

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Ingeniería en Electrónica



**Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de Ingeniería en Electrónica
con el Grado Académico de Licenciatura**

Componentes Intel, Innovation Lab Costa Rica

**“Diseño de un prototipo de sistema de control automatizado para una silla de ruedas
orientado al transporte autónomo de personas con cuadriplejia o parálisis cerebral”.**

José Roberto Calvo Monge.

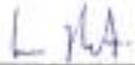
Cartago Noviembre, 2018

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
PROYECTO DE GRADUACIÓN
ACTA DE APROBACIÓN

Defensa de Proyecto de Graduación
Requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica
Grado Académico de Licenciatura
Instituto Tecnológico de Costa Rica

El Tribunal Evaluador aprueba la defensa del proyecto de graduación denominado "Diseño de un prototipo de sistema de control automatizado para una silla de ruedas, orientado al transporte autónomo de personas con cuadriplejía o parálisis cerebral", realizado por el señor Jose Roberto Calvo Monge y, hace constar que cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Miembros del Tribunal Evaluador



Ing. Leonardo Rivas Arce

Profesor lector



Ing. Juan José Montero Rodríguez

Profesor lector



Ing. Hugo Sánchez Ortiz

Profesor asesor

Cartago, 29 de noviembre, 2018

DECLARATORIA DE AUTENTICIDAD

Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado, en su totalidad, por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado material bibliográfico, he procedido a indicar las fuentes mediante citas.

En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.

Heredia, noviembre 2018.



José Roberto Calvo Monge
Cédula: 3-0477-0697

RESUMEN

El presente documento detalla el diseño e implementación de un prototipo de control automático para una silla de ruedas, orientado al transporte autónomo de pacientes de parálisis cerebral y cuadriplejía. Esta es una idea promovida por el laboratorio *Innovation Lab* de *Componentes Intel Costa Rica*; en su búsqueda de desarrollo de tecnología e innovación al incursionar en diferentes campos en los que la empresa se especializa y más importante, que la visión del laboratorio tenga un carácter de compromiso social y mejora continua de la calidad de vida del usuario. La finalidad del proyecto es crear un sistema de control automatizado de velocidad de los motores de la silla de ruedas mediante comandos o patrones sonoros. La selección de este tipo de entrada de control como lo es la voz o sonidos se debe a que las personas con este tipo de padecimiento sufren afectaciones en la mayor parte de la motora del cuerpo, pero conservan la voz, de modo que ellos mismos pueden controlar su movilización por medio esta facultad.

Debido a condiciones especiales dadas en el laboratorio, la implementación en escala real del subsistema se dejó planteada en un modelo de selección, por lo que se procedió a ejecutar la propuesta de este modelo en pequeña escala. El abordaje del proyecto se llevó a cabo mediante la división del sistema total en subsistemas como lo son: subsistema de motores eléctricos, subsistema de patrones sonoros y el encargado de la integración de los subsistemas anteriores, el subsistema de control; cada uno reflejado como un capítulo de este informe.

Palabras clave: Motor, torque, velocidad, patrón, frecuencia, espectro, PID, control

ABSTRACT

This document details the design and implementation of a prototype of automatic control for a wheelchair, oriented to the autonomous transport of patients with cerebral palsy and quadriplegia. This is an idea promoted by the Laboratory Innovation Lab of Intel Costa Rica Components; in its search for technology and innovation development, entering into different fields from those that the company specializes and more important, that have a character of social commitment and continuous improvement of the quality of life of the user. The purpose of the project is to create an automated speed control system for wheelchair motors by commands or sound patterns. The selection of this type of control input as it is the voice or sounds is due to the fact that people with the aforementioned type of disease, although in a general level the involvement of the motor of the body occurs, the voice is a factor that is not affected in its totality or partially, therefore, it is a way for them to control their mobilization through this faculty.

Due to special conditions given in the laboratory, the real-scale implementation of the subsystem was left in a selection model, so the implementation of this model was carried out on a small scale. The approach of the project was visualized by means of the division of the total system into subsystems such as: subsystem of electric motors, subsystem of sound patterns and the system in charge of the integration of the previous subsystems, the control subsystem; each one reflected as a chapter of this report.

Keywords: Motor, torque, velocity, patron, frequency, spectrum, PID, control

DEDICATORIA

El presente proyecto de graduación va dedicado primeramente a Dios, a mi madre Susana Monge Abarca, mi padre Roberto Calvo Mora, mi tío Keylor Naranjo Díaz y mi tía Evelyn Monge Abarca.

AGRADECIMIENTOS

Le doy gracias a Dios, ya que sin EL nada de esto sería posible, seguido de mi madre Susana Monge Abarca, mi padre Roberto Calvo Mora, mi tío Keylor Naranjo Díaz y mi tía Evelyn Monge Abarca. Todos ellos por ser los pilares, ejemplos y guías fundamentales en este camino de estudio, sacrificio, esfuerzo, perseverancia, logros y fracasos; donde cada uno fue una enseñanza para seguir adelante y lograr esta gran meta en mi vida.

Agradezco a mi abuela Olga Abarca Valverde, a mi abuelo Alexis Monge Madrigal, a la familia Monge Abarca, Marvin Calvo Mora y Kimberly Mora Abarca, por acompañarme y brindar su ayuda, cariño y entendimiento cuando lo necesité en todos estos años de estudio y trabajo. Son otro gran ejemplo de superación y esfuerzo para mí.

Quiero agradecer a mi profesor asesor Hugo Sánchez Ortiz y a los lectores Leonardo Rivas Arce y Juan José Montero Rodríguez, por colaborar en la parte técnica y ser un gran equipo en todo este trayecto, a pesar de las adversidades y contratiempos a los que me tuve que enfrentar. A mis amigos y compañeros que estuvieron cerca de mí en este camino de universidad. También mencionar a Diego Calvo Altamirano y Miguel Rodríguez Carballo por sus correspondientes aportes y ayuda en la parte gráfica e implementación de este proyecto.

Gracias mi padre y madre ya que por ustedes soy lo que soy, he obtenido y logrado lo que me he propuesto, es un logro no solo mío sino nuestro, ya que es un orgullo ser hijo de personas como ustedes. Para mi tío y mi tía; ustedes evidencian que el cariño y el amor va más allá de la distancia o las relaciones de sangre, ya que estos factores no han sido impedimento para dar todo su apoyo y para ser mis otros ejemplos. A todos (as) gracias y esto es por y para ustedes.

“Tener nuevas ideas es como subir las alturas vertiginosas: al principio te causan incomodidad y estás ansioso por descender, desconfiando de tus propios poderes; pero pronto la lejanía de la agitación de la vida y la influencia inspiradora de la altitud calman tu sangre; tu paso se vuelve firme y seguro y comienzas a buscar alturas vertiginosas.”

Nikola Tesla

ÍNDICE GENERAL

DECLARATORIA DE AUTENTICIDAD	2
RESUMEN.....	4
ABSTRACT.....	5
DEDICATORIA	6
AGRADECIMIENTOS	7
ÍNDICE GENERAL	9
ÍNDICE DE TABLAS	11
ÍNDICE DE FIGURAS.....	12
CAPÍTULO 1.....	15
1.1 Entorno del proyecto.....	15
1.2 Aspectos considerados en la ejecución del proyecto	17
CAPÍTULO 2 SUBSISTEMA DE MOTORES ELÉCTRICOS.....	21
2.1 Introducción	21
2.2 Diseño	24
Análisis de escenarios para la determinación de parámetros del subsistema.....	27
Selección de los motores acorde a los parámetros obtenidos	33
2.2 Implementación.....	35
2.3 Pruebas.....	38
CAPÍTULO 3 SUBSISTEMA DE PATRONES SONOROS.....	39
3.1 Introducción	39
3.2 Implementación.....	41
3.3 Pruebas.....	44

CAPÍTULO 4 SUBSISTEMA DE CONTROL.....	50
4.1 Introducción	50
4.2 Diseño	53
Modelado analítico	53
Modelado empírico	58
4.3 Implementación	65
4.4 Pruebas	70
CAPÍTULO 5.....	72
5.1 Análisis de resultados	72
CAPÍTULO 6.....	75
6.1 Conclusiones	75
6.2 Recomendaciones	77
CAPÍTULO 7.....	78
7.1 Bibliografía y referencias	78
APÉNDICE.....	82
Apéndice 1: Materiales utilizados en el proceso constructivo de la silla de ruedas prototipo en pequeña escala	82
Apéndice 2: Código utilizado en el microcontrolador para el módulo de reconocimiento de voz	83
Apéndice 3: Interfaz gráfica y resultados del módulo de pruebas segmentadas del subsistema de patrones sonoros	90
Apéndice 4: Código utilizado en el microcontrolador la captación de la velocidad angular y control PID	99
Apéndice 5: Código final del control PID del subsistema de motores eléctricos mediante el subsistema de patrones sonoros	106
ANEXOS: Anexo 1: Hojas de datos de los motores	117

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Requerimientos de diseño prototipo de control de la silla de ruedas a escala real.....	19
Tabla 2	Requerimientos de diseño prototipo de control de la silla de ruedas a pequeña escala ...	20
Tabla 3	Coefficientes de rozamiento cinéticos y estáticos para distintos materiales [6].....	23
Tabla 4	Resultados de pruebas del subsistema de motores eléctricos con un valor de tensión de 12 V.....	38
Tabla 5	Resultados de pruebas del subsistema de motores eléctricos con un valor de tensión de 6 V.....	38
Tabla 6	Nivel de salida en los pines A y B del Arduino acorde al reconocimiento de cada patrón dado por el módulo de reconocimiento V3	45
Tabla 7	Resultados del módulo de pruebas segmentadas del subsistema de patrones sonoros.....	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Silla de ruedas prototipo presente en el <i>Innovation Lab</i>	16
Figura 2. Grado de pendiente acorde a su longitud [7]	25
Figura 3. Esquema para análisis de cuerpo libre para desplazamiento horizontal	27
Figura 4. Esquema para análisis de cuerpo libre para desplazamiento en pendiente ascendente .	28
Figura 5. Esquema para análisis de cuerpo libre para desplazamiento en pendiente descendiente	30
Figura 6. Motor seleccionado para el prototipo a escala real de la silla de ruedas [8].....	34
Figura 7. Motor seleccionado para el prototipo a pequeña escala de la silla de ruedas [9]	35
Figura 8. Prototipo final de silla de ruedas en pequeña escala.....	36
Figura 9. Acople del subsistema de motores eléctricos a la silla de ruedas prototipo en pequeña escala.....	37
Figura 10. Clasificación de tonos acorde al ancho de banda del espectro audible [11].	40
Figura 11. Módulo <i>Voice Recognition Module V3</i> [13].....	43
Figura 12. Microcontrolador utilizado <i>Arduino modelo UNO</i> [14]	44
Figura 13. Módulo de adquisición de datos <i>MyDaq de National Instruments</i> [15]	46
Figura 14. Hardware utilizado en las pruebas del subsistema de patrones sonoros	46
Figura 15. Gráfica de las pruebas acorde a sus respectivas frecuencias en un rango de 0 a 800 Hz.	48
Figura 16. Gráfica de las pruebas acorde a sus respectivas frecuencias en un rango de 0 a 4000 Hz.	49
Figura 17. Diagrama de bloques control del sistema [17].....	52
Figura 18. Esquema de un motor D.C con acople directo de carga [18].....	53
Figura 19. Esquema de comportamiento ideal del prototipo de control	59
Figura 20. Módulo de control de velocidad para motores <i>DC PWM 1203B 3A</i> [19]	60
Figura 21. Sistema necesario para la obtención del modelado empírico	61
Figura 22. Creación del objeto Motor 1 orientado a la descripción del sistema en el software Matlab	62
Figura 23. Gráfica de los datos de velocidad y entrada del Motor 1 en el software Matlab	62
Figura 24. Resultados de distintos modelos de aproximaciones para el objeto Motor 1	63
Figura 25. Gráfica de los datos de velocidad y entrada del Motor 2 en el software Matlab	64

Figura 26. Sintonización de parámetros PID de la planta obtenida en la figura 23 mediante la acción del controlador del motor 1.....	65
Figura 27. Parámetros obtenidos mediante la sintonización del controlador PID en el motor 1 ..	66
Figura 28. Sintonización de parámetros PID de la planta obtenida en la figura 25 mediante la acción del controlador del motor 2.....	66
Figura 29. Parámetros obtenidos mediante la sintonización del controlador PID en el motor 2 ..	67
Figura 30. Driver control de motores L298	68
Figura 31. Prototipo de control automático dado para una silla de ruedas en pequeña escala.....	69
Figura 32. Salida de control de los motores PWM para una configuración de 600 RPM	70
Figura 33. Salida de control de los motores PWM para una configuración de 1000 RPM	70
Figura 34. Resultados de la acción de control del prototipo frente a cuatro perturbaciones.....	71
Figura 35. Resultados de la acción de control del prototipo frente a perturbaciones frente a tres perturbaciones	71
Figura 36. Interfaz gráfica del módulo de pruebas segmentadas para el subsistema de patrones sonoros	90
Figura 37. Bloque de código funcional para el módulo de pruebas segmentadas subsistema de patrones sonoros.....	91
Figura 38. Resultados del módulo de pruebas segmentadas, patrón “adelante” bajo la condición uno.....	96
Figura 39. Resultados del módulo de pruebas segmentadas, patrón “adelante” bajo la condición dos.	97
Figura 40. Resultados del módulo de pruebas segmentadas, patrón “atrás” bajo la condición uno.	97
Figura 41. Resultados del módulo de pruebas segmentadas, patrón “atrás” bajo la condición dos.	98
Figura 42. Resultados del módulo de pruebas segmentadas, patrón “pare” bajo la condición uno.	98
Figura 43. Resultados del módulo de pruebas segmentadas, patrón “pare” bajo la condición dos.	99
Figura 44. Tabla de datos del motor seleccionado para el prototipo a pequeña escala de la silla de ruedas [8].....	117
Figura 45. Lista de pines del motor seleccionado para el prototipo a pequeña escala de la silla de ruedas [8].....	118
Figura 46. Tabla de datos del motor seleccionado para el prototipo a escala real de la silla de ruedas [9].....	119

Figura 47. Dimensiones del motor seleccionado para el prototipo a escala real de la silla de
ruedas [9].....120

CAPÍTULO 1

1.1 Entorno del proyecto

A lo largo de la historia y en la actualidad, han existido diversas enfermedades y padecimientos que afectan a los seres humanos en su calidad y continuación de vida. Una de estas enfermedades es la parálisis cerebral, descrita como un grupo de trastornos del desarrollo del movimiento y de la postura, que causan limitación en la actividad y son atribuidos a alteraciones no progresivas que ocurren en el cerebro. El trastorno motor se acompaña con frecuencia de alteraciones de la sensibilidad, cognición, comunicación, percepción y comportamiento [1].

Una de las características de este padecimiento es la insuficiencia de la motora por parte del paciente, semejante a las situaciones de discapacidad cuadripléjica (sin funcionamiento de la parte motora superior e inferior del cuerpo) y trastornos degenerativos. La correlación de estas enfermedades citadas radica en que los pacientes no tienen la capacidad individual para poder desplazarse por sí mismos.

Como parte del compromiso social y siguiendo la línea del tema de la innovación tecnológica, *Componentes Intel Costa Rica* ha creado el laboratorio *Innovation Lab* con el fin de desarrollar proyectos conjuntos con representantes del área (colegios, estudiantes, empresas pequeñas, grandes, universidades), cuyo gran objetivo es la investigación en el área de innovación y creación de mejoras a distintos problemas existentes, orientado al desarrollo de un proyecto para establecer una solución como prototipo final, además de ver la rentabilidad de la innovación a nivel comercial para la empresa.

Por ende, el *Innovation Lab* ha mostrado su interés en desarrollar un dispositivo mediante el cual ayude a estas personas con estos padecimientos en su traslado de forma autónoma, a pesar de que no cure las enfermedades de cuadriplejía, parálisis cerebral y trastornos degenerativos).

Para desarrollar un prototipo funcional, el laboratorio realizó la compra de una silla de ruedas manual convencional, la cual es el mecanismo de desplazamiento más básico y general de este tipo de personas con limitaciones físicas, por lo cual se quiere proceder con la transformación de esta silla de ruedas manual en un prototipo de transporte autónomo.

Como un primer paso en la ejecución de la idea, personal del laboratorio hizo la sustitución de las dos ruedas laterales de veinte pulgadas (50 cm) de la silla de ruedas original por cuatro ruedas de seis pulgadas de diámetro (0,16 m y radio 0,08 m) conectadas a cuatro servomotores de 12 V\3.35 A (ver Figura 1). Estas ruedas y servomotores proceden de un proyecto anteriormente ejecutado que constaba de un pequeño robot casero que se trasladaba. El fin de este cambio fue ir dando forma a la idea que se quiere desarrollar ya que el control en las dos ruedas originales de la silla es meramente de forma manual mediante la acción de las extremidades de la persona, acción que el usuario final en este caso no puede ejecutar por su tipo de padecimiento.

En el estado inicial de este proyecto, se realizó un análisis de la hoja de datos de los servomotores, donde se determinó que estos son incapaces de proveer el movimiento de la silla presente en la figura 1. La potencia de los servomotores existentes se considera insuficiente por su baja capacidad de torque y revoluciones por minuto.



Figura 1. Silla de ruedas prototipo presente en el *Innovation Lab*

El objetivo principal de este proyecto es implementar un control automático del set de motores mediante patrones sonoros que van a reflejar el desplazamiento de la silla de ruedas prototipo bajo distintos escenarios y condiciones. Para lograr este objetivo se debe dimensionar los distintos parámetros que permitan la selección del set de ~~motores con~~ la capacidad de proporcionar el desplazamiento del prototipo. Con la selección de los motores eléctricos se procede a implementar un sistema de adquisición y envío de patrones sonoros, cuya función es la de utilizar una facultad íntegra del paciente para controlar la acción de los motores. El control se relacionará con la velocidad que proporcionan los motores donde se necesita integrar los elementos mencionados en un microcontrolador para establecer un control automático en lazo cerrado.

1.2 Aspectos considerados en la ejecución del proyecto

Para el abordaje en el desarrollo e implementación del prototipo, se consideró la división del sistema final en tres subsistemas correspondientes a:

- a. Subsistema de motores eléctricos.
- b. Subsistema de patrones sonoros.
- c. Subsistema de control.

Cada uno de los anteriores subsistemas corresponde a un capítulo en el presente informe, los cuales abordan su conveniente base teórica, etapa de diseño, implementación-caracterización y pruebas. Debido a un cambio en la temática y orientación dada en el laboratorio *Innovation Lab* en la proyección de sus recursos económicos, se decidió realizar un modelo para la caracterización del prototipo de control para la silla de ruedas automatizada. Posterior al desarrollo del modelo, se realizó la implementación de un prototipo a pequeña escala, en lugar de implementar el diseño en una silla de ruedas de tamaño real.

Debido a las diferencias constructivas entre el prototipo en pequeña y gran escala de la silla de ruedas, se decidió establecer dos tablas de variables o requerimientos, cuya finalidad es ser la guía para el cumplimiento de los objetivos planteados. La tabla número 1 de requerimientos está relacionada al diseño del prototipo de control final en escala real de la silla de ruedas indexando los tres subsistemas.

La tabla número 2 de requerimientos está orientada al diseño e implementación de los tres subsistemas en un prototipo en pequeña escala. Las tablas mencionadas se muestran a continuación:

Tabla 1. Requerimientos de diseño prototipo de control de la silla de ruedas a escala real

<u>Variable</u>	<u>Unidad</u>	<u>Descripción</u>
Velocidad	km/h	El subsistema de motores debe proveer una velocidad constante de al menos entre 2,5-10 km/h (2-3 m/s).
Masa de transporte	kg	El set de motores debe ser capaz de soportar una carga de entre 60-140 kg.
Torque	N*m	El torque se establece en un rango de 30-50 N*m, considerando tres situaciones de desplazamiento (horizontal, ascenso de pendiente y descenso de pendiente) con la inclinación dada por la ley 7600.
Consumo de potencia	W	El sistema debe consumir un máximo de 400-500 W.
Frecuencia espectro audible	Hz	Subsistema de control mediante comando de voz dado dentro del rango del espectro audible (100 Hz-20KHz) en una gama normal de comunicación de 100 Hz a 4000 Hz.
Tiempo de estabilización de sistema de control	s	El tiempo de estabilización debe estar en un rango de 1 a 3 s.

Tabla 2. Requerimientos de diseño prototipo de control de la silla de ruedas a pequeña escala

<u>Variable</u>	<u>Unidad</u>	<u>Descripción</u>
Velocidad	km/h	El subsistema de motores debe proveer una velocidad constante de al menos entre 2,5-10 km/h (2-3 m/s).
Masa de transporte	kg	El set de motores debe ser capaz de soportar sin dañar los mismos, una carga de entre 1-3 kg.
Torque	N*m	El torque debe estar en un rango de 0,3-0,5 N*m, considerando tres situaciones de desplazamiento (horizontal, ascenso de pendiente y descenso de pendiente) con la inclinación dada por la ley 7600.
Consumo de potencia	W	El sistema debe consumir un máximo de 60-70 W.
Frecuencia espectro audible	Hz	Subsistema de control mediante comando de voz dado dentro del rango del espectro audible (100 Hz-20KHz) en una gama normal de comunicación de 100 Hz a 4000 Hz.
Tiempo de estabilización de sistema de control	s	El tiempo de estabilización debe de ser darse en un rango de 1 a 3 s.

CAPÍTULO 2. SUBSISTEMA DE MOTORES ELÉCTRICOS

2.1 Introducción

Todo medio de transporte necesita el análisis y aplicación de la dinámica, mecánica, aspectos de la física y otros factores en la parte constructiva para producir un movimiento de traslación en cualquier medio; por ende, fueron aspectos fundamentales a la hora de diseñar el subsistema presente. Debido a las limitaciones de los pacientes a nivel físico y mental, se necesitó de un mecanismo al cual se le pudiera agregar características de autonomía y buena funcionalidad. De esta forma y tomando como referencia el mercado actual en lo que respecta a la automatización de sillas de ruedas, se seleccionó el motor eléctrico para proveer el movimiento de rotación y traslación.

El motor eléctrico se define como una máquina que transforma dicha energía en energía mecánica. La acción se desarrolla introduciendo una corriente en la máquina por medio de una fuente externa, que interacciona con el campo magnético dado por sus bobinas de fase, produciendo el movimiento mecánico en un eje, es donde aparece entonces una fuerza electromotriz (FEM) inducida que se opone a la corriente, de ahí su nombre de fuerza contraelectromotriz [2].

De acuerdo con el análisis de las condiciones a las cuales tenía que someterse el tipo de motor por adquirir, se seleccionó el motor en corriente directa, el cual presenta las siguientes características [3]:

- Presentan un control preciso de la velocidad.
- Control de menor costo y abarca un rango mayor que los sistemas de control en CA.
- Apropriados cuando el sistema necesita un torque de arranque alto o alta capacidad de exceso de torque.

La principal función de los motores es el aprovechamiento de la energía mecánica producida, en este caso la transformación de la energía mecánica en rotacional para el desplazamiento de la silla. El término de carga (asociada a una masa con unidades expresadas en kilogramos-kg) relaciona la fuerza que hay que utilizar conjunto al desplazamiento requerido de la silla dando origen a otros parámetros. Uno de estos parámetros es el torque aplicado o par del motor, dado como la magnitud física que mide el momento de fuerza que se ha de aplicar a un eje que gira sobre sí mismo a una determinada velocidad, sus unidades son el Newton metro ($N \cdot m$) o también se puede expresar como kilogramo por centímetro ($kg \cdot cm$) [4].

Por lo tanto, si se le va a agregar una carga al eje, *el torque o par* neto necesario para generar su movimiento ya sea rotacional o traslacional, debe ser igual o menor al que pueda proveer el motor o subsistema. Considerando aspectos de la carga, al ser un sólido representa un volumen, una masa y peso asociado que según su geometría describe un momento de inercia, este concepto refleja la distribución de masa de un cuerpo o de un sistema de partículas en rotación, respecto a un eje de giro, visto también como el valor escalar del momento angular longitudinal de un sólido. El momento de inercia de un cuerpo depende de su forma, de la distribución de su masa y de la posición del eje de rotación [5].

Para el movimiento planteado de la silla, se involucra en primera instancia la fuerza causada por la acción del motor mediante el par, si el valor característico y las condiciones tienen la capacidad de causar la cinética del acople con la carga, provocará el movimiento relacionado a la rotación por ende a una velocidad angular (unidades de radianes por segundo- rad/s) y aceleración angular (unidades de radianes por segundo al cuadrado- rad/s^2) según sea el caso.

