; k < 6; k++)  
  
                v1[k] = v[k];  
  
            stringComplete = true;  
  
            i = 0;  
  
        }  
  
    }  
  
}}
```