No hay que olvidar la relación del subsistema motor-carga y el ambiente o medio en donde se implementó, ya que dicha interacción de estos tres elementos representa factores por considerar, debido a que el medio no es ideal y los factores vienen orientados a fuerzas que intervienen en el subsistema y su movilización. Para relacionar el medio con el motor y carga en su movimiento mecánico de rotación, se encuentran las ruedas de la silla y la interacción del peso producto de la masa y gravedad.

La relación de las ruedas con el medio donde se va a desplazar el prototipo de la silla, incorporó fuerzas que se oponen al movimiento denominadas fuerzas de fricción o rozamiento y nuevamente son directamente dependientes de la masa y la acción de la cinética o estática del subsistema. La varianza se da en los valores de coeficientes de fricción que ofrecen un valor acorde al tipo de interacción de los distintos materiales relacionados con la carga, las ruedas y el medio. Se adjunta la siguiente tabla 3 con diferentes coeficientes de fricción cinético (μ_d) y estático (μ_e) para la combinación de distintos materiales en contacto:

Tabla 3 Coeficientes de rozamiento cinético y estático para distintos materiales [6]

Coeficientes de rozamiento de algunas sustancias		
Materiales en contacto	μ_e	μ_d
Articulaciones humanas	0,02	0,003
Acero // Hielo	0,03	0,02
Acero // Teflón	0,04	0,04
Teflón // Teflón	0,04	0,04
Hielo // Hielo	0,1	0,03
Esquí (encerado) // Nieve (0°C)	0,1	0,05
Acero // Acero	0,15	0,09
Vidrio // Madera	0,2	0,25
Caucho // Cemento (húmedo)	0,3	0,25
Madera // Cuero	0,5	0,4
Acero // Latón	0,5	0,4
Madera // Madera	0,7	0,4
Madera // Piedra	0,7	0,3
Vidrio // Vidrio	0,9	0,4
Caucho // Cemento (seco)	1	0,8
Cobre // Hierro (fundido)	1,1	0,3

2.2 Diseño

Para la realización del diseño prototipo en lo que respecta al subsistema de motores eléctricos se tomaron las siguientes consideraciones:

- Selección de dos motores en corriente directa con motoreductor.
- Acoplamiento directo del eje de los motores con la carga y rueda.
- Colocación en la parte trasera de la silla prototipo de los dos motores con el acoplamiento directo a las ruedas para obtener la movilización de la carga y un equilibrio en la tracción.

Para la determinación de los parámetros teóricos, funcionales y constructivos para la selección de los motores que conforman el subsistema, existen dos métodos: 1) Realizar un análisis de torques neto que interactúan en el sistema. 2) Realizar un análisis de cuerpo libre para la determinación de fuerzas netas que influyen en la estática o dinámica de la estructura. La primera ley de Newton expresa que un cuerpo sobre el que no actúa una fuerza neta se mueve con velocidad constante (que puede ser cero) y aceleración cero [5].

$$\sum \vec{F} = 0 [N] \quad (1)$$

La segunda ley de Newton expresa que, si una fuerza externa neta actúa sobre un cuerpo, éste se acelera. La dirección de aceleración es la misma que la dirección de la fuerza neta. El vector de fuerza neta es igual a la masa del cuerpo multiplicada por su aceleración [5].

$$\sum \vec{F} = m \cdot \vec{a} [N] \quad (2)$$

Un punto muy importante fue el establecimiento de las características del medio en donde se va a desplazar el prototipo de silla de ruedas, se consideraron tres escenarios de desplazamiento tomando en cuenta el material del terreno como cemento y las ruedas de caucho (relación dada por un coeficiente de fricción cinético de $0,8 = \mu d$). El primer escenario fue un desplazamiento horizontal de la silla prototipo, el segundo escenario correspondió a una pendiente en sentido ascendente y el tercer escenario correspondió a una pendiente en sentido descendente.

El grado de inclinación de la pendiente se estableció de acuerdo con la guía integrada para la verificación de la accesibilidad al entorno físico establecida por el Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos de Costa Rica, en el cumplimiento de la ley 7600 para la igualdad de oportunidades para las personas con discapacidad, publicada en el periódico La Gaceta N° 102 el 29 de mayo de 1996. Se deben establecer las siguientes pendientes longitudinales máximas para los tramos rectos de la rampa entre descansos, en función de la extensión de cada una de ellas, medidas en su proyección horizontal (L) [7]. Las dimensiones de las pendientes se muestran en la siguiente figura:

$0 \text{ m} < L \leq 3 \text{ m}$; la pendiente máxima será del 12%

$3 \text{ m} < L \leq 9 \text{ m}$; la pendiente máxima será del 10%

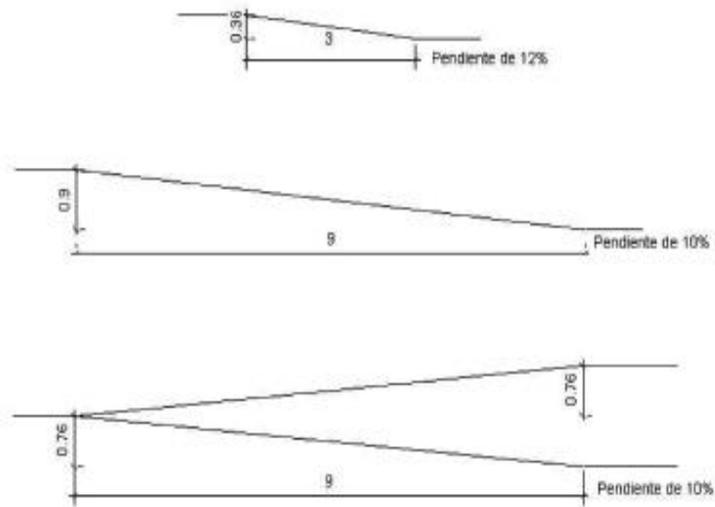


Figura 2. Grado de pendiente acorde a su longitud [7]

Se manejó el valor de 12% de la pendiente, considerando el caso donde la inclinación sea mayor, lo que implica un ángulo de elevación de $6,84^\circ = \theta$. Para el análisis de los tres escenarios se utilizó el segundo método correspondiente al estudio del cuerpo libre para la determinación de las fuerzas netas que interactúan en él y la necesaria para causar su desplazamiento, con el cálculo de dicha fuerza se derivaron resultados que ayudaron a la selección de los motores eléctricos que conforman el subsistema. El cuerpo libre para el análisis correspondió al paciente en la silla de ruedas considerando la estructura.

Las fuerzas netas que se consideraron corresponden al peso (\vec{W}), fuerza normal (\vec{N}), fuerza de fricción (\vec{F}_r) y la fuerza por determinar (\vec{F}), bajo un esquema coordenadas en dos dimensiones dados por X (coordenada horizontal) y Y (coordenada vertical). Con respecto a la masa del cuerpo se consideran tres valores acordes a la tabla 1 de requerimientos correspondientes a 60 kg, 100 kg y 140 kg. Los datos anteriores se resumen de la siguiente forma:

- Masa del cuerpo (m) = 60 kg | 100 kg | 140 kg.
- Ángulo de la pendiente (θ) = $6,84^\circ$.
- Coeficiente fricción cinético (μ_d) = 0,8.
- Gravedad terrestre (\vec{g}) = $9,8 \text{ m/s}^2$ hacia el centro terrestre.
- Fuerzas externas:

$$\text{Peso cuerpo: } \vec{W} = m \cdot \vec{g} [N] \quad (3)$$

$$\text{Fuerza de fricción cinética: } \vec{F}_r = \mu_d \cdot \vec{W} [N] \quad (4)$$

Primer escenario: Desplazamiento horizontal:

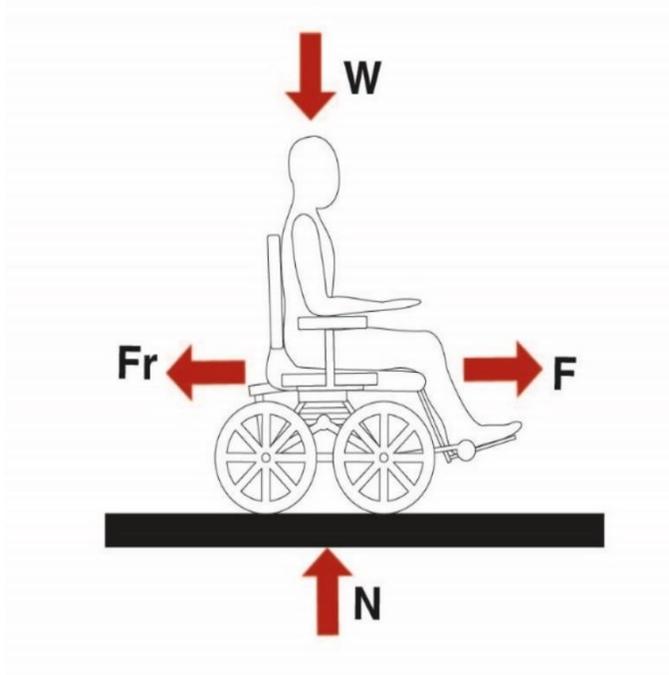


Figura 3. Esquema para análisis de cuerpo libre para desplazamiento horizontal

De acuerdo con la figura 3 se consideró que la fuerza normal y el peso presentes en el eje Y en el cuerpo libre, presentan la misma magnitud, pero con distinto sentido vectorial o dirección, por ende $|\vec{W}| = |\vec{N}|$. Según la ecuación (1) aplicada a la figura tres se obtiene:

$$\vec{W} - \vec{N} + \vec{F} - \vec{Fr} = 0$$

$$\vec{F} = \vec{Fr}$$

$$\vec{F} = \mu d \cdot \vec{W}$$

$$\vec{F} = \mu d \cdot m \cdot \vec{g}$$

De esta forma se obtuvieron tres diferentes resultados de la magnitud de la fuerza acorde a las tres masas del cuerpo considerado, correspondientes a:

$$F (60 \text{ kg}) = 470,40 \text{ N}$$

$$F (100 \text{ kg}) = 784,00 \text{ N}$$

$$F (140 \text{ kg}) = 1097,60 \text{ N}$$

Segundo escenario: Desplazamiento con pendiente ascendente:

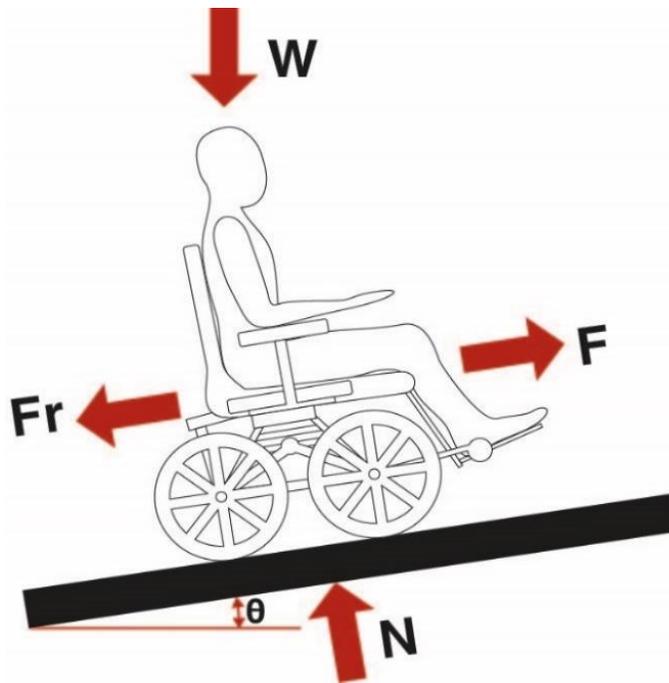


Figura 4. Esquema para análisis de cuerpo libre para desplazamiento en pendiente ascendente

Según la figura 4, se observó que las fuerzas presentes en el cuerpo presentan componentes vectoriales en ambas coordenadas X y Y. Nuevamente tomando en cuenta la igualdad dada en el eje vertical $|\vec{W}_y| = |\vec{N}_y|$ y descomponiendo las componentes de la fuerza de fricción y el peso, se puede realizar la siguiente relación para la coordenada de interés horizontal X:

$$\vec{N} = \vec{W} \cdot \sin(\theta)$$

$$\vec{F}_r = \mu d \cdot \vec{W} \cdot \cos(\theta)$$

Siguiendo con la ecuación (1) para el componente horizontal X se obtuvo las siguientes igualdades con sus correspondientes resultados para las tres distintas masas evaluadas:

$$\vec{F} = \mu d \cdot \vec{W} \cdot \cos(\theta) + \vec{W} \cdot \sin(\theta)$$

$$\vec{F} = \mu d \cdot m \cdot \vec{g} \cdot \cos(\theta) + m \cdot \vec{g} \cdot \sin(\theta)$$

$$\mathbf{F (60 kg)} = 537,08 \text{ N}$$

$$\mathbf{F (100 kg)} = 895,13 \text{ N}$$

$$\mathbf{F (140 kg)} = 1253,18 \text{ N}$$

Tercer escenario: Desplazamiento con pendiente descendente:

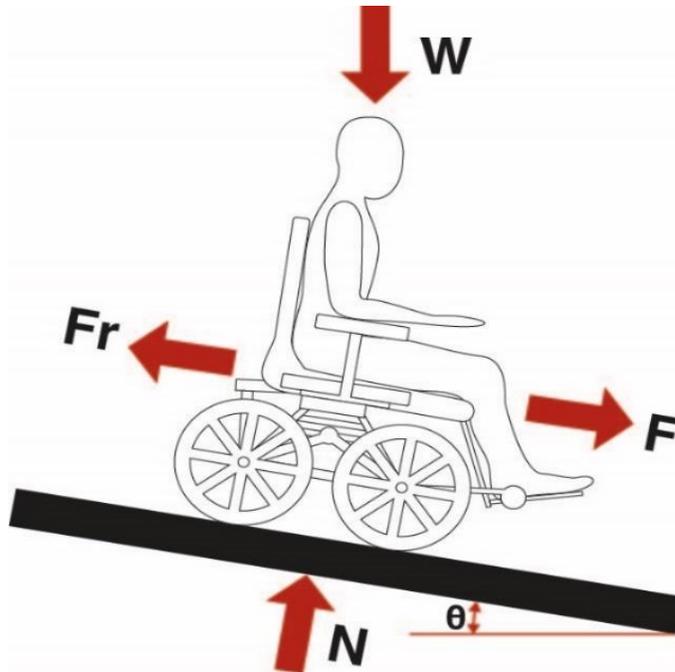


Figura 5. Esquema para análisis de cuerpo libre para desplazamiento en pendiente descendente

Se observó que el esquema de la figura 4 y la figura 5 son muy similares, el cambio se da en la descomposición vectorial de la fuerza de fricción y el peso en su sentido de dirección de aplicación, pero se mantiene las mismas relaciones del segundo escenario, de esta forma se definió para la componente de fuerza horizontal X:

$$\vec{F} = \mu_d \cdot \vec{W} \cdot \cos(\theta) - \vec{W} \cdot \sin(\theta)$$

$$\vec{F} = \mu_d \cdot m \cdot \vec{g} \cdot \cos(\theta) - m \cdot \vec{g} \cdot \sin(\theta)$$

Cuyos resultados fueron los siguientes:

$$\mathbf{F (60\ kg)} = 397,02\ \text{N}$$

$$\mathbf{F (100\ kg)} = 661,70\ \text{N}$$

$$\mathbf{F (140\ kg)} = 926,38\ \text{N}$$

Analizados los tres escenarios, se procedió a tomar el valor menor y el valor mayor obtenido de fuerza para cada valor de masa, con el propósito de obtener un rango de fuerza mínima y máxima para causar el desplazamiento del sistema, dichos rangos se muestran a continuación:

$$\mathbf{Masa\ de\ 60\ kg:}\ 397,02\ \text{N} \rightarrow 537,08\ \text{N}$$

$$\mathbf{Masa\ de\ 100\ kg:}\ 661,70\ \text{N} \rightarrow 895,13\ \text{N}$$

$$\mathbf{Masa\ de\ 140\ kg:}\ 926,38\ \text{N} \rightarrow 1253,18\ \text{N}$$

Retomando consideraciones anteriores, la silla de ruedas prototipo presente en Intel *Innovation Lab* presenta cuatro ruedas tipo *mecanum* con un radio de 0,08 m = R. Con la fuerza necesaria para causar el desplazamiento acorde a las tres masas consideradas, el radio de las ruedas y considerando el uso de dos motores, se obtuvo el resultado del parámetro de torque con ayuda de la siguiente ecuación:

$$\text{Torque: } \vec{T} = R \cdot \vec{F} \ [N \cdot m] \quad (5)$$

Para el caso de las fuerzas mínimas y máximas de cada masa, se tomó el valor máximo del rango, y se dividió entre dos por el motivo del uso de los dos motores que van a causar el torque necesario para el desplazamiento, realizando cada uno su aporte, así se pudo definir el torque necesario por motor acorde a la fuerza y la ecuación (5):

Masa de 60 kg: 268,54 N → **Torque:** 21,48 N · m \ 219,03 kg · cm

Masa de 100 kg: 447,565 N → **Torque:** 35,80 N · m \ 365,05 kg · cm

Masa de 140 kg: 626,59 N → **Torque:** 50,12 N · m \ 511,08 kg · cm

Con el torque necesario que debe proveer cada motor, fue importante determinar su potencia de consumo y las revoluciones necesarias para establecer la velocidad deseada, para las cuales se utilizan las siguientes ecuaciones para determinar su valor como parámetro de los motores:

$$\text{Potencia consumida: } P = F \cdot V [W] \quad (6)$$

$$\text{Velocidad angular: } \omega = V \div R \left[\frac{rad}{s} \right] \quad (7)$$

$$\text{Revoluciones por minuto: } RPM = \omega \cdot \frac{60}{2\pi} [RPM] \quad (8)$$

Nota: Las unidades de fuerza para la ecuación (6) son kg·F por lo que hay que realizar la conversión de N a esta unidad. Además, se utilizó la fuerza total máxima del rango para cada masa y no la del producto de la división para cada motor.

Considerando la velocidad estipulada en la tabla de requerimientos correspondiente a un máximo de 10 km/h (2-3 m/s) y utilizando las ecuaciones (6), (7) y (8), se determinaron los siguientes parámetros para la selección del motor:

$$P (60 \text{ kg}) = 164,30 \text{ W}$$

$$P (100 \text{ kg}) = 273,83 \text{ W}$$

$$P (140 \text{ kg}) = 383,36 \text{ W}$$

$$\omega = 37,5 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \text{ (independiente de las masas)}$$

$$\text{RPM} = 358,09 \text{ RPM (Independiente de las masas)}$$

Selección de los motores acorde a los parámetros obtenidos

Una vez obtenidos los parámetros característicos del sistema y de los motores necesarios se procedió a buscar un modelo comercial que cumpliera con dichos factores. En la tienda Amazon se encontró el siguiente modelo dado en la figura 6 con la siguiente descripción técnica [8]:

- **Modelo:** AmpFlow E30-400-G Electri.
- **Tipo de motor:** Motoreductor en corriente directa.
- **Dimensiones:** 6 x 3 x 2 pulgadas. El motor presenta 5.8 pulgadas de largo.
- **Revoluciones por minuto:** 680 RPM a 24 voltios.
- **Rango de voltaje:** 12 a 36 voltios.
- **Potencia máxima:** 1580 watts, (2.1 caballos de fuerza).
- **Torque máximo:** 87 N · m, (887,15 kg · cm).
- **Precio:** \$280.



Figura 6. Motor seleccionado para el prototipo a escala real de la silla de ruedas [8]

Como se explicó en el punto 1.2 referente a las limitaciones en la parte económica y cambio en la orientación y temática del proyecto, el motor de la figura 6 queda seleccionado para el prototipo en escala real de la silla acorde a la tabla 1 de requerimientos, sin embargo, por su costo no se puede adquirir. Para la implementación en pequeña escala del prototipo de control se procedió a encontrar otro motor pequeño, de menor costo y que provea las características necesarias para el diseño acorde a la tabla 2 de requerimientos, el motor presenta las siguientes características [9]:

- **Modelo:** Metal DC Geared Motor w/Encoder.
- **Tipo de motor:** Motoreductor en corriente directa.
- **Dimensiones:** 65 x 35 x 25 milímetros.
- **Revoluciones por minuto:** 1100 RPM a 12 voltios.
- **Rango de voltaje:** 0 a 12 voltios.
- **Potencia máxima:** 100 watts.
- **Torque máximo:** 0,5 N · m, (5,1 kg · cm).

- **Gear ratio:** 10:1.
- **Tipo de encoder:** Incremental.
- **Precio:** \$36.

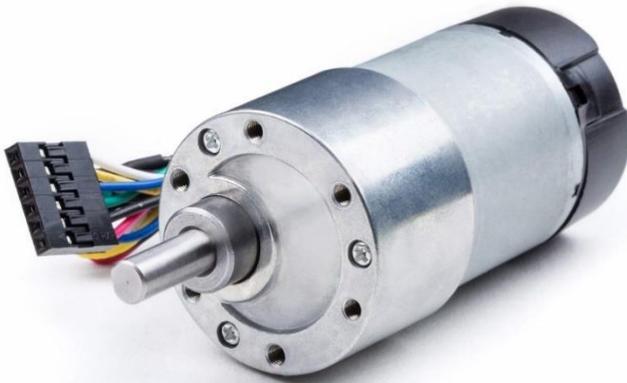


Figura 7. Motor seleccionado para el prototipo a pequeña escala de la silla de ruedas [9]

2.2 Implementación

Dada la adquisición y compra de los motores de la figura 7, se decidió realizar un proceso inverso al realizado en la etapa de diseño correspondiente a la obtención de los parámetros para la selección de los motores. El proceso inverso constituyó que, a partir de los parámetros conocidos de este tipo de motor correspondiente al torque y cantidad de revoluciones por minuto, se determinaron los otros parámetros de diseño correspondientes a capacidad de carga máxima acorde al torque, velocidad angular y potencia consumida de cada motor. De esta forma se procedió a diseñar y construir el prototipo de silla de ruedas a escala. Los detalles y elementos constructivos del prototipo de silla de ruedas a pequeña escala se encuentran adjuntas en el apéndice 1.



Figura 8. Prototipo final de silla de ruedas en pequeña escala

Las revoluciones por minuto del motoreductor tienen un valor de 1100 RPM, considerando la ecuación (8), se despejó la velocidad angular (w) obteniendo un valor de $w = 115,19 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$. Con la ecuación (7) y dado el resultado obtenido referente a la velocidad angular, el motor puede proveer una velocidad lineal de 7,31 m/s.

Considerando el radio de las ruedas para el prototipo a pequeña escala con un valor de $R = 0,0635 \text{ m}$ y la ecuación (5), despejamos la fuerza que puede proveer el motor dando como resultado $|\vec{F}| = 7,87 \text{ N}$. Para el prototipo de la silla de ruedas a escala se va a considerar el desplazamiento horizontal presente en el primer escenario dado por:

$$\vec{F} = \mu d \cdot m \cdot \vec{g}$$

Se despeja el término de masa dando como resultado $m = 1,003 \text{ kg}$, por ende, cada motor tiene la capacidad de carga de $1,003 \text{ kg}$. Para la potencia de consumo, se utiliza la ecuación (6), con los resultados obtenidos se da una potencia de consumo a esta capacidad de $57,57 \text{ W}$. La indexación de los motores a la estructura de la silla de ruedas prototipo se muestra a continuación:

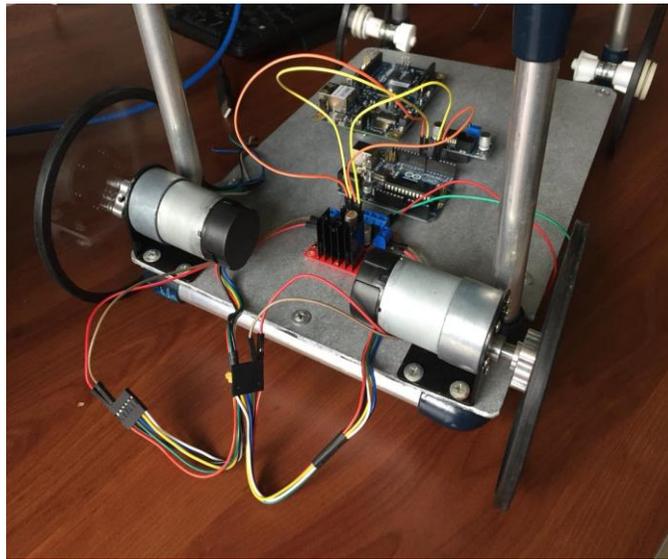


Figura 9. Acople del subsistema de motores eléctricos a la silla de ruedas prototipo en pequeña escala

2.3 Pruebas

Tabla 4. Resultados de pruebas del subsistema de motores eléctricos con un valor de tensión de 12 V

Variable	Motor 1	Motor 2
Corriente con carga de la rueda libre	0,28 A	0,40 A
Corriente con la carga total de la silla	2,70 A	3,0 A
Potencia neta consumida con carga de la rueda libre	3,36 W	4,8 W
Potencia neta consumida con la carga total de la silla	32,4 W	36 W
Masa de la silla de ruedas prototipo	1,87 kg	
Velocidad de la silla de ruedas prototipo con carga de la rueda libre	$90 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \mid 5,71 \frac{\text{m}}{\text{s}}$	$93 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \mid 5,90 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Tabla 5 Resultados de pruebas del subsistema de motores eléctricos con un valor de tensión de 6 V

Variable	Motor 1	Motor 2
Corriente con carga de la rueda libre	0,2 A	0,32 A
Corriente con la carga total de la silla	2,20 A	2,30 A
Potencia neta consumida con carga de la rueda libre	1,2 W	1,92 W
Potencia neta consumida con la carga total de la silla	13,2 W	13,8 W
Masa de la silla de ruedas prototipo	1,87 kg	
Velocidad de la silla de ruedas prototipo con carga de la rueda libre	$33 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \mid 2,09 \frac{\text{m}}{\text{s}}$	$36 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \mid 2,28 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

CAPÍTULO 3. SUBSISTEMA DE PATRONES SONOROS

3.1 Introducción

El principal medio de comunicación interpersonal que se ha tenido en el transcurso de la historia humana ha sido la voz. El deseo de expresarse y transmitir ideas permitió la evolución tanto del organismo como tal en lo que respecta a las cuerdas vocales como el sistema auditivo, dando inicio a la creación e interpretación de sonidos donde con un consenso de entendimiento entre los que lo ejecutan y escuchan, se fueron formando los patrones que dieron origen a lo que se conoce como lenguaje.

La voz o el sonido humanamente ejecutable y audible consiste en ondas sonoras que producen oscilaciones de la presión del aire, que son convertidas en ondas mecánicas en el oído humano y percibidas por el cerebro. La propagación del sonido involucra transporte de energía sin transporte de materia, en forma de ondas mecánicas que se propagan a través de la materia sólida, líquida o gaseosa. Como las vibraciones se producen en la misma dirección en la que se propaga el sonido, se trata de una onda longitudinal. Si la temperatura ambiente es de 15 °C, la velocidad de propagación del sonido es 340 m/s (1224 km/h). Este valor corresponde a 1 MACH [10].

Al introducir el término onda en la transmisión del sonido, se hizo referencia a características constructivas de dicha onda relacionadas con su propagación y naturaleza. Dada la naturaleza sonora en el origen de la onda, se establecieron parámetros que la describen como intensidad, timbre, duración y tono. Relacionadas con la propagación y descripción de la onda, se referenciaron parámetros como amplitud, longitud de onda, fase de la onda, periodo y la de mayor interés en este caso, la frecuencia.

Relacionando las ondas sonoras con sus características y con las capacidades generales de la ejecución e interpretación humana, existe un gran margen de frecuencias entre las cuales se puede generar ondas mecánicas longitudinales. Las ondas sonoras se reducen a los límites de frecuencia que pueden estimular el oído humano para ser percibidas en el cerebro como una

sensación acústica. Estos límites de frecuencia se extienden aproximadamente de 20 Hz a 20 kHz y se llaman límites de audición [11]. Dentro del espectro audible, se pueden clasificar sonidos acordes a su frecuencia o tonos. Esta clasificación de sonidos se puede observar en la siguiente figura:

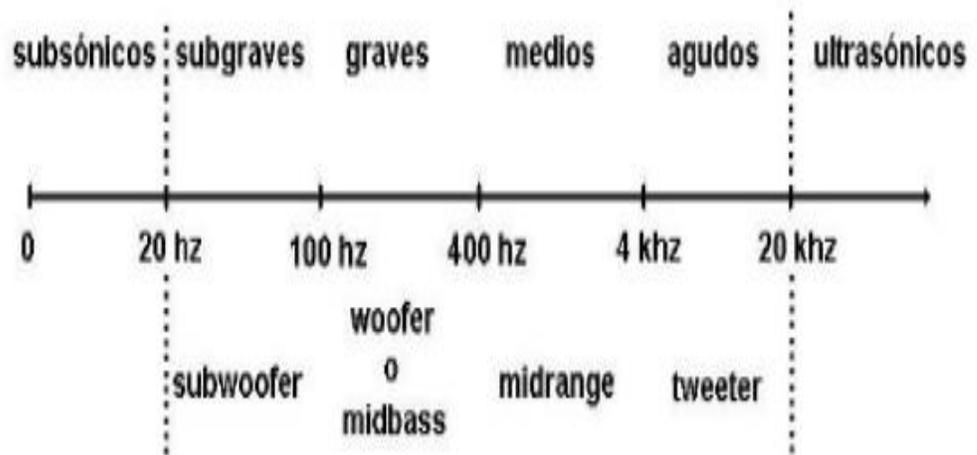


Figura 10. Clasificación de tonos acorde al ancho de banda del espectro audible [11].

A pesar de que la capacidad promedio auditiva del ser humano se encuentran en un ancho de banda de 20 Hz a 20 kHz, fue importante definir el rango de interés en los que se da el espectro de conversación o ejecución promedio de la voz humana. Este rango de frecuencias conversacionales de la voz humana o sonidos normalizados está definido entre 100 y 3000 Hz [10].

Cabe destacar que dichos rangos de ancho de banda pueden variar según sea la persona que los está interpretando, la mayor distinción se da en el caso del sexo de la persona, donde la voz masculina tiene un tono fundamental de entre 100 y 200 Hz, mientras que la voz femenina es más aguda, típicamente está entre 150 y 300 Hz. Las voces infantiles son aún más agudas. Sin el filtrado por resonancia que produce la cavidad buco nasal, las emisiones sonoras no

tendrían la claridad necesaria para ser audibles. Este proceso de filtrado es precisamente lo que permite generar los diversos formantes de cada unidad segmental del habla [11].

Con los avances en la tecnología, en conjunto con el desarrollo y estudio de la voz humana, se implementaron importantes innovaciones como la radiodifusión, la telefonía y controles mediante comandos o patrones de voz. Una invención tecnológica para la captura, tratamiento y transmisión de la voz humana es el micrófono. El micrófono es un transductor electroacústico. Su función es la de traducir las vibraciones debidas a la presión acústica ejercida sobre su cápsula por las ondas sonoras en energía eléctrica, conservando la misma frecuencia, amplitud y forma de onda [12].

Relacionando las anteriores definiciones y parámetros con el entorno del proyecto, se habían mencionado en el capítulo 1, los distintos trastornos que padecen las personas con este tipo de enfermedad, la mayor afectación se presenta en la motora, en casos específicos se manifiesta en la dificultad en la comunicación [1]. Sin embargo, la mayoría de los casos presentan la facultad del habla o en lo peor de los casos la emisión de sonidos referentes a expresiones que quieren dar. De allí la importancia de la implementación de este subsistema de patrones sonoros, el cual fue capaz de captar, grabar y reconocer sonidos o patrones de voz dados en el rango de frecuencias conversacionales.

3.2 Implementación

En el presente capítulo, no hubo enfoque de diseño ya que se adquirió un módulo de reconocimiento de voz, por lo que se inicia directamente a la etapa de implementación. El módulo corresponde al modelo *Voice Recognition Module V3*, es un dispositivo dependiente de una entrada analógica correspondiente a un micrófono. Soporta hasta 80 comandos de voz en total. Los comandos de voz de Max 7 son aptos para trabajar simultáneamente. Cualquier sonido podría ser entrenado como comando. La placa tiene dos funciones de operación [13]:

- Modo entrenamiento, en el cual se graban los comandos o patrones de voz mediante el micrófono.
- Modo reconocimiento, el cual entra en modo apertura para captar cualquier sonido y procesar la captación para compararlo con los sonidos capturados previamente, realizando un *match* si el proceso es asertivo.

Es importante mencionar que los usuarios necesitan entrenar el módulo primero antes de reconocer cualquier patrón de voz. Esta placa tiene dos formas de control: puerto serie (función completa) o mediante los pines de entrada general (parte de la función). Dentro de las características de operación del módulo se encuentran [13]:

- **Rango de voltaje:** 4.5 a 5.5 voltios.
- **Corriente de consumo:** Menor a 40 miliamperios.
- **Interface digital:** 5 voltios nivel TTL interface UART y GPIO.
- **Interface analógica:** Interfase de micrófono con el pin y conector de 3.5mm canal-mono.
- **Dimensiones:** 31 x 50 milímetros.
- **Precisión en el reconocimiento:** 99% (bajo condiciones ideales).
- Soporta un máximo de ochenta comandos de voz, cada uno con una extensión de 1500 milisegundos (pronunciación de una o dos palabras).
- Máximo de siete comandos efectivos en el reconocimiento al mismo tiempo.
- Librería de Arduino adjunta.
- Control: Mediante protocolos UART/GPIO.



Figura 11. Módulo *Voice Recognition Module V3* [13]

El objetivo principal es el control del subsistema de motores mediante el subsistema de patrones de voz, por lo cual se definió la prueba de tres comandos patrones para el accionamiento distinto de los motores de la silla de ruedas prototipo, ya que esta es una manera la cual independientemente de las limitaciones de las personas con los padecimientos mencionados anteriormente, pueden utilizar una facultad la cual la enfermedad no ha afectado de forma completa y proveer un transporte por medio de su capacidad sin necesidad de ayuda de un tercero. Los patrones de voz establecidos fueron los siguientes:

- Adelante.
- Atrás.
- Pare.

Una de las características del módulo de reconociendo de voz fue que presenta librería para el microcontrolador *Arduino*. Por su facilidad de manejo, adquisición y evitar el uso de una

computadora para la programación por el puerto serial, se decidió utilizar este microcontrolador *Arduino* para la implementación y pruebas.



Figura 12. Microcontrolador utilizado *Arduino modelo UNO* [14]

3.3 Pruebas

Una de las características importantes y de principal interés en este subsistema fue la frecuencia de los patrones de voz entrenados y reconocidos. Como parte del objetivo, el comando o patrón de voz seleccionado correspondiente a “adelante”, “atrás” y “pare” deben estar en el rango de frecuencia del espectro conversacional normal de la voz humana (100 a 3000 Hz) [10]. Para las distintas pruebas de este subsistema y por la limitada presencia de recursos de medición en el laboratorio de *Intel Innovation Lab* se utilizó el módulo *MyDaq* de *National Instruments* que consta de un dispositivo de adquisición de datos, presenta ocho instrumentos de laboratorio *plug-and-play* basados en PC usados comúnmente y basados en *LabView*, incluyendo un multímetro digital (DMM), osciloscopio y generador de funciones. Además, cuenta con analizador de Bode, generador de forma de onda arbitraria, analizador de señal dinámica (transformada rápida de Fourier), entrada digital y salida digital [15].

Con la plataforma *MyDaq* conjunto al *software LabView*, se desarrolló el bloque de medición de la señal captada y reconocida. La entrada de la señal fue mediante un micrófono con el pin y conector de 3.5 mm canal-mono, igual al del módulo de reconocimiento de voz, conectado a la entrada *Audio In del Mydaq*. Los dos pines de salida del *Arduino* están conectados a las entradas digitales del *MyDaq* D0 y D1. De forma paralela se conectó el *módulo de reconocimiento de voz V3* al *Arduino* para la captación y reconocimiento, como se muestra en la figura 14. Lo que sincroniza el módulo de reconocimiento de voz con el módulo de pruebas en el *MyDaq* es mediante el *match* dado en el módulo en su función de reconocimiento reflejado en las entradas digitales conectadas a los pines del *Arduino*.

Según el código presente en el apéndice 2 y visualizando la interacción de este subsistema con el de motores eléctricos, a la hora que el módulo de reconocimiento de voz hiciera un *match* con alguno de los tres patrones, se programó en el *Arduino*, que dos de sus pines tuvieran los siguientes valores lógicos dados por la tabla 6. Estos valores en los pines corresponden a las entradas que van a controlar el sentido de giro de los motores acorde al patrón establecido en el driver con puente H seleccionado.

Tabla 6. Nivel de salida en los pines A y B del *Arduino* acorde al reconocimiento de cada patrón dado por el módulo de reconocimiento V3

Comando o patrón de voz que realiza Match	Valor dado en el pin A	Valor dado en el pin B	Sentido rotación del motor
Adelante	'1' lógico (Valor de 5 v lenguaje TTL)	'0' lógico (Valor de 0 v lenguaje TTL)	Horario
Atrás	'0' lógico (Valor de 0 v lenguaje TTL)	'1' lógico (Valor de 5 v lenguaje TTL)	Antihorario
Pare	'0' lógico (Valor de 0 v lenguaje TTL)	'0' lógico (Valor de 0 v lenguaje TTL)	Motores detenidos



Figura 13. Módulo de adquisición de datos *MyDaq* de *National Instruments* [15]



Figura 14. Hardware utilizado en las pruebas del subsistema de patrones sonoros

El desarrollo del programa para el monitoreo del subsistema de patrones sonoros, el *LabView main VI* constó de cuatro bloques de adquisición de datos correspondientes a la entrada de audio mediante el micrófono (adquisición de patrón de voz) y dos entradas digitales provenientes de los dos pines asignados en el *Arduino* (Entrada Puente H A y B). En la salida del bloque de adquisición de patrón de voz, se conectó un bloque de filtrado tipo *Filtro Pasa Bajas* de tercer orden, estableciendo su frecuencia de corte en 4000 Hz. La salida de este bloque se conectó a tres diferentes bloques o VI. El primer bloque llamado *Mediciones Espectro*, corresponde a un bloque para medir el espectro de potencia de la señal de audio cuya salida del bloque fue conectada a un graficador para visualizar el espectro de potencia.

El segundo bloque de conexión corresponde a un bloque de *Mediciones de Tono*, cuyas salidas son mediciones de amplitud y frecuencia promedio del tono captado proveniente de la señal de audio. Los dos bloques restantes, uno corresponde a un VI específico para determinar la frecuencia de la señal adquirida, de esta manera se obtuvo dos formas de corroborar el rango de frecuencias o frecuencia promedio de la señal. El otro bloque corresponde a un graficador para observar la forma de la señal de audio adquirida que refleja el comportamiento del patrón.

De forma paralela se conectó un VI correspondiente a una salida de audio que se ejecuta después del ciclo para reproducir el patrón de audio adquirido y de esta forma corroborar que se captó el comando de forma certera. Los bloques de entrada digitales referentes a la entrada del puente H A y B, se conectaron a *leds* indicadores para determinar cada señal según el patrón o comando captado. Un '1' en la entrada corresponde a un led encendido y un '0' corresponde al led apagado. Acorde a estas dos entradas se establecieron *strings* conjunto con lógica combinatorial para determinar dado al estado de las dos entradas digitales, el sentido de movimiento o giro del motor. La figura del código e implementación gráfica del módulo de pruebas, así como la interfaz para el usuario se puede observar en el apéndice 3.

Se realizaron un total de cien pruebas monitoreando la frecuencia promedio de cada patrón de voz, si realizaba un *match* en el módulo de reconocimiento de voz V3 se activaban los pines A y B de salida del *Arduino* correspondientes a las entradas del puente H para dar el

sentido de giro de los motores acorde al reconocimiento del patrón. Los resultados de las pruebas se muestran en la tabla 7 presente en el apéndice 3.

Acorde a la tabla 7, la prueba 1 a la 49 se realizó bajo la primera condición correspondiente a un tono de pronunciación del patrón o comando a nivel de una conversación normal entre dos personas, a una distancia de 15 cm del micrófono del módulo de reconocimiento de voz y el colocado en el *MyDaq*. De la prueba 52 a la 99 se realizó bajo la segunda condición, con un tono de voz mucho más alto al anterior y con una distancia de 30 cm de ambos micrófonos. Graficando los resultados de las pruebas acorde al rango de frecuencias en la que se obtuvo cada muestra, se obtiene las siguientes figuras:

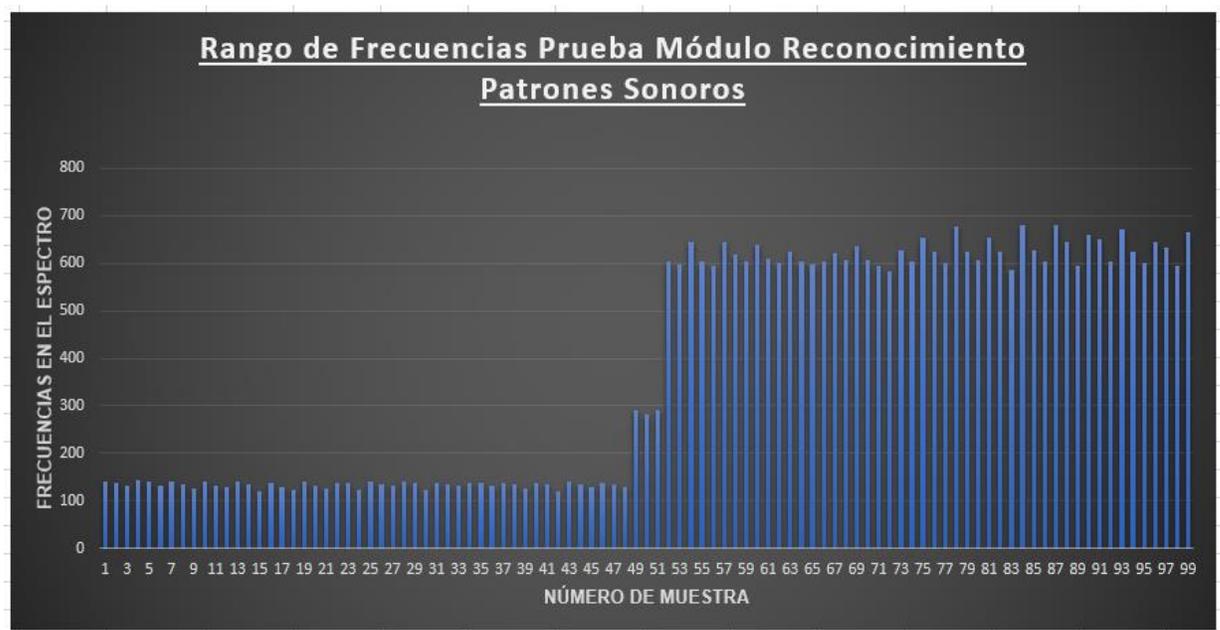


Figura 15. Gráfica de las pruebas acorde a sus respectivas frecuencias en un rango de 0 a 800 Hz.



Figura 16. Gráfica de las pruebas acorde a sus respectivas frecuencias en un rango de 0 a 4000 Hz.

Fue importante visualizar la forma gráfica del patrón o comando de voz adquirido, tanto en su figura de amplitud como de espectro de potencia, ambas acorde a cada comando realizado (adelante, atrás y pare) en conjunto a las dos condiciones de pruebas realizados según el método.

De esta manera se pudo observar y analizar las diferencias en los resultados, gráficas y espectros bajo las dos condiciones. Dichos resultados del módulo de pruebas segmentadas se encuentran en la figura 38 a la figura 43, presentes en el apéndice 3.

CAPÍTULO 4. SUBSISTEMA DE CONTROL

4.1 Introducción

Con los avances tecnológicos y de investigación, se ha ido evolucionando las técnicas y formas de implementación del control de los sistemas, ya que, a mayor innovación tecnológica, mayor es la diversidad e integración de las funciones que por ende aumentan el grado y nivel de control sobre los sistemas. El control automático ha pasado por diversos cambios, pasando del control clásico al control moderno y el control adaptativo.

El caso de interés es el control moderno, este se basa en el análisis en el dominio del tiempo y la síntesis a partir de las variables de estado, dicho dominio temporal se describe mediante ecuaciones diferenciales basadas en el modelo real que se quiera controlar [16]. Existen diversas formas de describir un sistema mediante modelados analíticos en sus formas de representación, algunas de ellas son función de transferencia, diagramas de bloques, espacio de estados y demás.

La función de transferencia de un sistema descrito mediante una ecuación diferencial lineal e invariante en el tiempo, se define como el cociente entre la transformada de *Laplace* de la salida (función de respuesta) y la transformada de *Laplace* de la entrada (función de excitación) bajo la suposición de que todas las condiciones iniciales son cero. Relaciona la variable de salida con la variable de entrada, es independiente de la naturaleza y magnitud de la entrada o función de excitación [16].

El espacio de estados está compuesto por los estados definidos como el conjunto de variables más pequeño (llamadas variables de estado), de forma que el conocimiento de estas variables en $t = t_0$, junto con el conocimiento de la entrada para $t > t_0$, determinan completamente el comportamiento del sistema en cualquier $t > t_0$. El espacio de estados constituye un espacio n -dimensional cuyos ejes de coordenadas están formados por el eje x_1 , eje x_2 ..., eje x_n , donde x_1, x_2, \dots, x_n son las variables de estado [16].

Otra forma de representación del sistema se desarrolla mediante el diagrama de bloques, que es una representación gráfica de las funciones que lleva a cabo cada componente y el flujo de señales. Tales diagramas muestran las relaciones existentes entre los diversos componentes. A diferencia de una representación matemática puramente abstracta, un diagrama de bloques tiene la ventaja de indicar de forma más realista el flujo de las señales del sistema real. En un diagrama de bloques todas las variables del sistema se enlazan unas con otras mediante bloques funcionales. El bloque funcional o simplemente bloque, es un símbolo para representar la operación matemática que sobre la señal de entrada hace el bloque para producir la salida. Las funciones de transferencia de los componentes por lo general se introducen en los bloques correspondientes, que se conectan mediante flechas para indicar la dirección del flujo de señales [16].

Existen diversas formas de relación entre la salida y la entrada de un sistema acorde a las distintas representaciones mencionadas, el control que se va a ejercer sobre el sistema puede depender de la forma en que se quiera relacionar la salida con la entrada, para el caso del control seleccionado para la unión del subsistema de motores eléctricos con el de patrones sonoros, se utilizó un control en lazo cerrado o realimentado. Dicho control consiste en alimentar al controlador la señal de error de actuación, que es la diferencia entre la señal de entrada y la señal de realimentación (que puede ser la propia señal de salida o una función de la señal de salida y sus derivadas y/o integrales), con el fin de reducir el error y llevar la salida del sistema a un valor deseado [16].

Es muy importante establecer la técnica de control moderno para el diseño del controlador. La técnica de control seleccionado es el control PID, dado como un método que permite controlar un sistema en lazo cerrado para que alcance el estado de salida deseado. El controlador PID está compuesto de tres elementos que proporcionan una acción Proporcional, Integral y Derivativa [17]. El esquema de control PID en un diagrama de bloque se muestra en la siguiente figura:

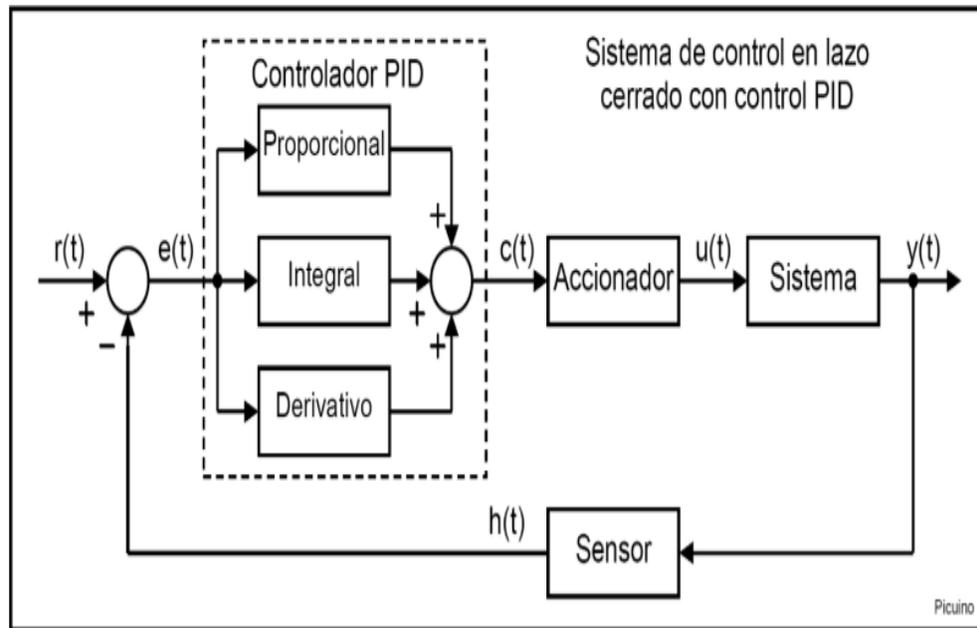


Figura 17. Diagrama de bloques control del sistema [17]

La ecuación de control producto de la acción del PID en el dominio del tiempo y la frecuencia se muestran en la siguiente figura:

$$u(t) = k_p \cdot e(t) + \frac{K_p}{T_i} \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau + k_p \cdot T_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (9)$$

$$C_{pid}(s) = k_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot s} + T_d \cdot s \right) \quad (10)$$

Trayendo el esquema de la figura 17 al contexto del desarrollo del prototipo de control de silla de ruedas, la entrada $r(t)$ se relaciona con el subsistema de patrones sonoros, el control PID es el que se desarrolló con ayuda de la obtención del modelo analítico y empírico del sistema. El actuador y el sistema corresponden al subsistema de motores eléctricos. Y no menos

importante el sensor correspondiente al *Encoder* empotrado en el motor eléctrico dado en la figura 8, que es el encargado de observar el estado. El desarrollo del controlador y el acoplamiento de los subsistemas en un sistema final se muestra en los siguientes puntos.

4.2 Diseño

Antes de establecer el diseño del controlador del sistema total, fue importante definir un modelo analítico y empírico sobre el cual se va a ejecutar el control, que para este caso dicho control se va a establecer en el subsistema de motores eléctricos con la entrada brindada por el subsistema de patrones sonoros.

Se procedió a realizar el modelado analítico y empírico del motor en corriente continua conectado a una carga con acoplamiento directo. A pesar de la presencia de dos motores en el prototipo de la silla de ruedas en pequeña y gran escala, ambos van a presentar el mismo tipo de control por ende se analiza uno de ellos y se reproduce el proceso.

Modelado analítico

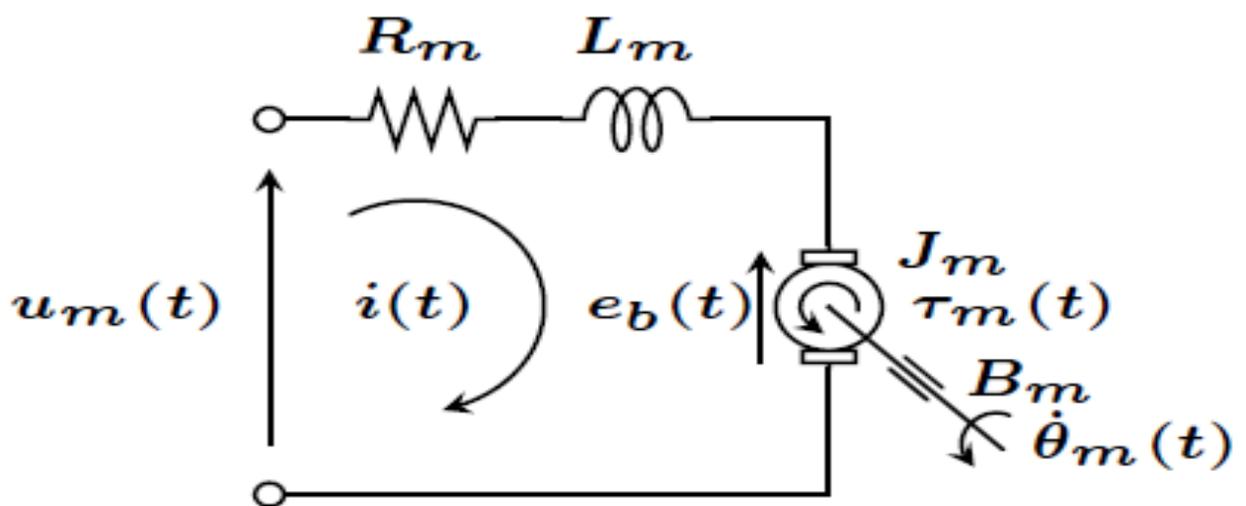


Figura 18. Esquema de un motor D.C con acople directo de carga [18]

Donde:

Um(t): Entrada del sistema dada por una función escalón dada por un valor de tensión [V].

Rm: Resistencia del terminal [Ω].

Lm: Inductancia del rotor [H].

i(t): Corriente de circulación [A].

eb(t): Fuerza contraelectromotriz producida [V].

Jm: Inercia del motor y carga [$\text{kg}\cdot\text{m}^2$].

Tm(t): Torque dado en el eje del motor [$\text{N}\cdot\text{m}$].

Bm: Constante de fricción viscosa [$\frac{\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}}{\text{rad}}$].

$\theta\text{m}(t)$: Ángulo de giro producido por el motor en el eje y carga [rad].

$\dot{\theta}(t)$: Velocidad angular del eje y la carga [$\frac{\text{rad}}{\text{s}}$].

$\ddot{\theta}(t)$: Aceleración angular del eje y la carga [$\frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$].

Ke: Constante de fuerza contraelectromotriz [$\frac{\text{rad}}{\text{s}}$].

Kt: Constante de torque [$\frac{\text{N}\cdot\text{m}}{\text{A}}$].

El esquema dado en la figura 18 corresponde a un sistema compuesto por un subsistema eléctrico y un subsistema electromecánico, las ecuaciones de acople de ambos subsistemas son las siguientes:

$$i(t) = Kt \cdot Tm \quad (11)$$

$$eb(t) = ke \cdot \dot{\theta}m \quad (12)$$

$$T_m(t) = J_m \cdot \ddot{\theta}_m - B_m \cdot \dot{\theta}_m \quad (13)$$

Realizando un análisis acorde a la ley de voltajes de *Kirchoff* (L.V.K) en el esquema dado por la figura 18 y conociendo la relación de voltaje en un inductor dado por

$V_{Lm} = L_m \cdot \frac{di(t)}{dt}$ se obtuvo:

$$L_m \cdot \frac{di(t)}{dt} = U_m(t) - i(t) \cdot R_m - e_b(t) \quad (14)$$

Se procedió a despejar el término T_m de la ecuación (11) e igualarlo en la ecuación (13) obteniendo la siguiente nueva ecuación:

$$\frac{i(t)}{K_t} = J_m \cdot \ddot{\theta}_m - B_m \cdot \dot{\theta}_m \quad (15)$$

Se derivó la ecuación (15) a ambos lados:

$$\frac{1}{K_t} \cdot \frac{di(t)}{dt} = J_m \cdot \ddot{\theta}_m - B_m \cdot \dot{\theta}_m \quad (16)$$

Se sustituye la ecuación (16) en la ecuación (14):

$$L_m \cdot (K_t \cdot J_m \cdot \ddot{\theta}_m - K_t \cdot B_m \cdot \dot{\theta}_m) = U_m(t) - i(t) \cdot R_m - e_b(t) \quad (17)$$

Sustituyendo las ecuaciones (11) y (12) en (17) y agrupando términos, se obtuvo la ecuación diferencial de entrada y salida del esquema en la figura 18 dada por:

$$U_m(t) = \ddot{\theta}_m \cdot (L_m \cdot K_t \cdot J_m) + \dot{\theta}_m \cdot (R_m \cdot K_t \cdot J_m - L_m \cdot K_t \cdot B) + \theta_m \cdot (K_e - R_m \cdot K_t \cdot B) \quad (18)$$

Aplicando la transformada de Laplace a ambos lados de la ecuación (18), definiendo la variable $U_m(s)$ como entrada y $\dot{\theta}_m$ como la salida, se determinó la siguiente función de transferencia:

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{1}{s^3 \cdot (L_m \cdot K_t \cdot J_m) + s^2 \cdot (R_m \cdot K_t \cdot J_m - L_m \cdot K_t \cdot B) + s \cdot (K_e - R_m \cdot K_t \cdot B)} \quad (19)$$

En la mayoría de los casos, en los aspectos constructivos de los motores actuales, la constante eléctrica del motor es mucho menor que la constante mecánica, lo que se traduce en despreciar el factor de la inductancia L_m en la ecuación eléctrica. De esta forma la ecuación (19) se puede simplificar a una función de transferencia de grado 1.

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K_m}{s + P_m} \quad (20)$$

Donde K_m y P_m son factores que están en función de los parámetros eléctricos y mecánicos establecidos anteriormente acorde al esquema de la figura 18. Para establecer el

espacio de estados acorde a la función de transferencia obtenida en la ecuación (19), se definieron las siguientes variables de estado:

$$X1 = i(t)$$

$$X2 = \dot{\theta}_m$$

$$X3 = \ddot{\theta}_m$$

Definiendo las ecuaciones de estado para cada variable, y dadas las ecuaciones anteriores, se obtuvieron las siguientes expresiones:

$$\dot{X}1 = \frac{Um(t)}{Lm} - \frac{Rm}{Lm} \cdot X1 - \frac{Ke}{Lm} \cdot X2 \quad (21)$$

$$\dot{X}2 = \frac{1}{Jm \cdot Kt} \cdot X1 + \frac{B}{Jm} \cdot X2 \quad (22)$$

$$\dot{X}3 = \frac{Um(t)}{Lm \cdot Kt \cdot Jm} + \left(\frac{Ke - Rm \cdot Kt \cdot B}{Lm \cdot Kt \cdot Jm} \right) \cdot X2 - \left(\frac{Rm \cdot Kt \cdot Jm - Lm \cdot Kt \cdot B}{Lm \cdot Kt \cdot Jm} \right) \cdot X3 \quad (23)$$

Dada la definición del espacio de estados presentes en las ecuaciones (24) y (25), tomando como salida la velocidad angular ($\dot{\theta} = X2$) y con las ecuaciones (21), (22) y (23) se establece el espacio de estados.

$$\dot{X} = AX + BU \quad (24)$$

$$Y = CX + DU \quad (25)$$

$$\dot{X} = \begin{pmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \\ \dot{X}_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{R_m}{L_m} & -\frac{K_e}{L_m} & 0 \\ \frac{1}{J_m \cdot K_t} & \frac{B}{J_m} & 0 \\ 0 & \frac{K_e - R_m \cdot K_t \cdot B}{L_m \cdot K_t \cdot J_m} & -\left(\frac{R_m \cdot K_t \cdot J_m - L_m \cdot K_t \cdot B}{L_m \cdot K_t \cdot J_m}\right) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{L_m} \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \cdot U(t) \quad (26)$$

$$Y = (0 \quad 1 \quad 0) \cdot \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{pmatrix} \quad (27)$$

Modelado empírico

Dadas las características del control moderno y la aplicación de la realimentación como método de control en un lazo cerrado, en un sistema descrito mediante una función de transferencia, se decidió que la velocidad angular sea la variable por controlar expresada como una salida en el modelado analítico en la ecuación (27).

El modelado empírico necesita elementos base para su realización como lo es la función de transferencia a la cual se quiere aproximar el modelo dadas por las ecuaciones (19) y (20). La variable u observador de estado es la que se encargó de establecer la descripción del comportamiento acorde al modelo físico en seguimiento de un comportamiento deseado.

Anteriormente se observó como la velocidad angular viene relacionada de una forma directamente proporcional con las revoluciones por minuto del acople directo entre el eje del motor y la carga, en este caso la rueda para la movilización de la silla. Dicha relación viene dada por las ecuaciones (7) y (8). El esquema o comportamiento deseado de la velocidad o revoluciones por minuto la cual el control debe describir se observa en la siguiente figura:

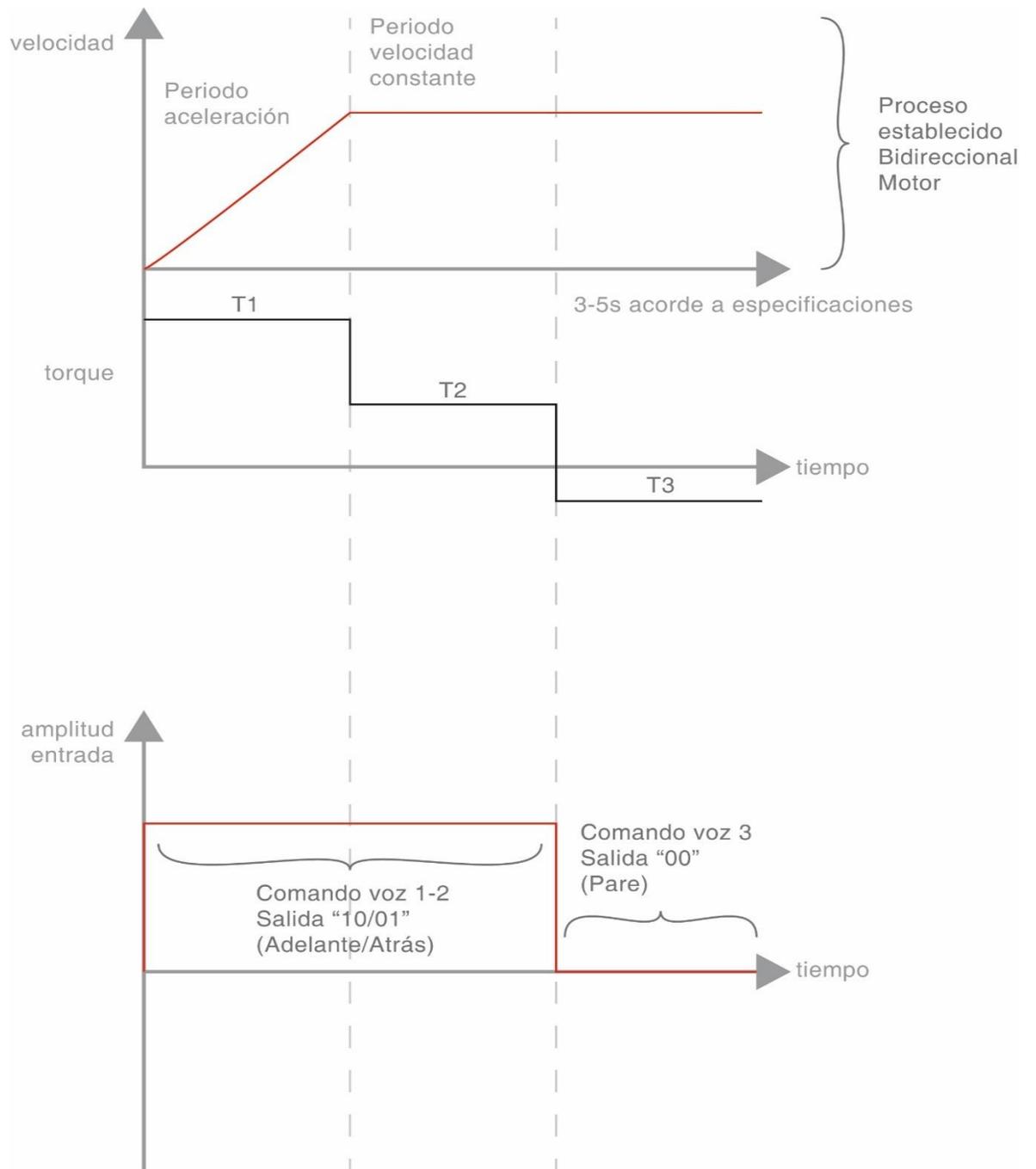


Figura propia

Figura 19. Esquema de comportamiento ideal del prototipo de control

Para el modelado empírico se utilizó el motor dado en la figura 7 y el microcontrolador *Arduino* mostrado en la figura 12. Un dispositivo importante para la descripción del modelo fue el controlador de velocidad para motores *DC PWM 1203B 3A*. Este módulo consta de un controlador de velocidad para capacidad de control de un motor, mediante el ajuste de la modulación por ancho de pulsos o PWM dado por un potenciómetro. Una capacidad de alimentación de 6 a 28 voltios [19]. Su hoja de datos se encuentra en la referencia [22].

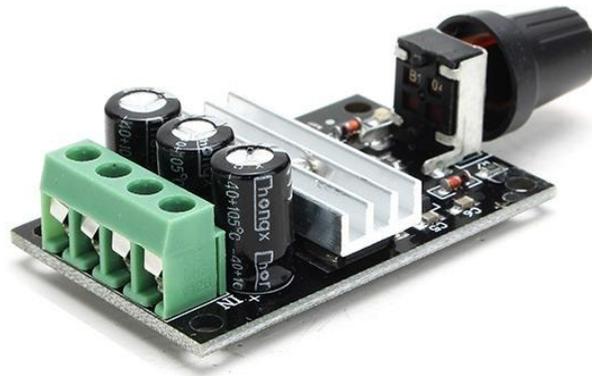


Figura 20. Módulo de control de velocidad para motores *DC PWM 1203B 3A* [19]

Las conexiones del motor de la figura 7 correspondientes al *Encoder* y sus salidas Hall Sensor GND, Hall Sensor Vcc, Hall Sensor A Vout y Hall Sensor B Vout, se conectaron correspondientemente a los pines GND, 5 V, digital pin 4 y digital pin 8 del microcontrolador *Arduino*. La alimentación del motor Motor + y Motor - se conectaron al módulo controlador de velocidad, en las entradas asignadas para el motor y las otras entradas de alimentación se conectó una fuente de 12 V. La conexión física de estos distintos módulos para la obtención del modelado empírico se muestra a continuación:

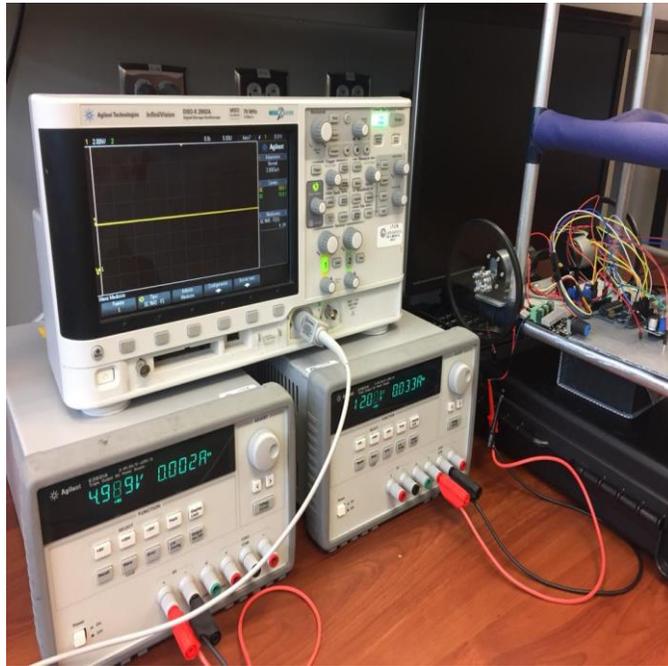


Figura 21. Sistema necesario para la obtención del modelado empírico

Ejecutando el código adjunto en el apéndice 4 en el microcontrolador, se pudo obtener la velocidad angular del motor conforme se realizaban cambios en el potenciómetro del módulo de control de velocidad, pasando de una velocidad mínima a la máxima. De forma paralela se monitoreó la alimentación del motor que representa la entrada del sistema total.

Los datos obtenidos se adjuntaron en un archivo de formato CSV para ser tratados con la herramienta de *software Matlab* y de esta forma obtener un modelo de aproximación que describa el proceso realizado. El procedimiento se muestra en las siguientes figuras:

```
Command Window
>> DeltaT=Tiempo(2)-Tiempo(1);
Motor1=iddata([VAM14], [Entrada], DeltaT );
Motor1inputname={'Entrada'};
Motor1outputname={'VAM14'};
```

Figura 22. Creación del objeto Motor 1 orientado a la descripción del sistema en el software Matlab

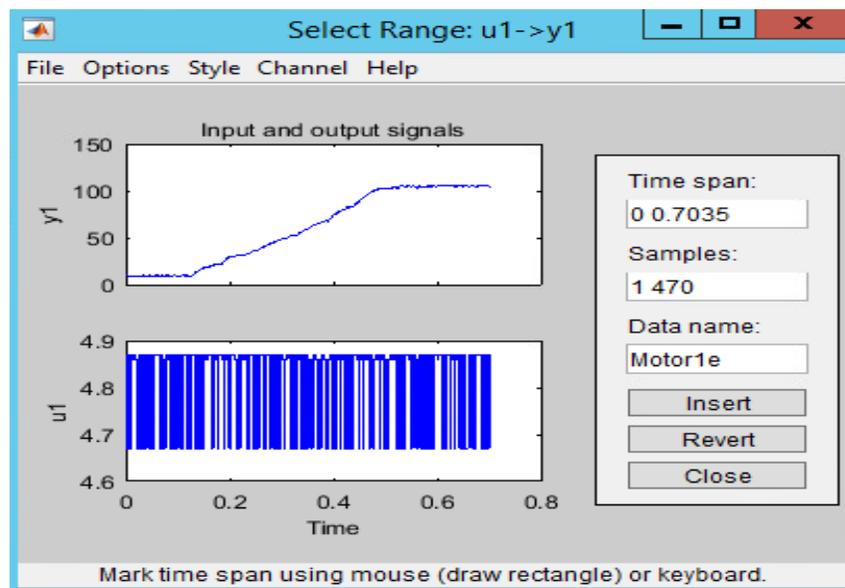


Figura 23. Gráfica de los datos de velocidad y entrada del Motor 1 en el software Matlab

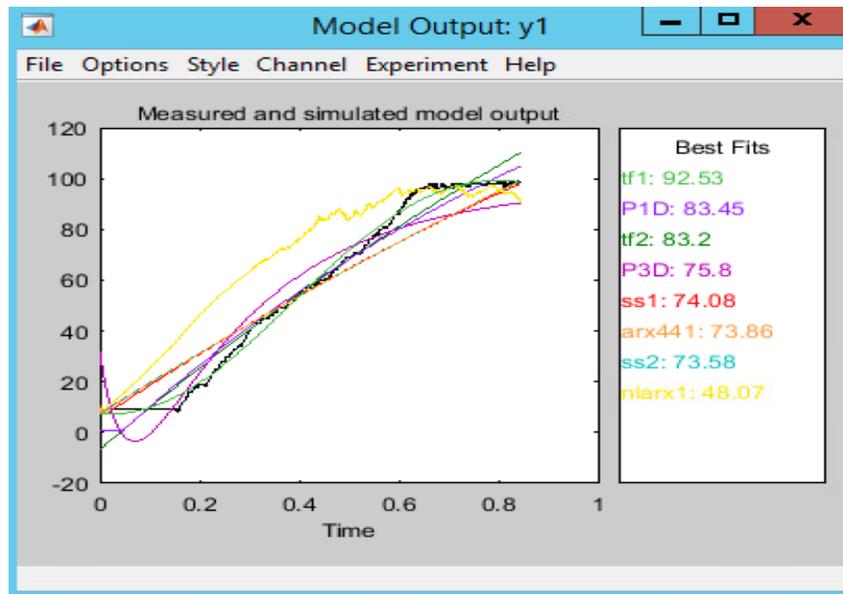


Figura 24. Resultados de distintos modelos de aproximaciones para el objeto Motor 1

Como se observa en la figura 24, el modelo de aproximación mediante función de transferencia es el más aproximado por lo que se exporta el modelo en dos funciones de transferencia de primer y tercer grado, mostradas por las siguientes ecuaciones.

$$FT_{\text{Motor 1}} = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{202 \cdot s + 731,1}{s^3 + 3,507 \cdot s^2 + 23,09 \cdot s + 47,54} \quad (28)$$

$$FT_{\text{Motor 1}} = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{34,21}{s + 0,4699} \quad (29)$$

A pesar de que los dos motores adquiridos correspondientes al dado en la figura 7 son del mismo tipo, mismo modelo, mismo fabricante y mismas especificaciones, presentan desigualdades en sus límites de velocidad, ya que un motor presenta mayor capacidad de revolución que el otro motor. La diferencia se encontró en las pruebas físicas cuando se realizó la adquisición de los motores. Por lo que se procedió a caracterizar cada uno de ellos por aparte siguiendo el procedimiento anterior, donde más adelante se va a establecer la forma de sincronización de ambos. Los resultados del modelo empírico para el motor 2 son los siguientes:

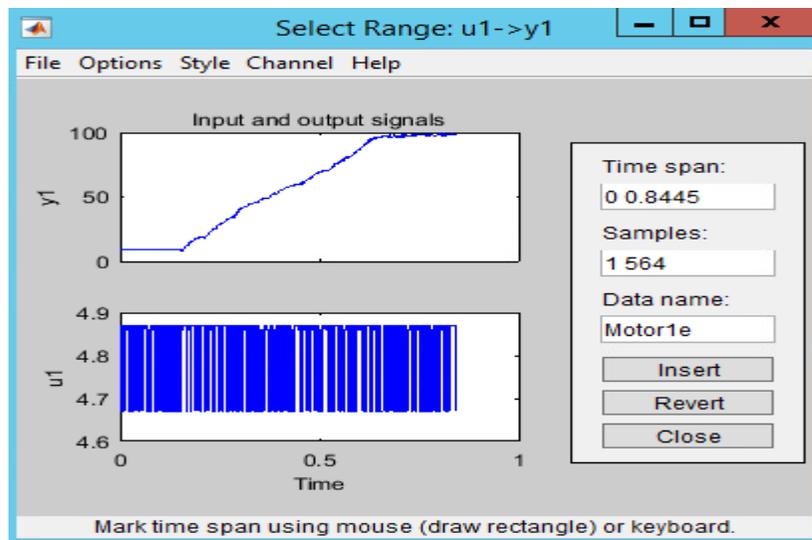


Figura 25. Gráfica de los datos de velocidad y entrada del Motor 2 en el software Matlab

Dado la gráfica de velocidad para el motor 2, se procedió a realizar el mismo procedimiento que para el motor 1, obtenido las aproximaciones de primer y tercer orden en las funciones de transferencia siguientes:

$$FT_{\text{Motor 2}} = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{-621,3 \cdot s + 1361}{s^3 + 19,69 \cdot s^2 + 191,6 \cdot s + 491,3} \quad (30)$$

$$FT_{\text{Motor 1}} = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{47,09}{s + 0,683} \quad (31)$$

4.3 Implementación

Una vez establecido el tipo de control del sistema mediante el control PID aplicado a la velocidad, en conjunto a la obtención de los modelos empíricos aproximados de los motores 1 y 2, se procedió a utilizar como primer paso la herramienta *PID Tuner* de *Matlab* para la sintonización de los parámetros K_p , K_i y K_d del controlador, aplicados a las funciones de transferencia de primer orden obtenidas en las ecuaciones (29) y (31). Debido a que dentro de las limitaciones del prototipo de control no se encuentran estipulado el control de la posición solo de la velocidad, se implementó un control de tipo PI muy semejante al tipo de control PIV. De igual manera en sintonización de la herramienta, se realizó la sintonización de los tres parámetros (K_p , K_i , K_d) para corroborar que la parte derivativa no es necesaria. Los parámetros obtenidos para cada motor fueron los siguientes:

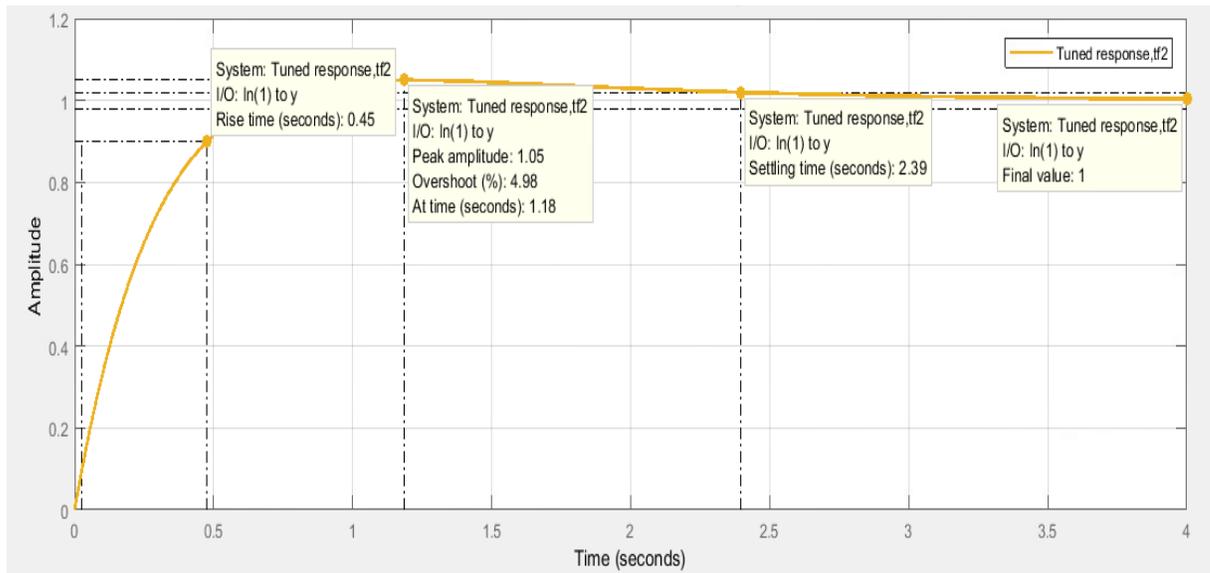


Figura 26. Sintonización de parámetros PID de la planta obtenida en la figura 23 mediante la acción del controlador del motor 1

Controller Parameters	
	Tuned
Kp	0.11502
Ki	0.10374
Kd	0
Tf	n/a
Performance and Robustness	
	Tuned
Rise time	0.45 seconds
Settling time	2.39 seconds
Overshoot	4.98 %
Peak	1.05
Gain margin	Inf dB @ NaN rad/s
Phase margin	84 deg @ 4.01 rad/s
Closed-loop stability	Stable

Figura 27. Parámetros obtenidos mediante la sintonización del controlador PID en el motor 1

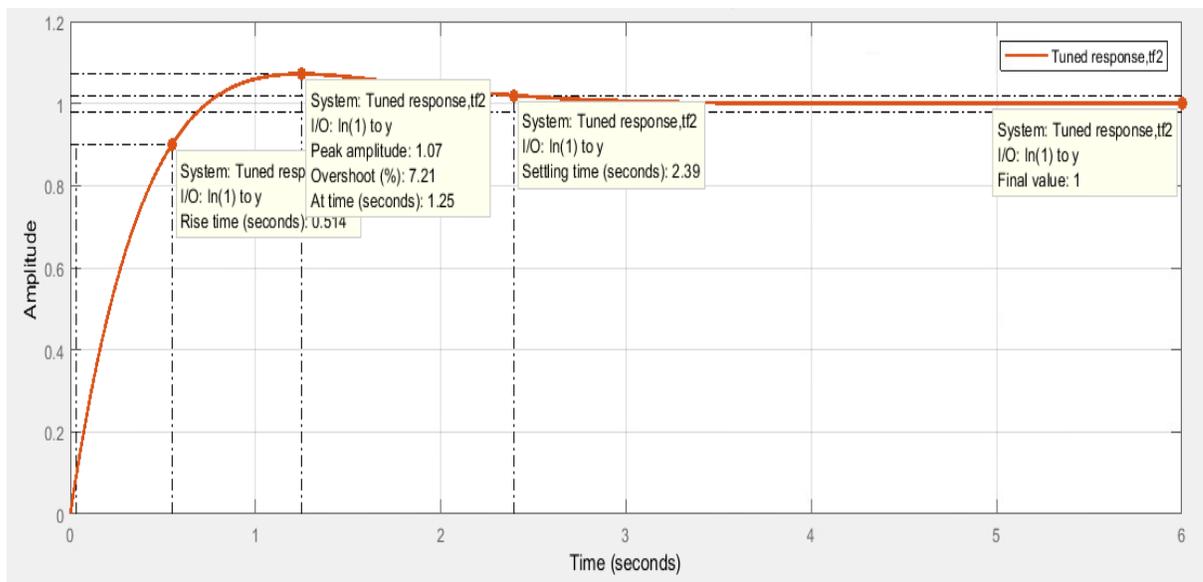


Figura 28. Sintonización de parámetros PID de la planta obtenida en la figura 25 mediante la acción del controlador del motor 2

Controller Parameters	
	Tuned
Kp	0.063723
Ki	0.088532
Kd	0
Tf	n/a
Performance and Robustness	
	Tuned
Rise time	0.514 seconds
Settling time	2.39 seconds
Overshoot	7.21 %
Peak	1.07
Gain margin	Inf dB @ NaN rad/s
Phase margin	78.6 deg @ 3.2 rad/s
Closed-loop stability	Stable

Figura 29. Parámetros obtenidos mediante la sintonización del controlador PID en el motor 2

Se observa que ambos motores, debido a las diferencias mencionadas y vistas en los resultados de los modelados empíricos en su función de transferencia y demás, presentan parámetros diferentes, por lo que se necesita un punto de sincronización entre ambos motores. La primera forma de sincronización fue mediante el parámetro de tiempo de estabilización donde se instauró el mismo tiempo de estabilización para ambos. La varianza del sobreimpulso es de tres por ciento, por lo que la segunda forma se va a establecer a nivel práctico respecto a la regulación de la alimentación del motor más potente y con mayor revolución correspondiente al motor dos.

Con la obtención de estos parámetros, se procedió en primera instancia a la unión de los subsistemas de patrones de voz con el de motores eléctricos tanto a nivel de hardware. Para ello se utilizó los dos motores adquiridos vistos en la figura 7, el microcontrolador *Arduino* dado en la figura 12 y el módulo de reconocimiento de voz dado en la figura 11.

Debido a que los motores para su funcionamiento nominal consumen aproximadamente 2-3 A y 12 v. Se necesita una fuente externa y un módulo que controle los sentidos de giro del motor mediante un puente H. Por lo que se adquirió el driver L298 con puente H incorporado, su hoja de datos se muestra en la referencia [21] y corresponde al siguiente modulo:

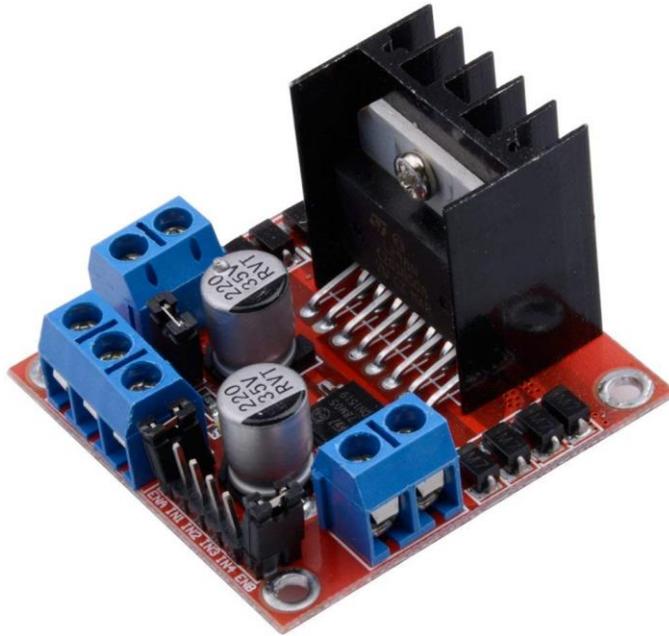


Figura 30. Driver control de motores L298

El esquema de conexión del control total viene dado por la conexión del módulo de reconocimiento de voz mediante sus pines GND, VCC, RXD, TXD conectados correspondientemente a los pines GND, 5 v, digital pin 2 y digital pin 4. Los motores presentan los mismos cinco pines de conexiones. El motor 1 y sus pines Hall Sensor A Vout y Hall Sensor B Vout, se conectaron a los pines digital pin 3 y digital pin 7 del Arduino. Los pines Hall Sensor A Vout y Hall Sensor B Vout del motor dos, se conectaron a los pines digital pin 7 y digital pin 5. Los pines de los motores 1 y 2 correspondientes Hall Sensor GND, Hall Sensor Vcc, se conectaron a una fuente dual digital con un valor de 5 v. Los pines de Motor + y Motor – de cada motor se conectaron a los pines out1, out2, out3 y out4 del driver L298. Al igual que este módulo con sus pines ENA, ENB, IN1, IN2, IN3, IN4 se conectaron correspondientemente al

microcontrolador a los pines 6, 8, 10, 11, 12, 13. La alimentación del driver L298 se dio mediante una fuente de 12 v conectada a sus pines GND y +12.

Referente al código de indexación total de ambos subsistemas, donde se programó el control PI y sus parámetros, se encuentra en el apéndice 5. La implementación física del control de ambos subsistemas se va a dar en la estructura de la silla de ruedas prototipo a pequeña escala para probar el funcionamiento total acorde al diseño dado en el capítulo 2. La siguiente figura muestra la implementación del prototipo final:

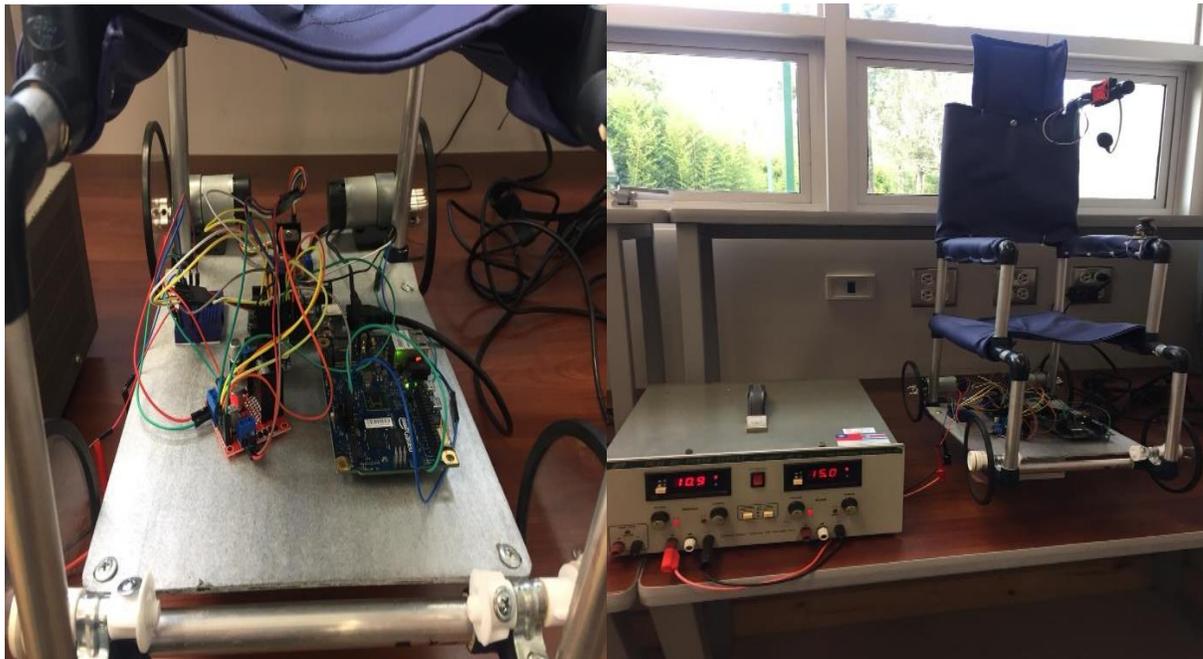


Figura 31. Prototipo de control automático dado para una silla de ruedas en pequeña escala

4.4 Pruebas

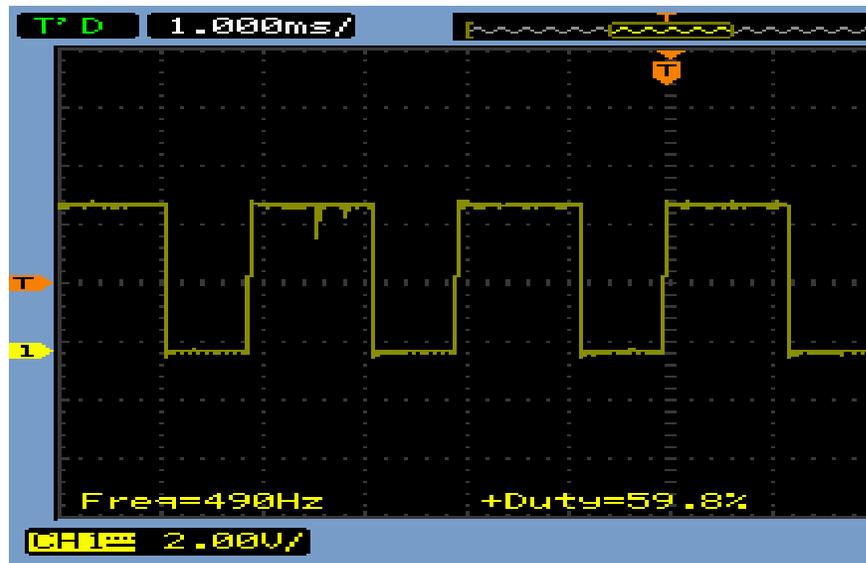


Figura 32. Salida de control de los motores PWM para una configuración de 600 RPM

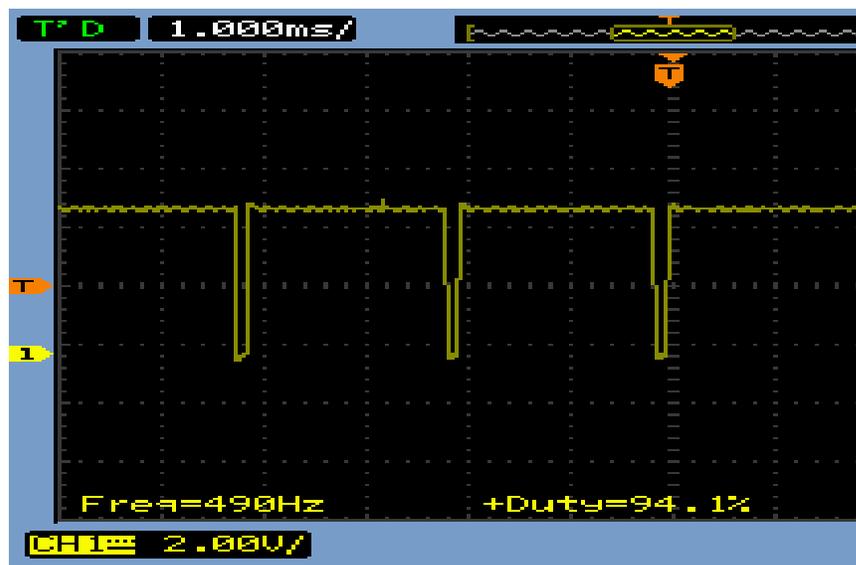


Figura 33. Salida de control de los motores PWM para una configuración de 1000 RPM

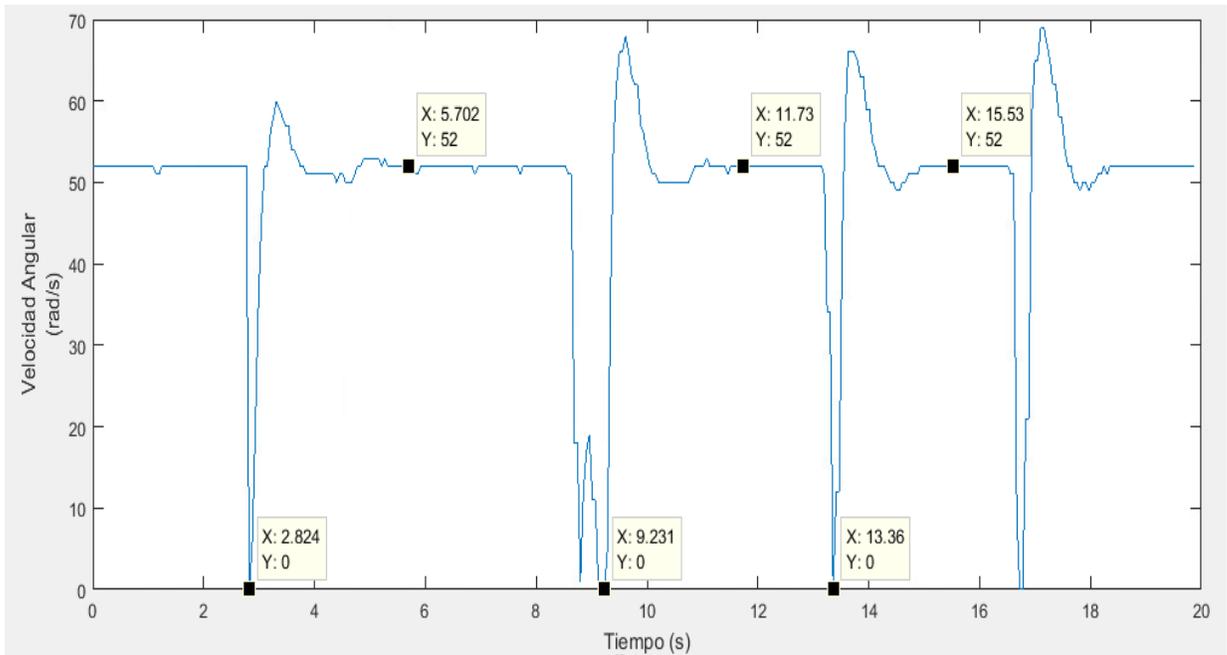


Figura 34. Resultados de la acción de control del prototipo frente a cuatro perturbaciones

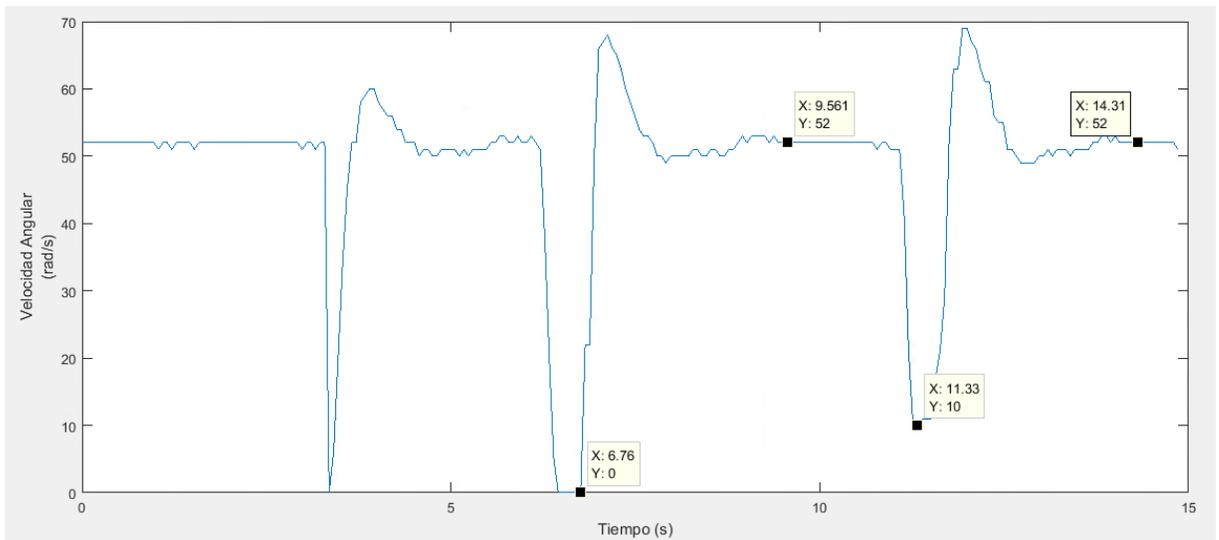


Figura 35. Resultados de la acción de control del prototipo frente a perturbaciones frente a tres perturbaciones

CAPÍTULO 5

5.1 Análisis de resultados

Dado el punto 2.3 Pruebas del capítulo 2, observando los resultados visualizados en la tabla 4 y 5, se obtuvieron valores distintos de corrientes de consumo en los motores 1 y 2 al variar la carga, respecto a las pruebas con el motor acoplado a la rueda libre y el motor acoplado a la rueda en movimiento de la silla como carga total. Se decidió realizar pruebas en cada motor debido a las diferencias descritas con anterioridad a pesar de que son el mismo modelo.

Dicha diferencia en el consumo de corriente al intercambiar las cargas se da debido a la dependencia de la masa. En el acople con la rueda libre solo interviene la masa de la rueda, la fricción viscosa del acople en el eje y el momento de inercia de este pequeño sistema (0,175 kg), por lo que la fuerza necesaria directamente proporcional al torque es menor que la consideración del sistema total de la silla de ruedas prototipo en pequeña escala, cuya masa mucho mayor (1,87 kg).

Dicha diferencia se expande en las otras variables de las tablas 4 y 5, observando un consumo mayor de potencia en los dos casos de carga total de la silla, con una diferencia respecto a la carga de solo con la rueda de un 85 %. Debido a que los motores presentan dos formas de funcionamiento acorde a la alimentación recibida (6 V y 12 V), las variaciones de estas distintas alimentaciones se ven reflejadas al consumo de potencia, donde a un nivel de alimentación de 6 V, hay un mayor consumo de corriente de ambos motores, por ende, de potencia y disminuye la velocidad tanto angular como lineal para cada motor en referencia a una alimentación de 12 V, con un consumo mayor en potencia pero más capacidad de revolución y velocidad. Para el motor 1 la diferencia en las velocidades respecto a las alimentaciones es de un 63,33 %, al igual que para el motor 2.

Si se contrasta los valores obtenidos en las tablas 4 y 5 con la tabla 2 de requerimientos asignada al diseño del prototipo y el método de proceso inverso para la obtención de los parámetros dado en el punto de la implementación del capítulo 2, se observa que las diferencias

en los valores son pequeños y de carácter cercano a un 15%. Tomando la propiedad de linealidad de este tipo de sistemas, la potencia consumida de los motores 1 y 2 con la carga total de la silla es respectivamente 68 W (12 V) y 28 W (6 V), donde la tabla 2 establece consumo de 50 – 70 W. Se calculó un consumo de 57 W en la parte de implementación. Esta diferencia radica en que en este último valor solo se considera la potencia de consumo de los motores 1 y 2. Las tablas 4 y 5 presentan valores que contemplan la potencia de consumo de los motores más los *drivers* de funcionamiento de cada uno de ellos.

Referente a los resultados en el punto 3.3 Pruebas del capítulo 3, la tabla 7 refleja los resultados de las 100 pruebas del reconocimiento de los tres patrones “adelante”, “atrás” y “pare” en sus distintas frecuencias acorde a las dos condiciones mencionados de pruebas. Según las gráficas dadas en las figuras 15 y 16 y los resultados en la tabla 7, se observa que las frecuencias promedio de los patrones reconocidos se encuentran en un rango de los 110 Hz a 700 Hz. Contrastando con la base teórica expuesta en la introducción del capítulo en el espectro de conversación normal tanto en hombre como mujer, dichos resultados entran en este rango. Hay que tomar en cuenta las dos condiciones las cuales se realizaron las pruebas y los espectros graficados visualizados en las figuras 38 a la 43. La diferencia entre cada figura dada la condición acorde al patrón se observa en el espectro de potencia y es producto a la dicción alta del fonema y mayor focalización donde causa picos de potencia; sin embargo, analizando el espectro de amplitud en ambos métodos presentan un 90% de similitud.

Acorde a los resultados obtenidos en el capítulo 4, en el modelado empírico realizado, al obtener las funciones de transferencia de interés dadas en las figuras 23 y 25, se seleccionaron dichas funciones como plantas para la sintonización del PID. Como se mencionó anteriormente, debido a que la posición no es una variable por controlar, solo la velocidad, se procedió a realizar un control tipo PI, sin embargo, para corroborar esta decisión teórica, se procedió a sintonizar los parámetros de un controlador de tipo PID, observando que en los parámetros obtenidos para el motor 1 y 2 dadas en las figuras 27 y 29, el valor de la constante diferencial K_d es de cero.

Los demás ajustes relacionados al tiempo de estabilización y sobreimpulso son relacionados a la tabla de requerimientos 1 y 2 y para la sincronización de los motores 1 y 2. La relación entre el modelado analítico con el modelado empírico mediante las funciones de transferencia acorde a la figura 24 es de un 92,53%, lo que refleja una gran aproximación al modelado físico del sistema.

A pesar de que el tiempo de estabilización teórico se establece en 2,39 s dado en los parámetros K_p y K_i , en el código funcional presente en el apéndice 5, se observa que se establece una velocidad deseada o la que se requiere en el sistema (*speed_req*), por lo que la acción del control PI conjunto a los parámetros, van a iniciar con mapeo de la salida cercano a este punto de referencia, por lo que el tiempo de estabilización dada la entrada es de 0,0635 s, la rampa está presente sin embargo por su poca duración no es visible. El tiempo de estabilización se puede observar de mejor manera cuando se introdujeron perturbaciones, vistas en las figuras 34 y 35.

El tiempo de estabilización depende de la magnitud de la perturbación, analizando las figuras 34, 35 y colocando marcadores en donde termina la perturbación hasta que se dé la estabilización, se tienen tiempos de estabilización de 2,499 a 2,98 s. En las figuras 32 y 33 se puede determinar la acción del PWM como entrada de control a los motores bajo la acción del PI dado el establecimiento de la velocidad de control. Se puede ver el ciclo de trabajo correspondiente a 59,8% y 94,1%.

Los ciclos de trabajo responden a velocidades establecidas de los 600 RPM Y 1000 RPM. Dado la hoja de datos del motor mostrado en la figura 7 acorde a su máxima cantidad de RPM, este se establece en 1100 RPM, se determinó un mapeo efectivo de la velocidad conjunto al PWM mediante las lecturas de los *Encoder* correspondientes por los ciclos de trabajo mostrados acorde a las velocidades establecidas.

CAPÍTULO 6

6.1 Conclusiones

Con el análisis de cuerpo libre para la determinación de fuerzas para el movimiento de un sistema, como lo es la silla de ruedas prototipo a gran escala, permitió establecer parámetros funcionales y de diseño del motor óptimo que cumpla con estos requerimientos sin sobrepasar sus capacidades nominales. Considerando la mayor masa en el análisis dado en el capítulo 1 de 140 kg, se obtuvieron los siguientes parámetros de fuerza total 1253,18 N, torque por motor de 50, 12 N, potencia de consumo total de 383,36 W, 37,5 rad/s en su velocidad angular y 358,09 RPM.

Para corroborar la veracidad del proceso de análisis de cuerpo libre para el diseño de la silla a gran escala, se utilizó dicho proceso a la inversa, considerando los parámetros de dos motores para determinar el diseño físico y proceder con la implementación de la silla de ruedas en pequeña escala considerando el primer desplazamiento horizontal. Según la utilización de dos motores como los de la figura 7, se obtuvieron los datos teóricos de una masa de carga de 2,1 kg, una velocidad angular de 115,19 rad/s, 1100 RPM y un consumo de potencia de 57,57 W.

Acorde a los resultados prácticos de la tabla 4 y 5, los motores no excedieron sus capacidades nominales, a nivel de consumo dada una alimentación de 12V, el consumo de potencia fue de alrededor de 68,4 W para una velocidad de 93 rad/s – 888,08 RPM con una masa de carga de 1,87 kg. Dichos resultados presentan una aproximación del 84% respecto a los resultados teóricos, por lo que se puede determinar la efectividad del análisis de cuerpo libre para la determinación de parámetros característicos para la selección de motores, dados los cumplimientos de las tablas 1 y 2 de requerimientos.

Mediante la utilización de herramientas tecnológicas en el campo de la comunicación, fue posible corroborar las bases teóricas en lo que respecta a la banda de frecuencia en los sonidos interpretados en un rango de conversación normal correspondiente a 100 – 3000 Hz. Dadas las figuras 15 y 16, se pudo observar que los patrones captados se encuentran dentro de

dicho rango. Mediante el transductor acústico o micrófono se adquirió el sonido o patrón mencionado, dicho espectro muestra distintos puntos de potencia debido a que, en la focalización de palabras propias de un hombre y una mujer, intervienen factores de fosas nasales y dilatación del diafragma que hacen que el factor repetibilidad tenga un grado de dificultad. Sin embargo, el espectro de amplitud y la frecuencia promedio son las mismas, como se pudo observar en las figuras 38 a la 43, lo que permite caracterizarlo y mediante el módulo de reconocimiento, grabarlo para reconocerlo posteriormente dentro de este espectro conocido.

Con los avances en la teoría de control y aplicación del control moderno, se pudo caracterizar el sistema físico mediante dos distintos modelos como lo son el modelado analítico y empírico del sistema total para agregar un controlador, tomando como entrada un escalón producto del reconocimiento del patrón de voz. Dicha caracterización analítica del subsistema de motores eléctricos con la entrada permitió obtener una referencia para tomarla como punto de partida en el siguiente paso del modelado empírico en las funciones de transferencia de las ecuaciones (19), (20), (28) y (29). La obtención de datos permitió la caracterización física deseada del comportamiento de la velocidad de los motores con una gran aproximación al modelo vista en la figura 24 del 92%, por lo que la buena descripción del observador de estado, en este caso el *Encoder* para la velocidad, relacionó más el sistema físico de control de los motores con el deseado, obteniendo parámetros del control más precisos.

La sintonización de los parámetros k_p , k_i , k_d para el motor 1 y 2 y el tiempo de estabilización, se contrastó con las pruebas a la planta física mostrada en las figuras 34 y 35, con un tiempo de estabilización dadas las perturbaciones de 2,49 a 2,98 s. Cumpliendo con los valores teóricos, el control a lazo cerrado y con la tabla de requerimientos 1 y 2, por lo que la buena aproximación del modelado empírico permitió establecer el control práctico bajo los parámetros teóricos obtenidos.

6.2 Recomendaciones

Es importante mencionar que entre mayor sea la consideración de las distintas fuerzas que intervienen en un cuerpo, dependiendo del ambiente donde se vaya a implementar, más aproximados son los parámetros obtenidos para diseño e implementación. La mayoría de estas fuerzas corresponden a muchas distintas clases de fricciones provenientes de la interacción del cuerpo con el medio. Con respecto a la descripción de potencia de consumo en un sistema, es importante tomar en cuenta todos los elementos que consuman energía a pesar de que no se vean involucrados en la caracterización física y demás, esto es una buena práctica de diseño ya que olvidar dichos componentes puede causar diversos problemas de consumo y limitaciones a la hora de la implementación del sistema.

Para la adquisición y reconocimiento de sonidos o patrones, el principal medio que adquiere y transmite los sonidos captados es el micrófono, por lo que la calidad de este dispositivo interviene mucho en la calidad de transmisión y reconocimiento. Cuanto mayor /es la calidad del micrófono en lo que respecta a ganancia, aislamiento, pérdidas y demás, mayor es la calidad de adquisición de sonidos o patrones así su procesamiento. Como el módulo de reconocimiento de voz necesita entrenarse el patrón por reconocer, es importante tomar en cuenta distintos medios a los cuales se puede estar expuestos para introducir la variable ruido en el reconocimiento y que esta no lo afecte, por ende, la consideración de distintos escenarios en los que se pueda ejecutar un patrón aumenta la efectividad de reconocimiento.

Otra recomendación muy importante es la de establecer un buen sistema de adquisición para el modelado empírico, ya que él va a ser el encargado de modelar el control físico real deseado para obtener sus parámetros característicos, por ende, cuanto mayor sea la aproximación, más cercanos a la realidad son los parámetros característicos y así su controlador.

Para las pruebas realizadas al subsistema de patrones sonoros, es importante definir a nivel teórico, la cantidad necesaria de muestras para la realización de las pruebas experimentales. La importancia radica en que teniendo un punto de referencia se puede describir de mejor forma el proceso utilizando estadística descriptiva y el muestreo correcto.

CAPÍTULO 7

7.1 Bibliografía y referencias

[1] Box M, Goldstein M, Rosenbaum P, Leviton A, Paneth N, Dan B, et al. Executive Committee for the Definition of Cerebral Palsy. Proposed definition and classification of cerebral palsy, April 2005. Dev Med Child Neurol 2005; 47: 571-6.

[2] F. Candelas, G. Lorenzo y C. Jara, «Aurova,» [En línea]. Available: http://www.aurova.ua.es/DPI2008-02647/informes/minirobot-motore SCC_090415.pdf. [Último acceso: 23 agosto 2018].

[3] A. De Almeida, «energia.gob,» 2015. [En línea]. Available: <https://www.energia.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/12/i-Seleccio%CC%81n-de-motores.pdf>. [Último acceso: 23 agosto 2018].

[4] G. M, «El par motor: qué es y cómo influye en el rendimiento de tu motor,» ACTUALIDAD MOTOR, 02 marzo 2017. [En línea]. Disponible: <https://www.actualidadmotor.com/par-motor-que-es/>. [Último acceso: 19 octubre 2018].

[5] R. Freedman y H. Young, Física Universitaria, México: PEARSON Educación, 2009.

[6] J. Sánchez, «Cosas de Física y Química,» [En línea]. Disponible: <http://elfisicoloco.blogspot.com/2014/05/calcular-el-coeficiente-de-rozamiento.html>. [Último acceso: 20 octubre 2018].

[7] CNREE y CFIA, «Guía Integrada para la Verificación de la Accesibilidad al Entorno Físico,» Heredia, 2010.

[8] «Amazon,» 2018. [En línea]. Disponible: https://www.amazon.com/AmpFlow-E30-400-G-Electric-Gearmotor-12V/dp/B00AG6NCIU/ref=sr_1_10?s=hi&ie=UTF8&qid=1536105398&sr=1-10&keywords=gearmotors. [Último acceso: 17 setiembre 2018].

[9] «Amazon,» 2018. [En línea]. Disponible: <https://www.amazon.com/Encoder-Support-1-5kg-cm-1760rpm-3-1kg-cm/dp/B07BRLW82M>. [Último acceso: 17 setiembre 2018].

[10] «Transmisión de la Voz,» [En línea]. Available: <http://elastixtech.com/fundamentos-de-telefonía/transmision-de-la-voz/>. [Último acceso: 20 octubre 2018].

[11] C. Estrada, «SCRIBD,» 2018. [En línea]. Disponible: <https://es.scribd.com/doc/213944701/Espectro-de-La-Voz-Humana-y-La-Musica>. [Último acceso: 20 octubre 2018].

[12] «MICRÓFONOS,» [En línea]. Disponible: <http://www.despazio.net/activos/textos/micros.pdf>. [Último acceso: 20 octubre 2018].

- [13] W. Shen, «ELECHOUSE,» 29 mayo 2014. [En línea]. Disponible: http://www.elechouse.com/elechouse/index.php?main_page=product_info&cPath=168_170&products_id=2254&zenid=j2e8jiv0992ji177gmj3fvbhc2. [Último acceso: 23 agosto 2018].
- [14] «ARDUINO UNO REV3,» Arduino, [En línea]. Disponible: <https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3>. [Último acceso: 20 octubre 2018].
- [15] «myDAQ - Dispositivo de Adquisición de Datos para Estudiantes,» National Instruments, [En línea]. Disponible: <http://www.ni.com/es-cr/shop/select/mydaq-student-data-acquisition-device>. [Último acceso: 13 octubre 2018].
- [16] K. Ogata, Ingeniería de control moderna, Madrid: PEARSON EDUCACIÓN, 2010.
- [17] «Control PID,» Picuino, 2017. [En línea]. Disponible: <https://www.picuino.com/es/arduprog/control-pid.html>. [Último acceso: 10 octubre 2018].
- [18] F. Monasterio, 08 febrero 2016. [En línea]. Disponible: <http://robolabo.etsit.upm.es/asignaturas/seco/apuntes/aplicacion-MotorDC.pdf>. [Último acceso: 23 agosto 2018].
- [19] «Motor speed controller,» MICROJPM, [En línea]. Disponible: <https://www.microjpm.com/products/ad36787/>. [Último acceso: 23 octubre 2018].

[20] «L298 Dual H-Bridge Motor Driver,» MICROJPM, [En línea]. Disponible: <https://www.microjpm.com/products/l298-dual-h-bridge-motor-driver-red/>. [Último acceso: 23 octubre 2018].

[21] «L298 DUAL FULL-BRIDGE DRIVER,» SPARKFUN, 2000. [En línea]. Disponible: https://www.sparkfun.com/datasheets/Robotics/L298_H_Bridge.pdf. [Último acceso: 21 setiembre 2018].

[22] «PWM Current-Mode Controller,» ON SEMICONDUCTOR, abril 2015. [En línea]. Disponible: <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/NCP1203-D.PDF>. [Último acceso: 11 octubre 2018].

APÉNDICE

Apéndice 1: Materiales utilizados en el proceso constructivo de la silla de ruedas prototipo en pequeña escala.

Acorde al proceso inverso de diseño dado en el capítulo 1, mediante los cálculos procedentes de los parámetros del motor adquirido de la figura 7; la masa y capacidad de carga por motor es de 1,003 kg, por lo que el subsistema de dos motores presenta una capacidad de carga de 2,1 kg aproximadamente. Con esta referencia de diseño, se utilizaron materiales livianos, pero a la vez resistentes para mantener una estructura rígida en soporte, pero maleable en el movimiento. Los materiales utilizados fueron:

- 9 codos de PBC de utilizados para tubería de alta temperatura de 2 cm de diámetro.
- 2 tapones de PBC lizos para tubería de alta temperatura de 2,2 cm de diámetro.
- 4 metros de tubo de aluminio de 1,8 cm de diámetro.
- ¼ metro de tela tipo vinil.
- Una placa de tipo fibran para base de 18 x 24 cm.
- 1 tarro de silicón frio.
- 4 ruedas tipo discos de precisión de 5 pulgadas de diámetro con borde de caucho.
- 20 amarras plásticas.
- 2 bases para montaje de motores de 37 mm de diámetro
- 2 acoples de eje para ruedas y motores de aluminio de 5 mm.
- 10 tornillos de aluminio de 1 pulgada tipo broca.

Las dimensiones de la estructura de la silla de ruedas prototipo a pequeña escala, corresponde a una base de 29 cm con soporte para la colocación de los componentes electrónicos atribuido a la placa de fibran. Un ancho de 18 cm y un alto de 72 cm.

Apéndice 2: Código utilizado en el microcontrolador para el módulo de reconocimiento de voz

```
/*
```

```
*****
```

```
* Programa para reconocimiento de patrones de voz en el subsistema - Proyecto de Graduación.
```

```
* Diseñado: José Roberto Calvo Monge - 2012217649, tomando como referencia código original del autor JiapengLi.
```

```
* Resumen: Programa consiste en la rutina para el proceso de reconocimiento de los patrones de voz en el Voice Recognition Module V3.
```

```
previamente entrenados. Además de presentar la programación de los pines que van a controlar el puente H respectivo en cada driver para cada motor.
```

```
*****
```

```
II Semestre 2018.
```

```
Versión 2 con base en la versión original creada el 2013/06/13.
```

```
*****
```

```
*/
```

```
#include <SoftwareSerial.h>
```

```
#include "VoiceRecognitionV3.h"
```

```
/**
```

```
Conexión
```

```
Arduino VoiceRecognitionModule
```

```
2 -----> TX
```

```
4 -----> RX
```

```

*/
VR myVR(2,4); // 2:RX 3:TX, Se escogen los pines digitales al gusto

uint8_t records[7]; // Grabaciones guardadas
uint8_t buf[64];

int Motor1 = 10; // Se declaran los pines que van a controlar el puente H de los motores
int Motor2 = 11; // para establecer el sentido de giro
int Motor3 = 12;
int Motor4 = 13;

#define adelante (0) // Grabaciones previamente entrenadas
#define atras (1)
#define pare (2)

/**
 @Nota: Print signature, si el caracter es invisible,
         imprime el valor hexable en su lugar
 @param buf --> largo del comando
         len --> número de parametros
*/
void printSignature(uint8_t *buf, int len)
{
    int i;
    for(i=0; i<len; i++){

```

```

if(buf[i]>0x19 && buf[i]<0x7F){
    Serial.write(buf[i]);
}
else{
    Serial.print("[");
    Serial.print(buf[i], HEX);
    Serial.print("]");
}
}
}
}

```

/**

@Nota: Print signature, si el caracter es invisible,

imprime el valor hexable en su lugar

@param buf --> VR module retorna un valor cuando el comando es reconocido

buf[0] --> Modo Grupo(FF: None Group, 0x8n: User, 0x0n: System

buf[1] --> Número de grabación la cual es reconocida

buf[2] --> Recognizer index(position) valor de la grabación reconocida

buf[3] --> Largo de la firma

buf[4]~buf[n] --> Firma

*/

```
void printVR(uint8_t *buf)
```

```
{
```

```
Serial.println("VR Index\tGroup\tRecordNum\tSignature");
```

```
Serial.print(buf[2], DEC);  
  
Serial.print("\t\t");  
  
if(buf[0] == 0xFF){  
    Serial.print("NONE");  
}  
else if(buf[0]&0x80){  
    Serial.print("UG ");  
    Serial.print(buf[0]&(~0x80), DEC);  
}  
else{  
    Serial.print("SG ");  
    Serial.print(buf[0], DEC);  
}  
Serial.print("\t");  
  
Serial.print(buf[1], DEC);  
  
Serial.print("\t\t");  
  
if(buf[3]>0){  
    printSignature(buf+4, buf[3]);  
}  
else{  
    Serial.print("NONE");  
}  
  
Serial.println("\r\n");
```

```

}

void setup()
{
  /** initialize */
  myVR.begin(9600);

  Serial.begin(115200);
  Serial.println("Modo reconocimiento, Subsistema de Patrones Sonoros");

  pinMode(Motor1, OUTPUT);
  pinMode(Motor2, OUTPUT);
  pinMode(Motor3, OUTPUT);
  pinMode(Motor4, OUTPUT);

  if(myVR.clear() == 0){
    Serial.println("Reconocedor limpio.");
  }else{
    Serial.println("No se detecta el VoiceRecognitionModule.");
    Serial.println("Por favor revise la conexión o reinicie el Microcontrolador.");
    while(1);
  }

  if(myVR.load((uint8_t)adelante) >= 0){
    Serial.println("adelante cargado");
  }
}

```

```

}

if(myVR.load((uint8_t)atras) >= 0){
    Serial.println("atrás cargado");
}

if(myVR.load((uint8_t)pare) >= 0){
    Serial.println("pare cargado");
}
}

void loop()
{
    int ret;

    ret = myVR.recognize(buf, 50);

    if(ret>0){
        switch(buf[1]){

            case adelante: // Se realiza un esquema de casos para el modo reconocimiento de los tres patrones
                el cual si ejecuta un match,

                    digitalWrite(Motor1, HIGH); //los pines digitales tendran las salidas de control definidas

                    digitalWrite(Motor2, LOW);

                    digitalWrite(Motor3, HIGH);

                    digitalWrite(Motor4, LOW);

                    break;

            case atras:

                digitalWrite(Motor1, LOW);

                digitalWrite(Motor2, HIGH);

```

```
digitalWrite(Motor3, LOW);
digitalWrite(Motor4, HIGH);

break;

case pare:

digitalWrite(Motor1, LOW);
digitalWrite(Motor2, LOW);
digitalWrite(Motor3, LOW);
digitalWrite(Motor4, LOW);

break;

default:

Serial.println("Función de grabación indefinida");

break;

}

/**Cuando se da un match que quiere decir un comando reconocido se imprime buf*/
printVR(buf);

}

}
```

Apéndice 3: Interfaz gráfica y resultados del módulo de pruebas segmentadas del subsistema de patrones sonoros.

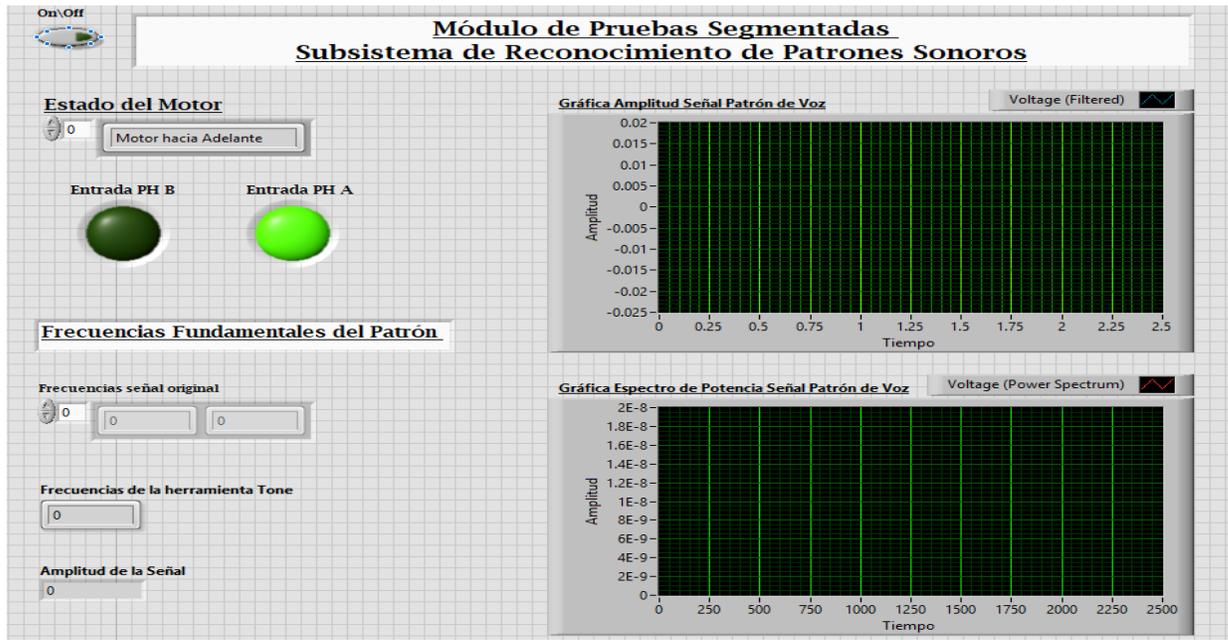


Figura 36. Interfaz gráfica del módulo de pruebas segmentadas para el subsistema de patrones sonoros

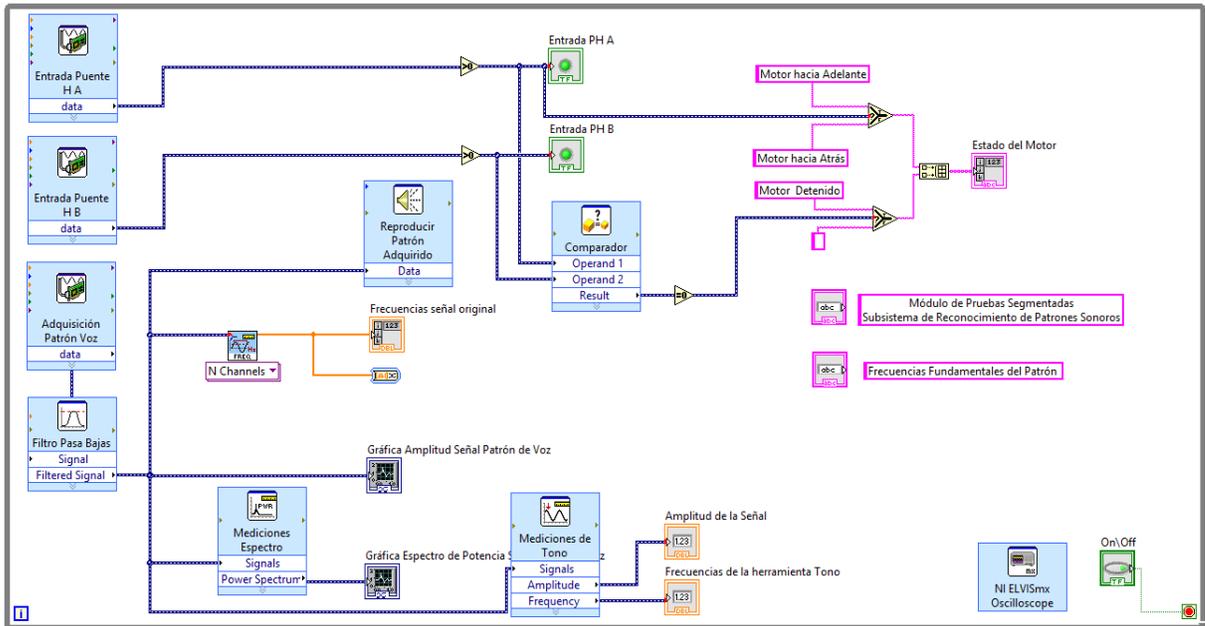


Figura 37. Bloque de código funcional para el módulo de pruebas segmentadas subsistema de patrones sonoros

Tabla 7 Resultados del módulo de pruebas segmentadas del subsistema de patrones sonoros

Prueba	Patrón de Voz	Promedio Frecuencia de la Muestra (Hz)	Entrada PH A (V)	Entrada PH B (V)	Entrada PH A ('1' o '0')	Entrada PH B ('1' o '0')
1	Adelante	141.373	5.0	0.0	1	0
2	Atrás	136.622	0.0	5.0	0	1
3	Pare	132.121	0.0	0.0	0	0
4	Adelante	143.373	5.0	0.0	1	0
5	Atrás	139.622	0.0	5.0	0	1
6	Pare	131.626	0.0	0.0	0	0
7	Adelante	140.373	5.0	0.0	1	0

8	Atrás	135.627	0.0	5.0	0	1
9	Pare	126.124	0.0	0.0	0	0
10	Adelante	140.123	5.0	0.0	1	0
11	Atrás	131.876	0.0	5.0	0	1
12	Pare	127.874	0.0	0.0	0	0
13	Adelante	140.126	5.0	0.0	1	0
14	Atrás	134.624	0.0	5.0	0	1
15	Pare	118.875	0.0	0.0	0	0
16	Adelante	139.126	5.0	0.0	1	0
17	Atrás	130.124	0.0	5.0	0	1
18	Pare	123.624	0.0	0.0	0	0
19	Adelante	140.121	5.0	0.0	1	0
20	Atrás	131.383	0.0	5.0	0	1
21	Pare	126.375	0.0	0.0	0	0
22	Adelante	138.375	5.0	0.0	1	0
23	Atrás	137.127	0.0	5.0	0	1
24	Pare	123.851	0.0	0.0	0	0
25	Adelante	140.125	5.0	0.0	1	0
26	Atrás	135.127	0.0	5.0	0	1
27	Pare	130.638	0.0	0.0	0	0
28	Adelante	141.126	5.0	0.0	1	0

29	Atrás	136.375	0.0	5.0	0	1
30	Pare	122.616	0.0	0.0	0	0
31	Adelante	137.881	5.0	0.0	1	0
32	Atrás	133.373	0.0	5.0	0	1
33	Pare	132.372	0.0	0.0	0	0
34	Adelante	138.873	5.0	0.0	1	0
35	Atrás	137.376	0.0	5.0	0	1
36	Pare	131.377	0.0	0.0	0	0
37	Adelante	139.128	5.0	0.0	1	0
38	Atrás	134.622	0.0	5.0	0	1
39	Pare	126.382	0.0	0.0	0	0
40	Adelante	137.878	5.0	0.0	1	0
41	Atrás	135.621	0.0	5.0	0	1
42	Pare	120.878	0.0	0.0	0	0
43	Adelante	140.376	5.0	0.0	1	0
44	Atrás	135.628	0.0	5.0	0	1
45	Pare	128.879	0.0	0.0	0	0
46	Adelante	138.627	5.0	0.0	1	0
47	Atrás	133.373	0.0	5.0	0	1
48	Pare	129.88	0.0	0.0	0	0
49	Adelante	291.376	5.0	0.0	1	0

50	Atrás	282.375	0.0	5.0	0	1
51	Pare	290.372	0.0	0.0	0	0
52	Adelante	602.874	5.0	0.0	1	0
53	Atrás	597.125	0.0	5.0	0	1
54	Pare	645.38	0.0	0.0	0	0
55	Adelante	604.623	5.0	0.0	1	0
56	Atrás	595.48	0.0	5.0	0	1
57	Pare	644.875	0.0	0.0	0	0
58	Adelante	617.123	5.0	0.0	1	0
59	Atrás	602.812	0.0	5.0	0	1
60	Pare	638.626	0.0	0.0	0	0
61	Adelante	610.167	5.0	0.0	1	0
62	Atrás	599.657	0.0	5.0	0	1
63	Pare	625.128	0.0	0.0	0	0
64	Adelante	603.10	5.0	0.0	1	0
65	Atrás	597.23	0.0	5.0	0	1
66	Pare	602.624	0.0	0.0	0	0
67	Adelante	620.34	5.0	0.0	1	0
68	Atrás	605.17	0.0	5.0	0	1
69	Pare	635.124	0.0	0.0	0	0
70	Adelante	607.8	5.0	0.0	1	0

71	Atrás	594.125	0.0	5.0	0	1
72	Pare	582.376	0.0	0.0	0	0
73	Adelante	626.378	5.0	0.0	1	0
74	Atrás	603.376	0.0	5.0	0	1
75	Pare	652.376	0.0	0.0	0	0
76	Adelante	624.624	5.0	0.0	1	0
77	Atrás	601.375	0.0	5.0	0	1
78	Pare	678.126	0.0	0.0	0	0
79	Adelante	624.373	5.0	0.0	1	0
80	Atrás	606.877	0.0	5.0	0	1
81	Pare	652.624	0.0	0.0	0	0
82	Adelante	625.373	5.0	0.0	1	0
83	Atrás	586.125	0.0	5.0	0	1
84	Pare	679.372	0.0	0.0	0	0
85	Adelante	626.627	5.0	0.0	1	0
86	Atrás	603.874	0.0	5.0	0	1
87	Pare	679.372	0.0	0.0	0	0
88	Adelante	645.619	5.0	0.0	1	0
89	Atrás	595.625	0.0	5.0	0	1
90	Pare	660.376	0.0	0.0	0	0
91	Adelante	649.126	5.0	0.0	1	0

92	Atrás	602.876	0.0	5.0	0	1
93	Pare	672.375	0.0	0.0	0	0
94	Adelante	624.626	5.0	0.0	1	0
95	Atrás	601.625	0.0	5.0	0	1
96	Pare	643.626	0.0	0.0	0	0
97	Adelante	633.122	5.0	0.0	1	0
98	Atrás	594.876	0.0	5.0	0	1
99	Pare	666.375	0.0	0.0	0	0

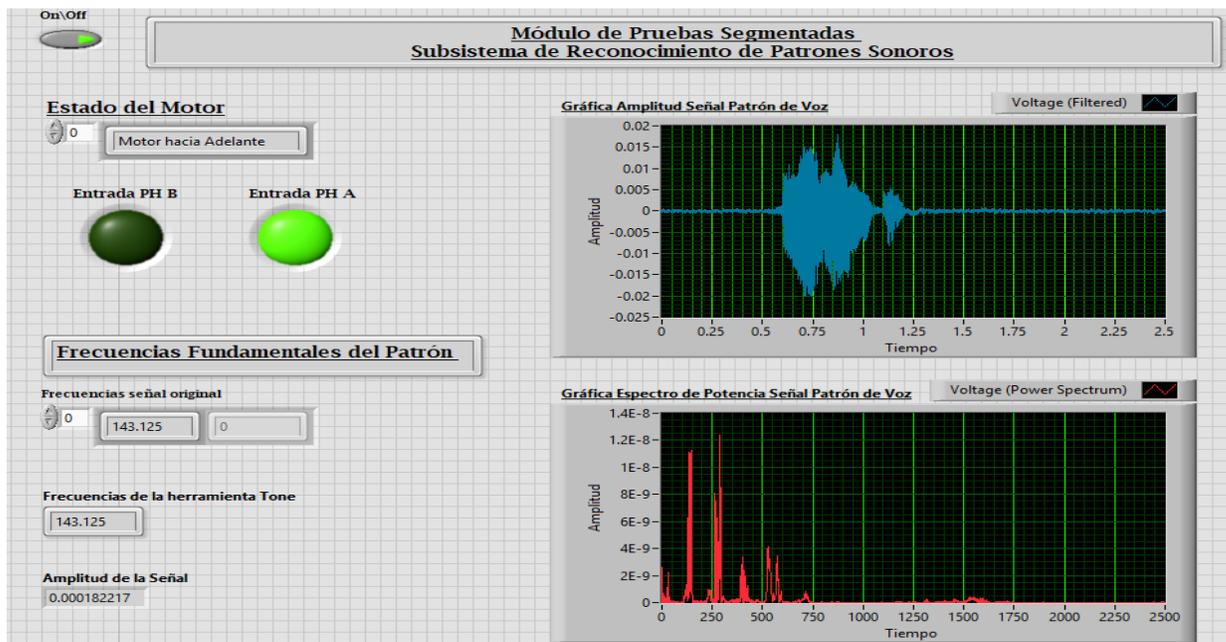


Figura 38. Resultados del módulo de pruebas segmentadas, patrón “adelante” bajo la condición uno.

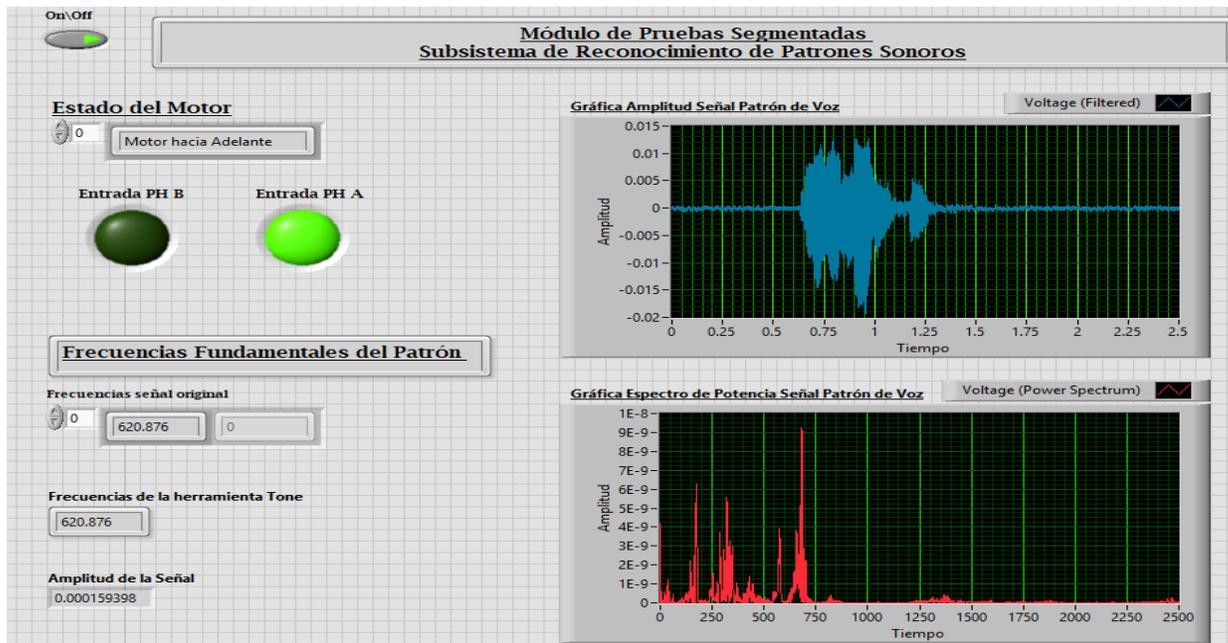


Figura 39. Resultados del módulo de pruebas segmentadas, patrón “adelante” bajo la condición dos.

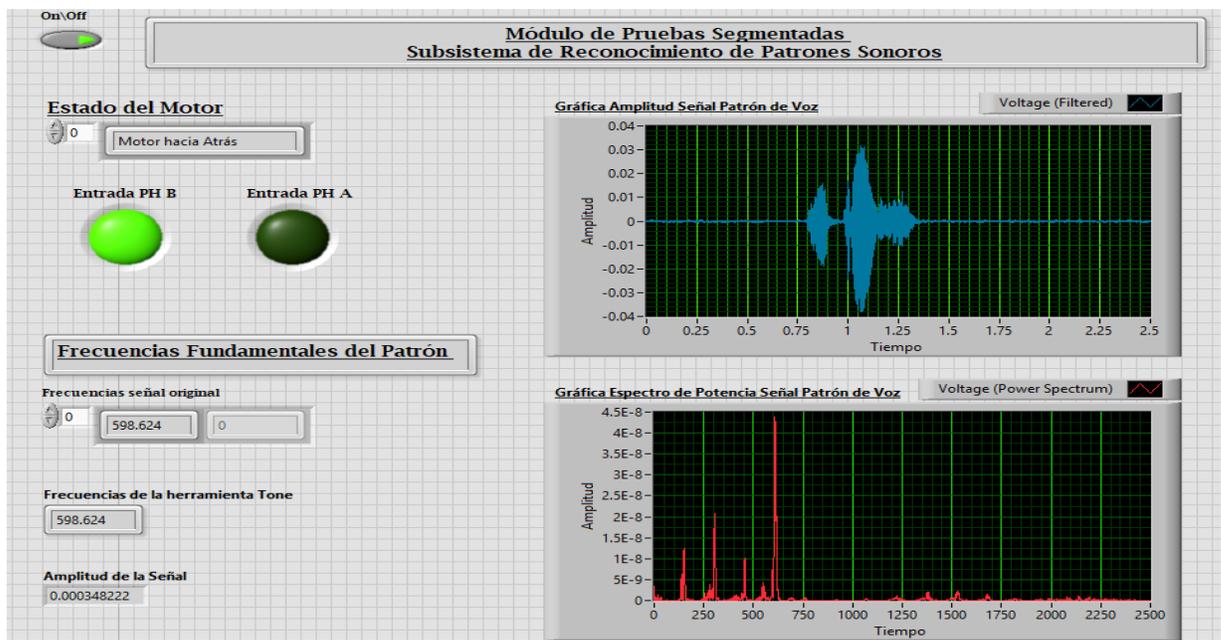


Figura 40. Resultados del módulo de pruebas segmentadas, patrón “atrás” bajo la condición uno.

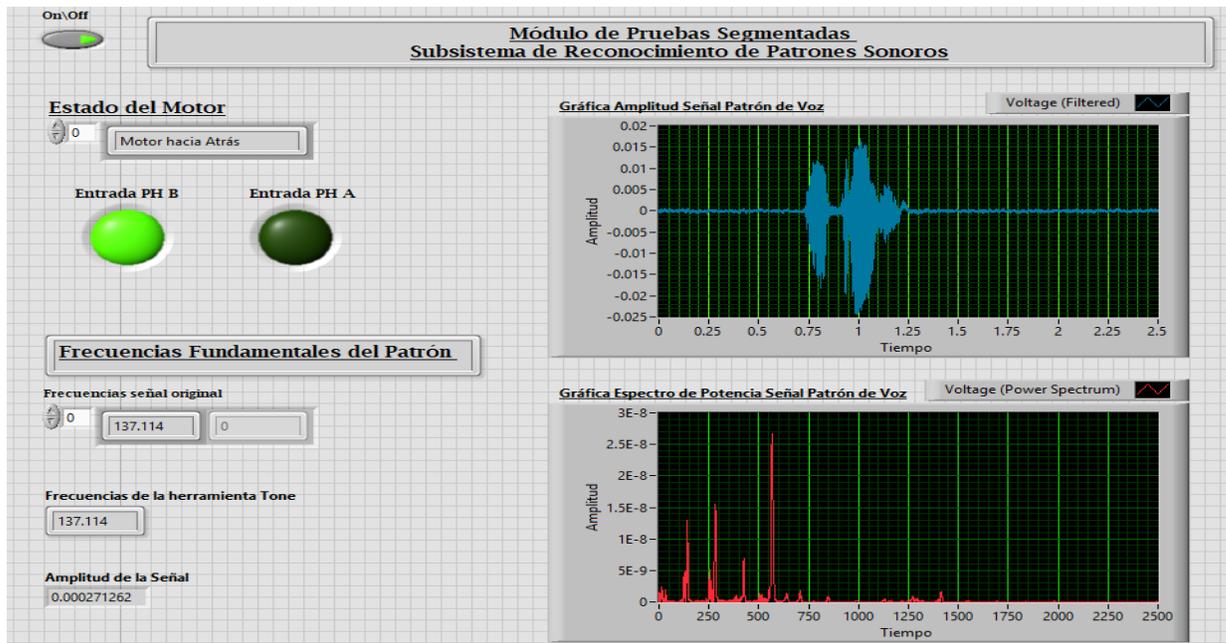


Figura 41. Resultados del módulo de pruebas segmentadas, patrón “atrás” bajo la condición dos.

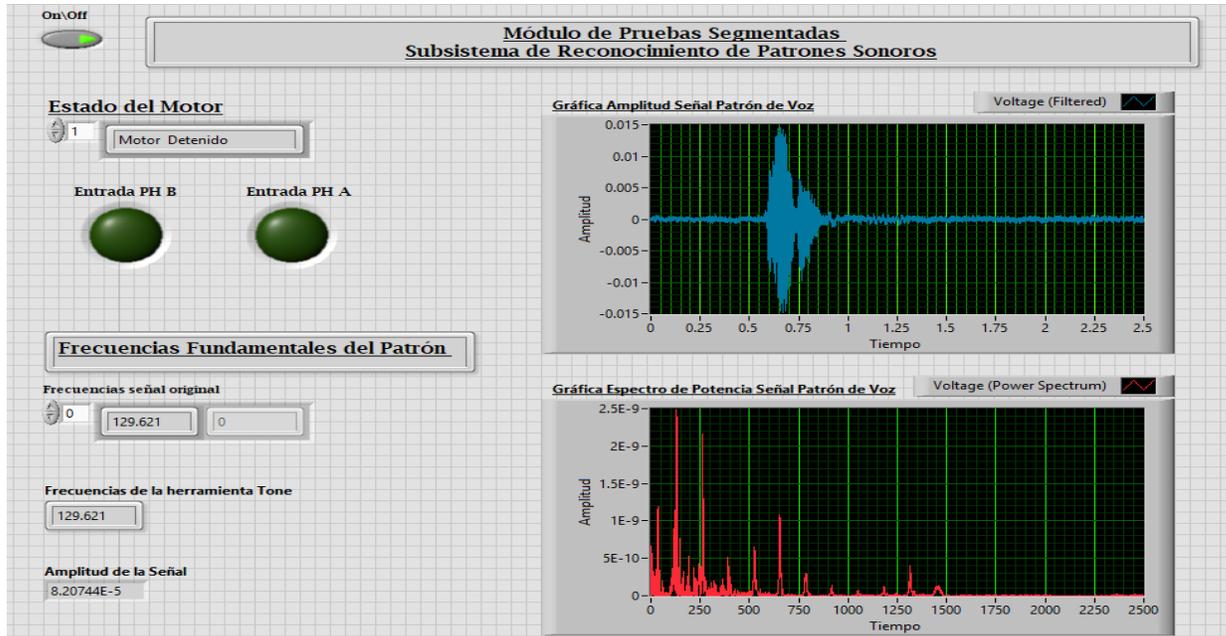


Figura 42. Resultados del módulo de pruebas segmentadas, patrón “pare” bajo la condición uno.

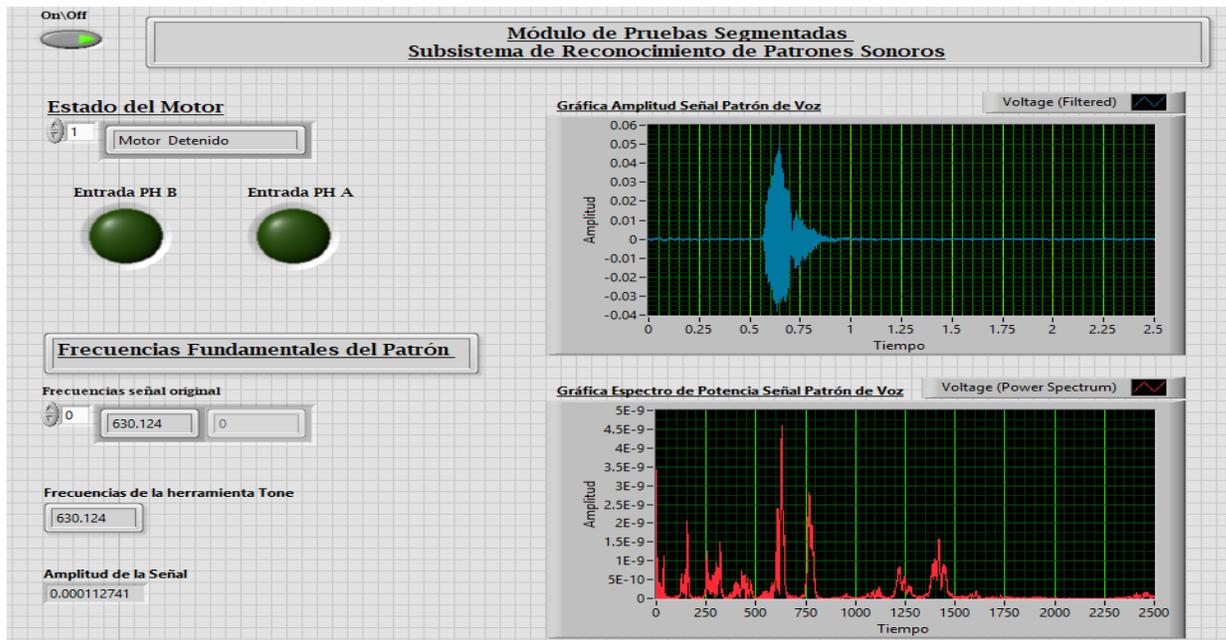


Figura 43. Resultados del módulo de pruebas segmentadas, patrón “pare” bajo la condición dos.

Apéndice 4: Código utilizado en el microcontrolador la captación de la velocidad angular y control PID.

/*

* Programa para monitores de velocidad y control PID Subsistema de motores eléctricos - Proyecto de Graduación

* Diseñado: Jose Roberto Calvo Monge - 2012217649, tomando como referencia código original del autor Dallaby, Bill Porter, bobbyorr

* <http://forum.pololu.com/viewtopic.php?f=15&t=1923>, <http://www.billporter.info/?p=286>, <http://letsmakerobots.com/node/19558#comment-49685>

* Resumen: Programa consiste en la rutina para el proceso de monitoreo de las RPM y velocidad angular de los motores adquiridos para la implementación

* mediante las lecturas del encoder empotrado en los motores. Definiéndolo como observador de estado, se implementa además el control de tipo PI en la velocidad.

II Semestre 2018

Versión 2 con base en la versión original creada el 2013/06/23

*/

```
#define InA1      13          // IN1 Motor 1
#define InB1      12          // IN2 Motor 1
#define PWM1      9           // Pin para el mapeo del PWM
#define encodPinA1  3         // Pin para el Hall Sensor Vout A del Motor
#define encodPinB1  7         // Pin para el Hall Sensor Vout A del Motor
#define LOOPTIME  100        // PID loop time, define mediante los parámetros el ciclo
#define NUMREADINGS 10      // Muestras para el mapeo

int readings[NUMREADINGS];
unsigned long lastMilli = 0;          // loop timing
unsigned long lastMilliPrint = 0;
int w = 0;                            // Declaración de la varibale velocidad angular
int speed_req = 500;                  // Punto de seteo deseado ed la velocidad
int speed_act = 0;                    // Declaración de la varibale velocidad actual
int PWM_val = 0;                      // (25% = 64; 50% = 127; 75% = 191; 100% = 255)
volatile long count = 0;              // Rev counter
float Kp = .11502;                    // PID proportional control Gain
```

```

float Ki = .10374;                // PID Integral control gain

void setup() {                    //Declaración del tipo de variables acorde a su función
  analogReference(EXTERNAL);
  Serial.begin(115600);
  pinMode(InA1, OUTPUT);
  pinMode(InB1, OUTPUT);
  pinMode(PWM1, OUTPUT);
  pinMode(encodPinA1, INPUT);
  pinMode(encodPinB1, INPUT);
  digitalWrite(encodPinA1, HIGH); // Enciende la resistencia detectora de pull up
  digitalWrite(encodPinB1, HIGH);
  attachInterrupt(1, rencoder, FALLING);
  for(int i=0; i<NUMREADINGS; i++) readings[i] = 0; // Inicializa las lecturas en 0

  analogWrite(PWM1, PWM_val);
  digitalWrite(InA1, LOW);
  digitalWrite(InB1, HIGH);
}

void loop() {
  getParam();                    // Lazo principal
  if((millis()-lastMilli) >= LOOPTIME) { // Enter tmed loop
    lastMilli = millis();
  }
}

```

```

    getMotorData();                                // Calcula la velocidad y RPM

    PWM_val= updatePid(PWM_val, speed_req, speed_act);           // Establece el valor de salida
para el PWM

    analogWrite(PWM1, PWM_val);                       // Mapea el valor del PWM para ser
enviado

}

printMotorInfo();                                  // Despliega los datos obtenidos en el serial

}

void getMotorData() {                               // Función que calcula la velocidad angular y
los RPM

static long countAnt = 0;                           // Última cuenta

speed_act = ((count - countAnt)*(60*(1000/LOOPTIME)))/(16*10); // 16 pulsos X 10 del radio
del motoreductor = 160 cuentas totales en la salida

w = (speed_act*2*3.1415)/60;

countAnt = count;

}

int updatePid(int command, int targetValue, int currentValue) { // Lazo de realimentación del
controlador

float pidTerm = 0;                                  // Corrección PI

int error=0;

static int last_error=0;

error = abs(targetValue) - abs(currentValue);

pidTerm = (Kp * error) + (Ki * (error - last_error));

last_error = error;

```

```

return constrain(command + int(pidTerm), 0, 255);
}

void printMotorInfo() {                                     // Despliega los datos obtenidos en el puerto
serial
if((millis()-lastMilliPrint) >= 100) {
    lastMilliPrint = millis();
    //Serial.print("SP:");      Serial.print(speed_req);
    //Serial.print(" RPM:");    Serial.print(speed_act);
    // Serial.println("rad/s");
    Serial.println(w);
    // Serial.print(" PWM:");    Serial.println(PWM_val);

}
}

void rencoder() {                                         // Pulsos y direcciones, Lectura directa de puerto para salvar
los ciclos
if (PINB & 0b00000001) count++;      // Si(digitalRead(encodPinB1)==HIGH) count ++;
else          count--;      // Si (digitalRead(encodPinB1)==LOW) count --;
}

int getParam() {
char param, cmd;
if(!Serial.available()) return 0;
delay(10);

```

```

param = Serial.read();
if(!Serial.available()) return 0;
cmd = Serial.read();
Serial.flush();
switch (param) {
  case 'v':
    if(cmd=='+') {
      speed_req += 20;
      if(speed_req>400) speed_req=400;
    }
    if(cmd=='-') {
      speed_req -= 20;
      if(speed_req<0) speed_req=0;
    }
    break;
  case 's':
    if(cmd=='+'){
      digitalWrite(InA1, LOW);
      digitalWrite(InB1, HIGH);
    }
    if(cmd=='-') {
      digitalWrite(InA1, HIGH);
      digitalWrite(InB1, LOW);
    }
    break;
}

```

```

case 'o':
    digitalWrite(InA1, LOW);
    digitalWrite(InB1, LOW);
    speed_req = 0;
    break;
default:
    Serial.println("???");
}
}

int digital_smooth(int value, int *data_array) {
    static int ndx=0;
    static int count=0;
    static int total=0;
    total -= data_array[ndx];
    data_array[ndx] = value;
    total += data_array[ndx];
    ndx = (ndx+1) % NUMREADINGS;
    if(count < NUMREADINGS)    count++;
    return total/count;
}

```

Apéndice 5: Código final del control PID del subsistema de motores eléctricos mediante el subsistema de patrones sonoros.

/*

**

* Programa de Control de Motores - Proyecto de Graduación

* Diseñado: Jose Roberto Calvo Monge - 2012217649, tomando como referencia código original del autor JiapengLi

* Resumen: Programa consiste en el control de velocidad y activación de un subsistema de motores

mediante un subsistema de patrones de voz proveniente del Voice Recognition Module V3.

**

II Semestre 2018

Versión 2 con base en la versión original creada el 2013/06/13

**

*/

```
#include <SoftwareSerial.h>
```

```
#include "VoiceRecognitionV3.h"
```

```
#define Motor1    10           // INA motor pin
```

```
#define Motor2    11           // INB motor pin
```

```

#define Motor3      12          // INB motor pin
#define Motor4      13          // INB motor pin
#define PWM1        6           // PWM motor pin
#define PWM2        9           // INB motor pin
#define encodPinA1  3           // encoder A pin
#define encodPinB1  8           // encoder B pin
#define encodPinC2  5           // encoder A pin
#define encodPinD2  7           // encoder B pin
#define LOOPTIME    100         // PID loop time
#define NUMREADINGS 10         // samples for Amp average

int readings[NUMREADINGS];

unsigned long lastMilli = 0;      // loop timing
unsigned long lastMilliPrint = 0; // loop timing
int speed_req = 300;             // speed (Set Point)
int speed_act = 0;               // speed (actual value)
int PWM_val = 0;                 // (25% = 64; 50% = 127; 75% = 191; 100% = 255)
volatile long count = 0;         // rev counter
float Kp = .11502;               // PID proportional control Gain
float Kd = .10374;               // PID Derivative control gain
//int PWM2=PWM1
/**

```

Conexión al microcontrolador:

Arduino VoiceRecognitionModule

```

Pin 2 -----> TX módulo
Pin 3 -----> RX módulo

*/

VR myVR(2,4); // 2:RX 3:TX, asignando los pines del módulo, pero se pueden escoger los
de preferencia.

uint8_t records[7]; // Llama a las grabaciones Guardadas.
uint8_t buf[64];

#define adelante (0) // Define el nombre para la identificación de las grabaciones.
#define atras (1)
#define pare (2)

/**
@Ver Imprime la firma o grabación correspondiente, si el caracter es invisible,
imprime un valor hexadecimal en su lugar.
@param buf --> Largo del comando
len --> Número de parámetros
*/
void printSignature(uint8_t *buf, int len)
{
int i;
for(i=0; i<len; i++){

```

```

if(buf[i]>0x19 && buf[i]<0x7F){
    Serial.write(buf[i]);
}
else{
    Serial.print("[");
    Serial.print(buf[i], HEX);
    Serial.print("]");
}
}
}

/**
@Ver  Imprime la firma o grabación correspondiente, si el caracter es invisible,
      imprime un valor hexadecimal en su lugar.
@param buf --> VR módulo imprime un valor cuando es reconocido.
      buf[0] --> Modo de Grupo(FF: None Group, 0x8n: User, 0x0n:System).
      buf[1] --> Número de la grabación la cuál es reconocida.
      buf[2] --> Índice de reconocimiento (posición) valor de la grabación reconocida.
      buf[3] --> Largo de la firma o grabación.
      buf[4]~buf[n] --> Firma o grabación.
*/
void printVR(uint8_t *buf)
{
    Serial.println("VR Index\tGroup\tRecordNum\tSignature");

```

```
Serial.print(buf[2], DEC);

Serial.print("\t\t");

if(buf[0] == 0xFF){
  Serial.print("NONE");
}
else if(buf[0]&0x80){
  Serial.print("UG ");
  Serial.print(buf[0]&(~0x80), DEC);
}
else{
  Serial.print("SG ");
  Serial.print(buf[0], DEC);
}
Serial.print("\t");

Serial.print(buf[1], DEC);

Serial.print("\t\t");

if(buf[3]>0){
  printSignature(buf+4, buf[3]);
}
else{
  Serial.print("NONE");
}
```

```

}
Serial.println("\r\n");
}

void setup()
{
  /**Inicia el bloque principal*/
  myVR.begin(9600);

  Serial.begin(115200);

  Serial.println("Elechouse Voice Recognition V3 Module\r\n Control de subsistema de
Motores mediante subsistema de patrones de voz");

  pinMode(Motor1, OUTPUT);
  pinMode(Motor2, OUTPUT);
  pinMode(Motor3, OUTPUT);
  pinMode(Motor4, OUTPUT);
  pinMode(PWM1, OUTPUT);
  pinMode(PWM2, OUTPUT);
  pinMode(encodPinA1, INPUT);
  pinMode(encodPinB1, INPUT);
  pinMode(encodPinC2, INPUT);
  pinMode(encodPinD2, INPUT);
  digitalWrite(encodPinA1, HIGH);           // turn on pullup resistor

```

```

digitalWrite(encodPinB1, HIGH);
digitalWrite(encodPinC2, HIGH);           // turn on pullup resistor
digitalWrite(encodPinD2, HIGH);
attachInterrupt(1, rencoder, FALLING);
for(int i=0; i<NUMREADINGS; i++) readings[i] = 0; // initialize readings to 0

analogWrite(PWM1, PWM_val);
analogWrite(PWM2, PWM_val);

if(myVR.clear() == 0){
  Serial.println("Módulo con grabaciones.");
}else{
  Serial.println("No se encuentra el VoiceRecognitionModule.");
  Serial.println("Revise la conexión y reinicie el microcontrolador.");
  while(1);
}

if(myVR.load((uint8_t)adelante) >= 0){ // Se cargan las grabaciones presentes en el módulo.
  Serial.println("adelante cargado");
}

if(myVR.load((uint8_t)atras) >= 0){
  Serial.println("atras cargado");
}

```

```

}
if(myVR.load((uint8_t)pare) >= 0){
    Serial.println("pare cargado");
}
}

void getMotorData() { // calculate speed, volts and Amps
static long countAnt = 0; // last count

speed_act = ((count - countAnt)*(60*(1000/LOOPTIME)))/(16*10); // 16 pulses X 29
gear ratio = 464 counts per output shaft rev

countAnt = count;
}

int updatePid(int command, int targetValue, int currentValue) { // compute PWM
value

float pidTerm = 0; // PID correction

int error=0;

static int last_error=0;

error = abs(targetValue) - abs(currentValue);

pidTerm = (Kp * error) + (Kd * (error - last_error));

last_error = error;

return constrain(command + int(pidTerm), 0, 255);
}

```

```
}
```

```
void printMotorInfo() { // display data
```

```
if((millis()-lastMilliPrint) >= 500) {
```

```
    lastMilliPrint = millis();
```

```
    //Serial.print("SP:");    Serial.print(speed_req);
```

```
    //Serial.print(" RPM:");    Serial.print(speed_act);
```

```
    //Serial.print(" PWM:");    Serial.println(PWM_val);
```

```
}
```

```
}
```

```
void rencoder() { // pulse and direction, direct port reading to save  
cycles
```

```
if (PINB & 0b00000001) count++; // if(digitalRead(encodPinB1)==HIGH) count  
++;
```

```
else count--; // if (digitalRead(encodPinB1)==LOW) count --;
```

```
}
```

```
void rencoder2() { // pulse and direction, direct port reading to save  
cycles
```

```
if (PINC & 0b00000001) count++; // if(digitalRead(encodPinB1)==HIGH) count  
++;
```

```
else count--; // if (digitalRead(encodPinB1)==LOW) count --;
```

```
}
```

```

void loop()
{
  int ret;

  ret = myVR.recognize(buf, 50); // Accede a la lista de grabaciones.

  if(ret>0){
    switch(buf[1]){
      case adelante:

        getMotorData(); // check keyboard

        if((millis()-lastMilli) >= LOOPTIME) { // enter tmed loop
          lastMilli = millis();

          getMotorData(); // calculate speed, volts and Amps

          PWM_val= updatePid(PWM_val, speed_req, speed_act); // compute PWM
value
          analogWrite(PWM1, PWM_val);
          analogWrite(PWM2, PWM_val);
          printMotorInfo(); // send PWM to motor
        }

        // display data

        digitalWrite(Motor1, HIGH);
        digitalWrite(Motor2, LOW);
        digitalWrite(Motor3, HIGH);
        digitalWrite(Motor4, LOW);

```

```

printMotorInfo() ;

    break;

case atras:

digitalWrite(Motor1, LOW);

    digitalWrite(Motor2, HIGH);

    digitalWrite(Motor3, LOW);

digitalWrite(Motor4, HIGH);// send PWM to motor

/** Comando de atrás para el avance de los motores en sentido antihorario*/

break;

case pare:

digitalWrite(Motor1, LOW);

digitalWrite(Motor2, LOW);// send PWM to motor

    digitalWrite(Motor3, LOW);

digitalWrite(Motor4, LOW);

/** Comando pare para detener el motor*

break;

default:

Serial.println("Función de grabación Indefinida");

break;

}

/** Voz reconocida*/

// printVR(buf);

} }

```

ANEXOS

Anexo 1: Hojas de datos de los motores.



12v 11000rpm - The Motor Rotating Speed Before Reduction: 12V 11000rpm									
Gear Ratio	1/6.25	1/10	1/18.8	1/30	1/43.8	1/56.3	1/70	1/90	1/131.3
L length of decelerator(mm)	19	19	22	22	24	24	24	24	26.5
No-load Speed (rpm)	1760	1100	585	366	251	195	157	122	83
No-load Current (Ma)	250	250	250	250	250	250	250	250	250
Stall Torque (kg.cm)	3.1	5.1	8.6	13	18	23	28	36	36
Stall Current (A)	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5

Figura 44. Tabla de datos del motor seleccionado para el prototipo a pequeña escala de la silla de ruedas

[8]

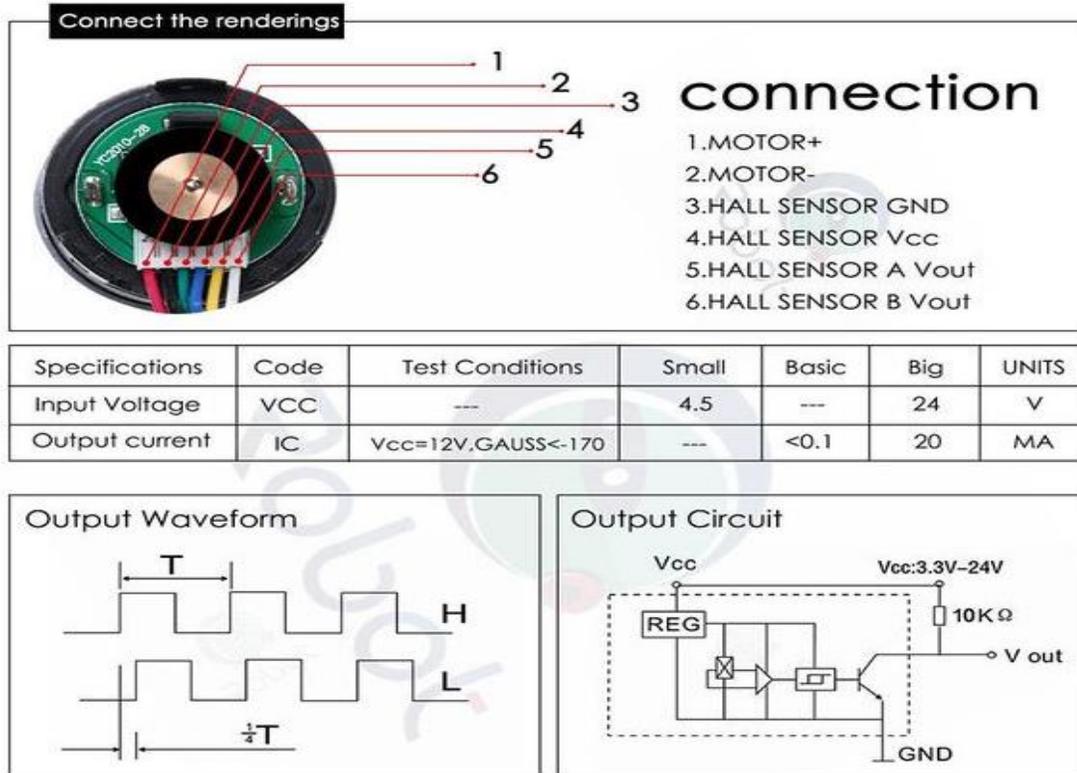
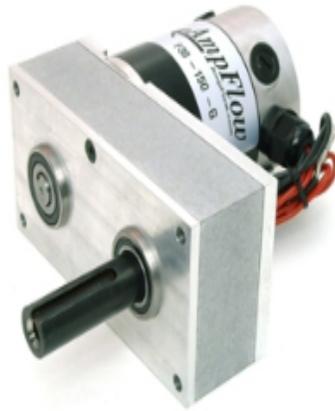


Figura 45. Lista de pines del motor seleccionado para el prototipo a pequeña escala de la silla de ruedas

[8]



The AmpFlow speed reducer is a heavy-duty, low-cost, gearhead that works with any of the three-inch diameter AmpFlow motors.

This speed reducer uses a unique three-stage chain-and-sprocket mechanism that reduces cost while still maintaining high torque capacity.

This unit provides speed reduction and torque multiplication, and it's an easy way to "bolt-in" the AmpFlow motors.

We stock ten different gearmotors or we can design custom gearmotors:

Type	High-Performance		Mid-Range		Economy	
Model	A28-400-G	A28-150-G	F30-400-G	F30-150-G	E30-400-G	E30-150-G
Peak Horsepower	4.3	3.0	2.5	2.3	2.1	1.0
Motor Diameter (inches)	3.0	3.0	3.1	3.1	3.1	3.1
Reduction Ratio	8.3:1	8.3:1	8.3:1	8.3:1	8.3:1	8.3:1
Stall Torque (in-lbs)	1930	1020	1160	710	770	360
Nominal Voltage	24*	24*	24*	24*	24*	24*
No-Load RPM	580	720	540	830	680	670
Pounds	10.4	7.3	11.8	8.2	9.4	7.1
Price	\$589	\$489	\$449	\$419	\$289	\$259
Pictures	A28-400-G	A28-150-G	F30-400-G	F30-150-G	E30-400-G	E30-150-G
Drawings	A28-400-G	A28-150-G	F30-400-G	F30-150-G	E30-400-G	E30-150-G
Performance Charts	A28-400-G	A28-150-G	F30-400-G	F30-150-G	E30-400-G	E30-150-G
Order	<input type="button" value="Add to Cart"/>					

* The above specifications are for 24V. The motors can also be used at 12V or 18V. The RPM is proportional to the voltage so running at 12V will result in half the no-load RPM that is shown above for 24V. The lower voltage also reduces the maximum achievable torque by 50%. The motors have also been tested and used at higher voltages resulting in higher RPM, torque, and power. Shorter duty-cycles are recommended for higher voltages to allow the motors time to cool.

Figura 46. Tabla de datos del motor seleccionado para el prototipo a escala real de la silla de ruedas [9]

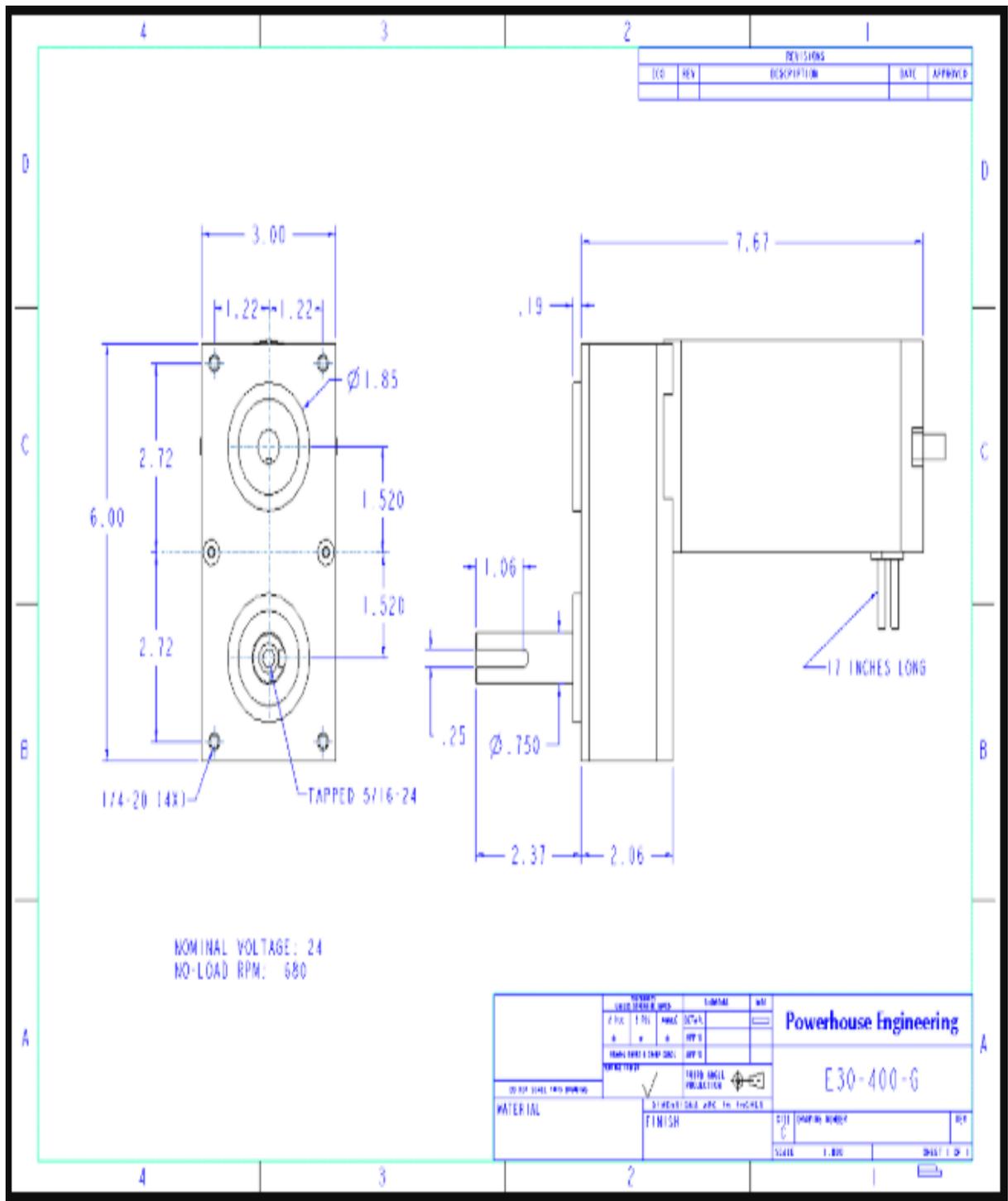


Figura 47. Dimensiones del motor seleccionado para el prototipo a escala real de la silla de ruedas [9]